

LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO ARQUITECTÓNICO

POR LA GRAVEDAD Y LA LUZ

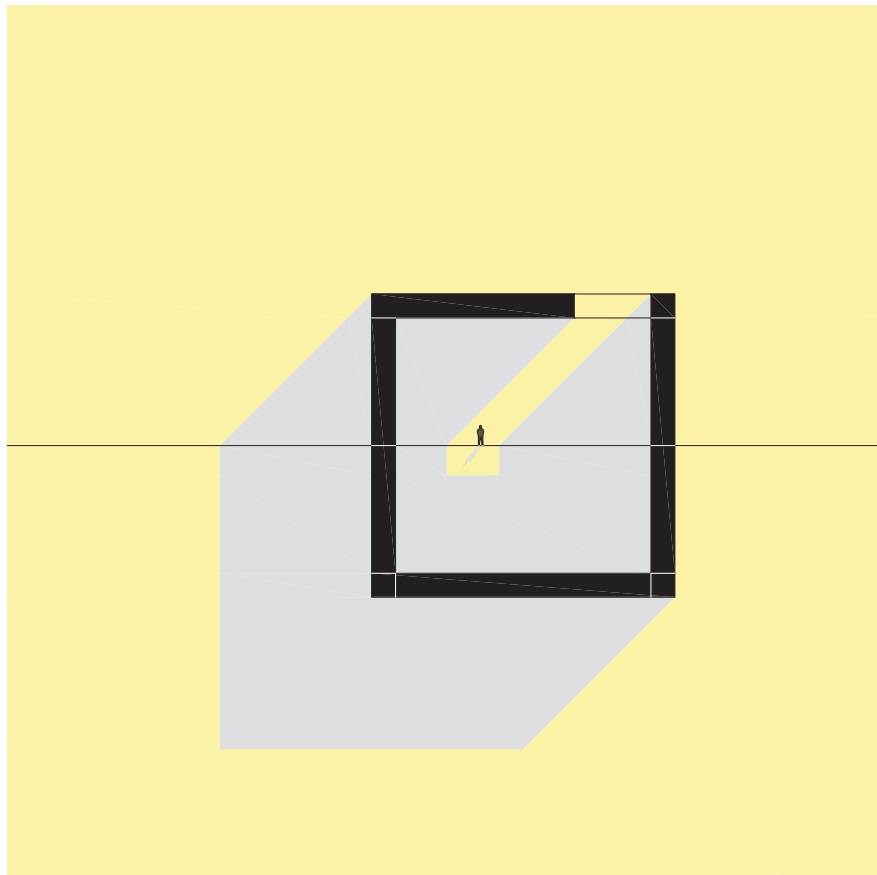
OSCAR LINARES DE LA TORRE

-TESIS DOCTORAL-

LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO ARQUITECTÓNICO POR LA GRAVEDAD Y LA LUZ

The structuring of architectural space

by gravity and light



Título: La Estructuración del Espacio Arquitectónico por la Gravedad y la Luz

Autor: Oscar Linares de la Torre

Director: Carlos Ferrater Lambarri

Departament de Projectes Arquitectònics (DPA)

Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona (ETSAB)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)



Tesis presentada para la obtención del título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya.

Barcelona, Octubre de 2014.

AGRADECIMIENTOS / AGRAÏMENTS / ACKNOWLEDGEMENTS

Vull donar les gràcies al Departament de Projectes Arquitectònics de l'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona de la Universitat Politècnica de Catalunya pel seu suport econòmic i institucional. Gràcies també a les persones que el conformen i que, durant aquest anys, s'han interessat pel desenvolupament de la meva tesi doctoral.

I would like to express my deepest appreciation and thanks to the London Metropolitan University, for providing the opportunity to work as a visiting teacher and researcher for a semester. I would like to personally thank Stephen Taylor, Alun Jones and Biba Dow, tutors at Professional Diplomas of the Department of Spatial Design of the Sir John Cass Faculty of Art, Architecture and Design. Finally, I would like to especially thank Sandra Denicke-Polcher, Acting Deputy Head of the School of Architecture, Signy Svalastoga, Associate Dean and Head of School of Architecture, and Robert Mull, Dean and Director of Architecture and Professor of the School of Architecture.

A special thanks to the Centre for History of Science of the Royal Society, for providing access to their invaluable material.

Gracias a todos aquellos arquitectos y docentes que, durante estos años, han compartido conmigo sus reflexiones sobre la luz y la gravedad. Merecen especial mención Alberto Campo Baeza, Juan Navarro Baldeweg, Elisa Valero Ramos, Juan Carlos Arnuncio Pastor, Eduardo De Miguel Arbonés y Luís Martínez Santa-María.

Quiero dar las gracias a las personas que han aceptado formar parte del tribunal durante el acto de lectura de la tesis, por compartir conmigo un momento tan importante de mi trayectoria académica: al Dr. Arquitecto Juan Carlos Arnuncio, Catedrático de Proyectos Arquitectónicos de la Universidad Politécnica de Madrid; a la Dra. Arquitecta Elisa Valero, Catedrática de Proyectos Arquitectónicos de la Universidad de Granada; al Dr. Arquitecto Jordi Ros, Profesor Titular de Proyectos Arquitectónicos de la UPC; al Dr. en Física Francesc Fayos, Profesor Titular del departamento de Física Aplicada de la UPC; y, sobretodo, al Dr. Arquitecto Javier Castañón, Head of Technical Studies y Master of Technical Studies de la Architectural Association, por aceptar formar parte del tribunal en un momento tan delicado e importante para su salud. También quiero agradecer su generosidad al Dr. Arquitecto Francisco González de Canales, Profesor Titular de Historia, Teoría y Composición Arquitectónicas de la Universidad de Sevilla y también Profesor de Historia y Teoría y Diseño la Architectural Association, y al Dr. Arquitecto Alberto Peñín, Profesor Lector de Proyectos Arquitectónicos de la UPC.

Quiero agradecer a mi amigo el Dr. Arquitecto Oscar Ernesto Guevara Álvarez su guía permanente y su ayuda incansable durante todos estos años.

Al Professor Titular de Projectes Arquitectònics i actual Director de l'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, en Jordi Ros i Ballesteros, amic, mestre, mentor i instigador de la present investigació doctoral, li vull donar les gràcies per haver-me donat tant i per haver confiat en mi durant tots aquests anys.

Per últim, vull donar-li les gràcies també al meu director de tesi, el Catedràtic de Projectes Arquitectònics Carles Ferrater Lambarri, per confiar en les meves idees des de l'inici, per haver-me exigut sempre tant i per no haver-me deixat defallir davant las dificultats que s'han anat presentant al llarg de la recerca.

Por último, quiero darles las gracias de manera especial a las personas que más quiero, porque sin ellas esta tesis no hubiera sido posible:

A Ana,

por haberme iluminado con su luz durante todo este tiempo, haciendo de mí el hombre más feliz del mundo.

Al meu pare,

per haver-me transmès la seva passió pel món de la construcció des de petit, gràcies a la qual vaig decidir ser arquitecte.

A mi madre,

por su inestimable apoyo silencioso e incondicional, pues sin él se me hubiera hecho muy difícil llevar a cabo esta investigación.

Per últim, vull dedicar-li la tesi al meu avi: m'hauria fet il·lusió que hagués pogut veure-la acabada.

ABSTRACT

Keywords

Architecture

Physics

Space

Structure

Gravity

Light

Architecture is based on the relationship between matter and its absence, space. Matter, which arranged by the laws of gravity creates space, we name structure. The character of this space depends on the interaction between the matter that defines it and the light that reveals it. There isn't a single architectural construction in the world that while creating space has been able to elude the forces of terrestrial gravity, or do without the effects of solar light. Unable to modify the origin and physical nature of these two primordial facts, the architect must play with the different ways in which these are revealed on the matter that shapes the space.

This realization highlights the importance and the opportunity to write a doctoral investigation on the structuring of architectural space by gravity and light. The purpose of this research is to clarify the principles on which the interaction between gravity and light are based, with the aim of structuring architectural space.

The research is divided into three parts. The aim of the first part is to reveal the origins and the fundamental reasons for the architectural interest in gravity and light, lead in Spain by Juan Navarro Baldeweg and Alberto Campo Baeza. It shows that the importance of gravity and light in architecture has been recognized since ancient times. Authors as diverse and distant as Marcus Vitruvius, Christopher Wren, Arthur Schopenhauer and Theo Van Doesburg, have shown an interest in the spatial consequences of the interaction between both phenomena.

Nevertheless, in spite of the interest that these questions have risen, the theory of architecture has never felt the need to answer questions as apparently simple and basic as "What is Gravity?" or "What is light?". The second part of the research is dedicated to looking into the nature of both phenomena. This highlights the benefits of pursuing deeper into the knowledge

RESUMEN

La *arquitectura* se fundamenta en la relación entre la *materia* y su ausencia, el *espacio*. A la materia que, dispuesta de acuerdo a las leyes de la *gravedad*, construye el espacio, la denominamos *estructura*. El carácter de este espacio depende de la interacción entre la materia grave que lo define y la *luz* que lo revela. No existe ni una sola obra de arquitectura en el mundo que, en su afán por construir el espacio, haya podido eludir la acción de la gravedad terrestre o haya podido prescindir de los efectos de la luz solar. Ante la imposibilidad de modificar las propiedades de estas dos realidades primigenias incidiendo en el origen y la causa de su naturaleza física, el arquitecto debe actuar sobre los distintos modos en que éstas se manifiestan sobre la materia que conforma el espacio.

Esta percatación advierte de la importancia y la oportunidad de la presente investigación doctoral sobre *la estructuración del espacio arquitectónico por la gravedad y la luz*, cuya finalidad es esclarecer los principios sobre los que se fundamenta la interacción entre la gravedad y la luz a fin de estructurar el espacio arquitectónico.

La investigación se estructura en tres partes. La primera se plantea como objetivo el esclarecimiento de los orígenes y las razones fundamentales sobre las que se sustenta el actual interés por la gravedad y la luz, liderado en nuestro país por los arquitectos Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza. Se descubre que, desde antiguo, se ha reconocido la importancia fundamental de la gravedad y de la luz en el hecho arquitectónico: autores tan distintos y distantes como Marco Vitruvio, Christopher Wren, Arthur Schopenhauer o Theo Van Doesburg, se han interesado en las consecuencias espaciales de la interacción estructural de ambos fenómenos.

Sin embargo, a pesar del interés que han suscitado siempre ambas cuestiones, la teoría arquitectónica no se ha planteado nunca la necesidad de responder a preguntas aparentemente tan sencillas y elementales como ¿qué es la gravedad? o ¿qué es la luz?. La segunda parte de la investigación se dedica a indagar en la

Palabras clave

Arquitectura

Física

Espacio

Estructura

Gravedad

Luz

of gravity and light, accumulated so carefully throughout time. For this purpose, the characteristics of the physical theories, that from Aristotle to Einstein have tackled the joint investigation of both phenomena, have been analyzed.

The third and final part of the research studies the design strategies used in the architectural manipulation of spatial purposes, through the structural interaction between gravity and light. Four architectural masterpieces –Stonehenge, the Pantheon in Rome, the Palais des Machines of the Universal Exhibition of Paris in 1889, and the Neue Nationalgalerie in Berlin-, will constitute paradigmatic examples of the different ways of conceiving architectural space throughout history. The analysis discovers the existence of a chronological and conceptual interrelationship between the evolution of the physical representation of gravity and light and the evolution of the different conceptions of architectural space. This fact leads us to consider the physical knowledge on both phenomena as a powerful design tool.

Under the conviction that space, gravity, and light are fundamental topics in the theoretical reflection and in the design of architectural practice, this research offers its own contribution to the collection of theoretical and practical reflections on both questions, that some of the most prestigious architects of our country have been developing in the past few decades.

naturaleza de ambos fenómenos. Es entonces cuando se advierte la conveniencia de ahondar en el conocimiento científico sobre la gravedad y la luz, acumulado con tanto rigor y durante tanto tiempo. A tal efecto, se han analizado las características de las teorías físicas que, a lo largo de la historia, han abordado la investigación conjunta de ambos fenómenos desde Aristóteles hasta Einstein.

En la tercera y última parte de la investigación se estudian las estrategias proyectuales empleadas en la manipulación arquitectónica de la interacción estructural entre la gravedad y la luz con fines espaciales. Este estudio se desarrolla por medio del análisis de cuatro obras maestras de la arquitectura -el Stonehenge, el Pantheon de Roma, el Palais des Machines de la Exposición Universal de París de 1889 y la Neue Nationalgalerie de Berlín-, que se constituyen en ejemplos paradigmáticos de las distintas maneras de concebir el espacio arquitectónico a lo largo de la historia. Como consecuencia de esta investigación, se descubre la existencia de una correlación cronológica y conceptual entre la evolución de la representación física de la gravedad y de la luz y la evolución de las distintas concepciones espaciales arquitectónicas, hecho que induce a considerar al conocimiento físico sobre ambos fenómenos como una potente herramienta proyectual.

Con el convencimiento de que el espacio, la gravedad y la luz son temas fundamentales en la reflexión teórica y la práctica proyectual del quehacer arquitectónico, la presente investigación realiza su propia aportación al conjunto de reflexiones teóricas y proyectuales sobre la gravedad y la luz en la arquitectura, que algunos de los más prestigiosos arquitectos de nuestro país han venido desarrollando durante las últimas décadas.

SUMMARY

INTRODUCTION

PART I. GRAVITY AND LIGHT IN THE THEORY OF ARCHITECTURE

- I.1 *Introduction*
- I.2 *Previous researches*
- I.3 *Origins of the architectural interest in gravity and light*
- I.4 *Architectural reflection on gravity and light*

PART II. GRAVITY AND LIGHT AS PHYSICAL PHENOMENA

- II.1 *Introduction*
- II.2 *The first postulates of ancient times*
- II.3 *The scientific revolution of the XVII century*
- II.4 *Modern physics of the XIX-XX centuries*
- II.5 *Conclusions*

PART III. GRAVITY AND LIGHT IN THE STRUCTURING OF SPACE

- III.1 *Introduction*
- III.2 *The resistance to gravity and the opposition to light
in the structuring of the outer space.*
The Stonehenge
- III.3 *The canalisation of gravity and the embracing of light
in the structuring of the inner space.*
The Pantheon of Rome
- III.4 *The victory of light over gravity
in the structuring of the externalized-inner space.*
The Palais des Machines of the Universal Exhibition of Paris in 1889
- III.5 *The abstraction of gravity and the lightness of light
in the structuring of the inner space linked to the external.*
The Neue Nationalgalerie in Berlin
- III.6 *Conclusions*

CONCLUSIONS

APPENDIX. Quotations

BIBLIOGRAPHY

SUMARIO

INTRODUCCIÓN

PARTE I. LA GRAVEDAD Y LA LUZ EN LA TEORÍA DE LA ARQUITECTURA

- I.1 Introducción
- I.2 Investigaciones anteriores
- I.3 Orígenes del interés arquitectónico por la gravedad y la luz
- I.4 La reflexión arquitectónica sobre la gravedad y la luz

PARTE II. LA GRAVEDAD Y LA LUZ COMO FENÓMENOS FÍSICOS

- II.1 Introducción
- II.2 Los primeros postulados de la antigüedad clásica
- II.3 La revolución científica del siglo XVII
- II.4 La física moderna de los siglos XIX-XX
- II.5 Conclusiones

PARTE III. LA GRAVEDAD Y LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO

- III.1 Introducción
- III.2 La resistencia a la gravedad y la oposición a la luz en la estructuración del espacio exterior.
El Stonehenge
- III.3 El encauzamiento de la gravedad y la interiorización de la luz en la estructuración del espacio interior.
El Pantheon de Roma
- III.4 La victoria de la luz sobre la gravedad en la estructuración del espacio interior exteriorizado.
El Palais des Machines de la Exposición Universal de París de 1889
- III.5 La abstracción de la gravedad y la levedad de la luz en la estructuración del espacio interior en continuidad con el exterior.
La Neue Nationalgalerie de Berlín
- III.6 Conclusiones

CONCLUSIONES

ANEXO. Citas textuales

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DESARROLLADO

0. INTRODUCCIÓN.....	001
0.1. Prefacio.....	005
0.2. Vinculación personal del autor con el tema de investigación.....	009
0.3. Finalidad y objetivos.....	013
0.4. Estructura de la investigación.....	017
0.5. Metodología de estudio.....	025
I. LA GRAVEDAD Y LA LUZ EN LA TEORÍA DE LA ARQUITECTURA.....	031
I.1. Introducción.....	035
I.2. Investigaciones anteriores.....	037
I.2.1. Juan Navarro Baldeweg.....	038
I.2.1.1. La manifestación de la luz y de la gravedad como objeto del arte.....	039
I.2.1.1.1. <i>Piezas de luz</i>	040
I.2.1.1.2. <i>Piezas de gravedad</i>	042
I.2.1.1.3. <i>Piezas de luz y gravedad</i>	044
I.2.1.2. Arquitectura, luz y gravedad.....	045
I.2.1.3. La estructura arquitectónica, entre la gravedad y la luz.....	050
I.2.1.3.1. <i>Estratificación vertical de lo pesado y lo ligero</i>	051
I.2.1.3.2. <i>"Piezas de luz": cúpulas ingravidas</i>	055
I.2.1.3.3. <i>"Figuras de luz en su totalidad": vigas-lucernario unidireccionales</i>	060
I.2.1.3.4. <i>Núcleos masivos envueltos por ligeras tramas de luz</i>	066
I.2.2. Alberto Campo Baeza.....	068
I.2.2.1. Arquitectura, espacio y luz.....	068
I.2.2.2. La tectónica de la luz y la estereotomía de la gravedad.....	071
I.2.2.2.1. <i>Kenneth Frampton: estructura, tectónica y estereotomía</i>	071
I.2.2.2.2. <i>Bötticher y Semper: estructuralismo y espacialidad archi-Tectónica</i>	072
I.2.2.2.3. <i>Campo Baeza: luz tectónica y gravedad estereotómica</i>	074
I.2.2.3. Gravedad estructural y luz estructurada.....	076
I.2.2.3.1. <i>La revelación de la estructura</i>	077
I.2.2.3.2. <i>El belvedere tectónico sobre el podio estereotómico</i>	080
I.2.2.3.3. <i>La masa estructural estereotómica atravesada por la luz</i>	086
I.2.2.3.4. <i>La tectónica de la trama estructural translúcida</i>	088
I.2.2.4. Arquitectura, física y Newton.....	092
I.2.3. Navarro Baldeweg y Campo Baeza: luz y gravedad.....	092
I.3. Orígenes del interés arquitectónico por la gravedad y la luz.....	095
I.3.1. Marco Vitruvio: gnomónica y mecánica.....	095
I.3.1.1. Las tres partes de la arquitectura.....	097
I.3.2. Christopher Wren: óptica y estática.....	098
I.3.2.1. Wren, arquitecto: la belleza de la luz y la estática estructural.....	100
I.3.3. Arthur Schopenhauer: luz y gravedad.....	103
I.3.3.1. La arquitectura como manifestación de la luz y de la gravedad.....	105
I.3.4. Luz y gravedad en la arquitectura moderna: entre la física relativista y el arte de vanguardia.....	109
I.4. La reflexión arquitectónica sobre la gravedad y la luz.....	112

II. LA GRAVEDAD Y LA LUZ COMO FENÓMENOS FÍSICOS.....	119
II.1. Introducción.....	123
II.1.1. Los tres grandes periodos en la física de la luz y la gravedad.....	124
II.1.2. Consideraciones de carácter metodológico.....	126
II.2. Los primeros postulados de la antigüedad clásica.....	129
II.2.1. Aristóteles: gravedad telúrica y luz etérea.....	129
II.2.1.1. La “gravedad” como tendencia natural de los cuerpos pesados.....	129
II.2.1.2. La luz como cualidad del medio diáfano.....	131
II.2.2. Euclides y Arquímedes: geometría, luz y gravedad.....	132
II.2.2.1. La luz geométrica de Euclides.....	133
II.2.2.2. La “gravedad” geométrica de Arquímedes.....	134
II.2.3. Plutarco: la <i>gravitas</i> romana.....	135
II.3. La revolución científica del siglo XVII.....	137
II.3.1. Galileo Galilei: crítica a la física aristotélica.....	138
II.3.1.1. El principio del fin de la gravedad aristotélica.....	138
II.3.1.2. La indefinición material de la luz.....	142
II.3.2. Johannes Kepler: la luz y la gravedad, como virtudes.....	143
II.3.2.1. La luz, materia inmaterial.....	143
II.3.2.2. La gravedad terrestre y el movimiento celeste.....	146
II.3.3. René Descartes: vórtices, gravedad y luz.....	149
II.3.3.1. La gravedad terrestre como repulsión desigual de la materia.....	150
II.3.3.2. La luz como acción de la materia sutil.....	151
II.3.4. Christiaan Huygens: una nueva luz sin gravedad.....	153
II.3.4.1. La luz como onda etérea.....	153
II.3.4.2. La gravedad “descartada”.....	155
II.3.5. Isaac Newton: éter, gravedad y luz.....	157
II.3.5.1. La gravedad, una fuerza universal.....	159
II.3.5.2. La luz corpuscular.....	165
II.3.6. La interacción luz-gravedad después de Newton.....	169
II.4. La física moderna de los siglos XIX-XX.....	171
II.4.1. Hacia una nueva luz.....	172
II.4.1.1. El siglo XIX: de la luz corpuscular a la onda electromagnética.....	173
II.4.1.1.1. Young y Fresnel: de vuelta a la teoría ondulatoria de la luz.....	173
II.4.1.1.2. Faraday y Maxwell: la luz como onda electromagnética.....	175
II.4.1.2. Albert Einstein: la nueva luz del siglo XX.....	177
II.4.1.2.1. La naturaleza cuántica de la luz.....	178
II.4.1.2.2. La velocidad de la luz como constante universal.....	180
II.4.2. Albert Einstein: gravedad, geometría y espacio.....	177
II.4.2.1. Los dos principios fundamentales de la relatividad general.....	184
II.4.2.1.1. La curvatura del espacio-tiempo por acción de la masa.....	184
II.4.2.1.2. La flotación libre de la materia en el espacio-tiempo curvo.....	186
II.4.2.2. La gravitación de la luz en la relatividad general.....	189
II.4.3. Hacia una teoría unificada de la luz y la gravedad.....	190

II.5. Conclusiones.....	193
II.5.1. Sobre las grandes teorías de la gravedad.....	193
II.5.2. Sobre las sucesivas teorías en torno a la luz.....	195
II.5.3. Las teorías unificadas sobre la gravedad y la luz.....	198
II.5.4. La relación física entre la gravedad y la luz.....	200
III. LA GRAVEDAD Y LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO.....	205
III.1. Introducción.....	209
III.1.1. Consideraciones de carácter conceptual.....	213
III.1.2. Estructura y consideraciones de carácter metodológico.....	221
III.2. La resistencia a la gravedad y la oposición a la luz en la estructuración del espacio exterior.....	225
III.2.1. El Stonehenge.....	227
III.2.2. La verticalidad del peso y la caída.....	231
III.2.3. La orientación de la luz solar.....	237
III.2.4. Gravedad y luz como realidades contrapuestas.....	243
III.2.5. La cubrición del espacio como problema gravitatorio.....	249
III.2.6. El nacimiento de la luz estructural.....	253
III.2.7. La resistencia a la gravedad y la oposición a la luz en la estructuración del espacio exterior.....	257
III.3. El encauzamiento de la gravedad y la interiorización de la luz en la estructuración del espacio interior.....	261
III.3.1. El Pantheon de Roma.....	263
III.3.2. La luz y la sombra como secuencia espacial.....	265
III.3.3. La forma de la gravedad clásica.....	279
III.3.3.1. <i>La tectónica de la estructura arquitrabada.....</i>	283
III.3.3.2. <i>La ligereza inclinada como mecanismo de cubrición espacial.....</i>	291
III.3.4. El espacio estructurado por la curvatura de la gravedad.....	296
III.3.4.1. <i>Del dintel al arco: la gravedad como necesidad estructural.....</i>	297
III.3.4.2. <i>La curvatura intrínseca de la gravedad.....</i>	309
III.3.4.3. <i>La mecánica gravitatoria del espacio estructural.....</i>	315
III.3.4.4. <i>La tectónica aparente de la estructura.....</i>	329
III.3.5. La luz como presencia espacial y ausencia gravitatoria.....	346
III.3.5.1. <i>La estructura física de la luz ocular.....</i>	351
III.3.5.2. <i>La ingravidez de la luz reflejada.....</i>	357
III.3.6. El encauzamiento de la gravedad y la interiorización de la luz en la estructuración del espacio interior.....	369

III.4. La victoria de la luz sobre la gravedad en la estructuración del espacio interior exteriorizado.....	373
III.4.1. El Palais des Machines de 1889.....	375
III.4.2. La gravedad superada.....	381
III.4.2.1. La gravedad ausente del siglo XIX.....	384
III.4.2.2. El gran espacio diáfano: más espacio con menos materia.....	387
III.4.2.3. La forma estructural como optimización de la función portante.....	393
III.4.2.4. La nueva articulación entre la carga y el soporte.....	399
III.4.2.5. La ligereza de la línea estructural.....	405
III.4.3. El descubrimiento de una nueva luz.....	411
III.4.3.1. La luz vitrificada como cerramiento espacial.....	417
III.4.3.2. De la luz estructural a la luz desestructurada.....	421
III.4.3.3. El peso de la transparencia.....	426
III.4.4. La victoria de la luz sobre la gravedad en la estructuración del espacio interior exteriorizado.....	433
III.5. La abstracción de la gravedad y la levedad de la luz en la estructuración del espacio interior en continuidad con el exterior.....	437
III.5.1. La Neue Nationalgalerie de Berlín.....	439
III.5.2. La estructuración del espacio continuo.....	445
III.5.3. La levedad como abstracción de la gravedad.....	467
III.5.3.1. Abstracción y gravedad: entre la física y la arquitectura.....	468
III.5.3.2. La planeidad como abstracción de la forma de cubierta.....	473
III.5.3.3. La levedad como abstracción de la condición del apoyo.....	489
III.5.4. La espacialidad de la luz abstracta.....	506
III.5.5. La abstracción de la gravedad y de la luz en la estructuración del espacio continuo.....	523
III.6. Conclusiones.....	527
III.6.1. La estructuración gravitatoria del espacio.....	530
III.6.1.1. El peso de la primera concepción espacial.....	531
III.6.1.2. La curvatura gravitatoria de la segunda concepción espacial.....	533
III.6.1.3. La ligereza de la tercera concepción espacial.....	535
III.6.1.4. La levedad de la cuarta concepción espacial.....	537
III.6.1.5. La gravedad en la construcción del espacio.....	539
III.6.2. La estructuración lumínica del espacio.....	542
III.6.2.1. La sombra exterior de la primera concepción espacial.....	543
III.6.2.2. La luz interior de la segunda concepción espacial.....	545
III.6.2.3. La luminosidad ligera de la tercera concepción espacial.....	546
III.6.2.4. La abstracción lumínica de la cuarta concepción espacial.....	548
III.6.2.5. La luz en la configuración del espacio.....	549
III.6.3. Hacia la transparencia estructural.....	550
IV. CONCLUSIONES.....	555
IV.0. Introducción.....	559
IV.1. La gravedad y la luz en la teoría de la arquitectura.....	559
IV.2. El conocimiento físico sobre la gravedad y la luz.....	567
IV.3. La estructuración del espacio arquitectónico por la gravedad y la luz.....	573
IV.4. Epílogo.....	583

V. ANEXO. Citas textuales.....	587
V.1. Arquitectura, gravedad y luz.....	591
V.2. La relación estructural entre la gravedad y la luz.....	598
V.3. Sobre la gravedad.....	601
V.4. La importancia de la gravedad en la forma estructural.....	605
V.5. Sobre la luz y el espacio arquitectónico.....	612
V.6. La luz y la forma de la estructura.....	622
V.7. Luz y sombra, percepción y espacialidad.....	631
V.8. La ambigüedad material de la luz.....	634
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	639
IV.1. La gravedad y la luz en la teoría de la arquitectura.....	645
<i>IV.1.1. Juan Navarro Baldeweg.....</i>	645
<i>IV.1.2. Alberto Campo Baeza.....</i>	646
<i>IV.1.3. Bibliografía española destacable sobre la gravedad y la luz en la arquitectura.....</i>	648
<i>IV.1.4. Orígenes del interés arquitectónico por la gravedad y la luz.....</i>	650
<i>IV.1.5. Conocimiento científico e intuición artística.....</i>	651
IV.2. La gravedad y la luz como fenómenos físicos.....	652
<i>IV.2.1. Obras generales.....</i>	
<i>IV.2.2. Los primeros postulados de la antigüedad clásica.....</i>	
<i>IV.2.3. La revolución científica del siglo XVII.....</i>	
<i>IV.2.4. La física moderna de los siglos XIX-XX.....</i>	
IV.3. La gravedad y la luz en la estructuración del espacio.....	657
<i>IV.3.1. Bibliografía genérica.....</i>	657
<i>IV.3.2. La resistencia a la gravedad y la oposición a la luz en la estructuración del espacio exterior.....</i>	659
<i>IV.3.3. El encauzamiento de la gravedad y la interiorización de la luz en la estructuración del espacio interior.....</i>	660
<i>IV.3.4. La victoria de la luz sobre la gravedad en la estructuración del espacio interior exteriorizado</i>	662
<i>IV.3.5. La abstracción de la gravedad y de la luz en la estructuración del espacio interior en continuidad con el exterior.....</i>	663

0.

INTRODUCCIÓN

0. INTRODUCCIÓN

0.1. Prefacio

0.2. Vinculación personal del autor con el tema de investigación

0.3. Finalidad y objetivos

0.4. Estructura de la investigación

0.5. Metodología de estudio

0.1. Preface

All matter in the Universe is subject to the laws of gravity. It is due to the effect of terrestrial gravity that all material bodies on our planet tend to be attracted, inevitably, towards the centre of the Earth. When this tendency finds no obstruction, the phenomenon of free fall occurs; but when for whatever reason the body finds opposition, it reveals its weight. Free-fall and weight are, therefore, the two most evident manifestations of the effects of terrestrial gravity on matter. Insofar as material reality, all constructions must deal with the effects of gravity, with the ultimate goal of bearing its own weight and preventing the falling of the parts that define it. This matter, laid out according to the laws of gravity to form the architectural space is referred to as structure.

Furthermore, the presence of light becomes indispensable to architecture. It reveals the matter that demarcates the space. But its role is not confined only to visually disclosing the form: the quality of the space depends, to a large degree, on the properties of the light that shape it. The architectural character of the space is described by the appropriate relationship established between light and shade, defined by the disposition and nature of the matter that makes up the limits of the space. We discover that, insofar as opaque, the matter that we previously referred to as "structure" has the capacity also to order, by its very presence, the light that configures the space.

Thus, architecture is based on the relation between matter and its absence, which we refer to as space, the character of which depends on the interaction between the grave matter that defines it and the light that reveals it. There isn't a single architectural construction in the world that while creating space has been able to elude the forces of terrestrial gravity, or do without the effects of solar light. On account of this, gravity and light become the two physical realities that, while defining the parameters of our own existence, also become inevitable in architecture.

0.1. Prefacio

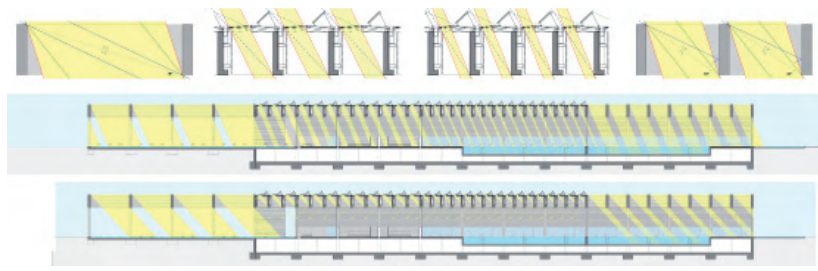
Toda la materia del universo está sometida a las leyes de la *gravedad*. Es por efecto de la gravedad terrestre que los cuerpos materiales de nuestro planeta tienden a dirigirse, ineludiblemente, hacia el centro de la Tierra. Mientras esta tendencia no encuentra oposición alguna se produce el fenómeno de la caída libre, pero cuando ésta se ve impedida por cualquier razón, el cuerpo manifiesta su peso. La caída y el peso son, pues, las dos manifestaciones más evidentes del efecto de la gravedad terrestre sobre la materia. En tanto que realidad material, toda construcción debe hacer frente a los efectos de la gravedad, con el objetivo último de soportar su propio peso y de evitar la caída de las partes que la conforman. A esa materia que, dispuesta de acuerdo a las leyes de la gravedad, conforma el espacio arquitectónico, la denominamos *estructura*.

Por otro lado, la presencia de la *luz* deviene imprescindible en el hecho arquitectónico, en tanto que revela la materia que delimita el espacio. Pero su papel no se limita, únicamente, a informar visualmente de la realidad construida: la cualidad del espacio depende, en gran medida, de las propiedades de la luz que lo configura. El carácter arquitectónico del espacio viene definido por la adecuada relación que se establece entre la luz y la sombra, definida por la disposición y la naturaleza de la materia que compone los límites del propio espacio. Se descubre entonces que, en tanto que opaca, la materia a la que antes hemos llamado 'estructura' posee también la capacidad de ordenar, con su sola presencia, la luz que configura el espacio.

Así pues, la arquitectura se fundamenta en la relación entre la materia y su ausencia, a la que denominamos *espacio*, cuyo carácter depende de la interacción entre la materia grave que lo define y la luz que lo revela. No existe ni una sola obra de arquitectura en el mundo que, en su afán por construir el espacio, haya podido eludir la acción de la gravedad terrestre, o haya podido prescindir de los efectos la luz solar. Así pues, la gravedad y la luz se erigen como dos realidades físicas que, rigiendo los parámetros de nuestra propia existencia, devienen ineludibles en el hecho arquitectónico.

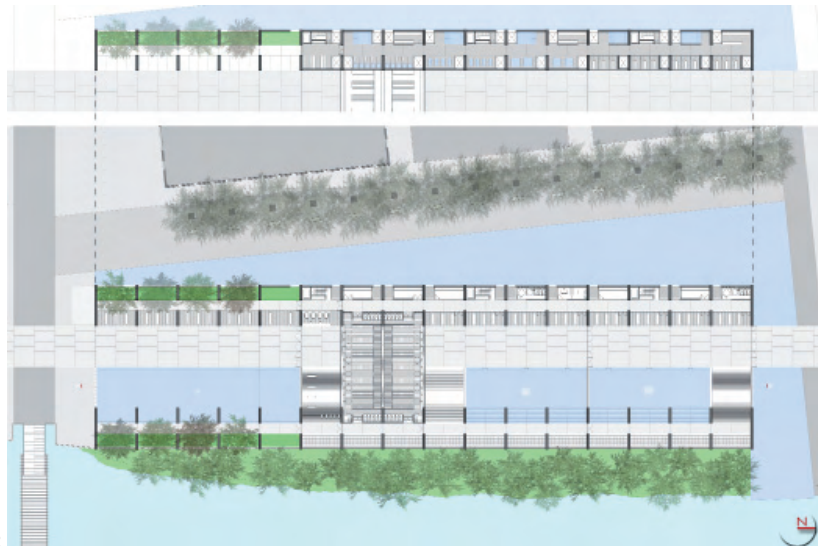
Oscar Linares de la Torre. Building of thermal baths in Budapest (fifth year of Design Studio and Final Project of Architecture, 2007-2008): 10, Honours.

The project is conceived as a concrete structure of 160x40x10 meters that, being pierced by light, constructs space.



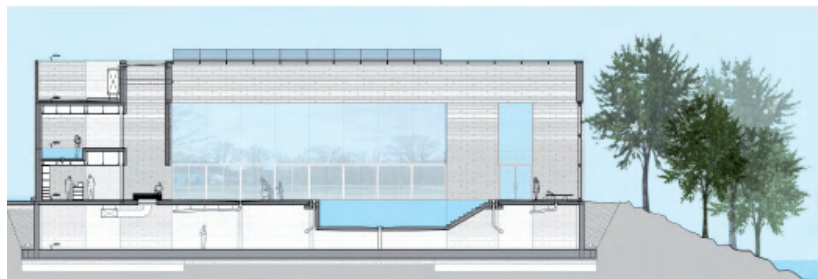
F.01

Longitudinally, the project is organised into three spatial categories: in the central space, the focus of the project, one can find the entrance, the changing rooms and the swimming pools. The West side, inward looking and opaque, not only forms part of the city but it also protects it from the Sun and the views to the services on the ground floor and to the thermal spaces on the first floor. The East facade is a lot more open and transparent, proposing a direct visual contact with nature, constituted here by the canal and the trees on the bank.



F.02

After the observation of the spatial configuration of the Parthenon, in which each space has a different "function" and a different separating column, the project is organised transversely into four big concrete porticos: to each group corresponds a programmatic unit (access, services, interior swimming pool and exterior swimming pool), with different spatial and lighting conditions due to a variable number of intermediate beams (one, two, three or none) that cover the space and construct the roof, at the same time as they determine the quantity and quality of light in each space.



F.03

F.01. Longitudinal sections: light and structure

F.02. Ground floor and first floor

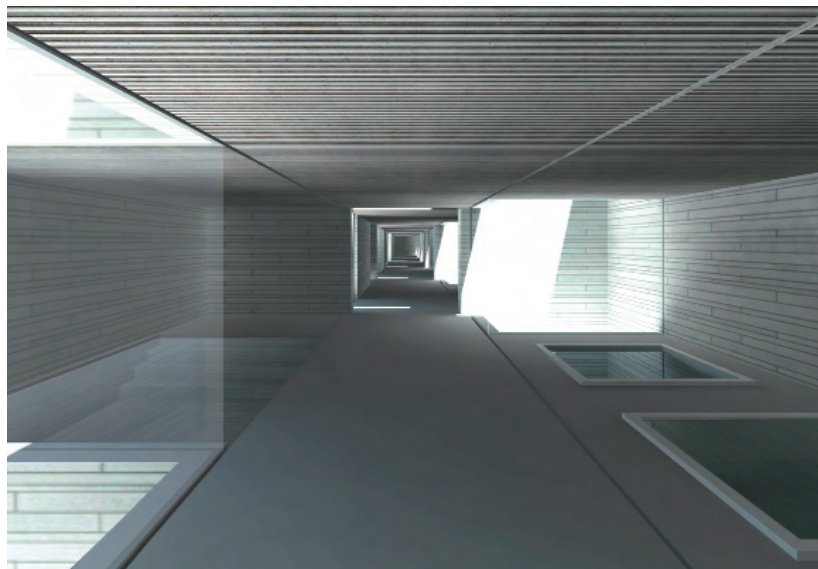
F.03. Transversal section

F.04. Thermal space on the first floor

F.05. Thermal space of the ground floor

F.06. East bay

F.07. Swimming pools with diffuse light



F.04



F.05

Oscar Linares de la Torre. *Edificio de Baños termales en Budapest* (quinto curso de proyectos y proyecto final de carrera, 2007-2008): 10, Matrícula de Honor.

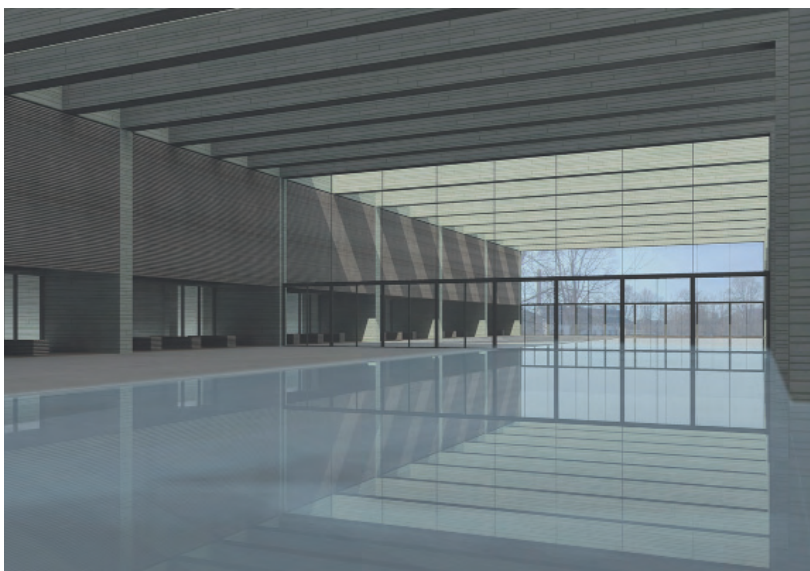
El proyecto es concebido como una estructura de hormigón de 160 x 40 x 10 metros que, siendo atravesada por la luz, construye el espacio.

Longitudinalmente, el proyecto se organiza mediante tres categorías espaciales: en el espacio central, protagonista del proyecto, se encuentran el acceso, los vestuarios y las piscinas. El lado Oeste, introvertido y opaco, al mismo tiempo que construye ciudad, protege del Sol y las vistas a los servicios de la planta baja y a los espacios termales de la planta primera. La fachada Este se muestra mucho más abierta y transparente, proponiendo un contacto visual directo con la naturaleza, constituida aquí por el canal y los árboles de la orilla.



F.06

A partir de la observación de la configuración espacial del Partenón, en el que a cada espacio le corresponde una "función" y un intercolumnio diferentes, el proyecto se organiza transversalmente en cuatro grupos de cuatro grandes pórticos de hormigón: a cada grupo le corresponde una unidad programática (acceso, servicios, piscina interior y piscina exterior), con unas condiciones espaciales y lumínicas diferenciadas gracias a la disposición de un número variable de jácenas intermedias (una, dos, tres o ninguna) que, a la vez que cubren el espacio y construyen la cubierta, determinan la cantidad y la calidad de la luz en cada espacio.



F.07

F.01. Secciones longitudinales: luz y estructura

F.02. Planta baja y planta piso

F.03. Sección transversal

F.04. Espacio termal de la planta piso

F.05. Espacio central en planta baja

F.06. Crujía este

F.07. Piscinas con luz difusa

Unable to modify the origin and physical nature of the properties of gravity and light, the architect is forced to develop different design strategies destined to manipulate the effects of both phenomena on the matter that demarcates the space. The spatial properties of the architectural object depend on the terms in which the matter-structure interaction between gravity and light occurs. However, there are very few situations in which the architect designs a space from a conscious reflection on a special way to structure both phenomena spatially: this verification alone justifies the need and relevance of the doctoral investigation here proposed.

0.2. Personal link of the author with the research topic

During my last year of academic training as an architect in the School of Architecture of Barcelona (Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, ETSAB), as my Final Degree Project I designed a building of thermal baths in Budapest. From my point of view, the interest of the project, as an academic exercise, didn't lie so much in the resolution of a particular functional problem in a specific location, but in the possibility of delving into, with a considerable degree of freedom, the design questions that define the nature of architectural space.

Light acquired a special importance in this project as, in addition to its obvious visual function, it was revealed as a fundamental element in the configuration of space. Although it wasn't necessary to satisfy any specific light requirements, it was evident that the quality and character of the thermal spaces should be defined, essentially, by the effects of light.

Moreover, the programme required the configuration of spaces of different nature and different sizes that didn't demand future flexibility in their compartmentalisation. This afforded the possibility of reflecting on the relation of independence or convergence that could be established between the space and

Ante la imposibilidad de modificar las propiedades de la gravedad y de la luz actuando en el origen y la causa de su naturaleza física, el arquitecto se ve obligado a desarrollar diversas estrategias proyectuales destinadas a manipular los efectos de ambos fenómenos sobre la materia que delimita el espacio. Las propiedades espaciales del objeto arquitectónico dependen de los términos en que se produce la interacción matérico-estructural entre la gravedad y la luz. Sin embargo, son muy pocas las ocasiones en que el arquitecto proyecta el espacio a partir de una reflexión consciente sobre la manera de estructurar espacialmente ambos fenómenos: esta constatación justifica, por sí sola, la necesidad y la pertinencia de la investigación doctoral que aquí se propone.

0.2. Vinculación personal del autor con el tema de investigación

Durante el último año de mi formación como arquitecto en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona desarrollé como proyecto final de carrera un edificio de baños termales en Budapest. Desde mi punto de vista, el interés del proyecto en tanto que ejercicio académico no residía tanto en la resolución de un determinado problema funcional en un enclave concreto, como en la posibilidad de indagar, con un notable grado de libertad, en aquellas cuestiones proyectuales que definen la naturaleza del espacio arquitectónico.

La luz adquiría en este proyecto una importancia especial pues, más allá de su evidente función visual, se revelaba como un elemento fundamental en la configuración del espacio. Aunque no era necesario satisfacer ningún tipo de requisito lumínico concreto, era evidente que la cualidad y el carácter de los espacios termales debía ser definida, esencialmente, por medio de los efectos de la luz.

Por otro lado, el programa requería la conformación de espacios de diversa naturaleza y distinta medida que no precisaban de flexibilidad futura en su compartimentación. Ello brindaba la posibilidad de reflexionar sobre la relación de independencia o confluencia que puede establecerse entre el espacio y la estructura. Dado que ya

the structure. Given that I had already experimented on several occasions with the spatial possibilities of the modern reticular structure, I decided to explore other structural typologies more committed to the configuration of space.

Reading the texts by Louis I. Kahn made me realise the opportunity of articulating design decisions related to space and light through structure. I discovered that, going beyond its unavoidable carrying function, structure has the capacity of defining the physical and visual limits of the space by itself, arranging, through its opacity, the relationship between light and shade that configures the space. As Kahn said, "each space ought to be defined by its structure and by the character of its natural light".

My interest in space, light and structure also led me to study the the writings, proposals and built projects by Juan Navarro Baldeweg and Alberto Campo Baeza, the two architects that in the last decades have lead the reflections on these subjects in Spain. Despite their differences and distinctive features, both architects recognise, in line with the Kahnian precepts, the importance of the structure and the order of light that configures architectural space. Nevertheless, they both introduce the idea of gravity, a concept that barely appears in Kahn's texts, probably because it is implicitly associated with the notion of structure. In the theoretical and design reflections of these two architects, one can identify gravity and light as central elements to architecture, recognising the importance of space and of structure. The study of the works of both architects precedes the current research, and at the same time it becomes its starting point.

The present doctoral thesis, developed in the School of Architecture of Barcelona (Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, ETSAB) has been financed by the Department of Architectural Projects (Departament de Projectes Arquitectònics, DPA) of the UPC-BarcelonaTech(Universtiat

había experimentado en repetidas ocasiones con las posibilidades espaciales de la moderna estructura reticular, decidí explorar otras tipologías estructurales más comprometidas con la conformación del espacio.

La lectura de los textos de Louis I. Kahn me hizo advertir la oportunidad de articular las decisiones proyectuales relativas al espacio y la luz a través de la estructura. Descubrí entonces que, trascendiendo su ineludible función portante, la estructura posee la capacidad de definir los límites físicos y visuales del espacio por sí sola, ordenando por medio de su opacidad la relación entre la luz y la sombra que configura el espacio. Como dijo Kahn, *“cada espacio debe estar definido por su estructura y por el carácter de su luz natural”*.

El interés por el espacio, la luz y la estructura me llevó a estudiar también la obra escrita, proyectada y construida por Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza, los dos arquitectos que, durante las últimas décadas, han liderado la reflexión en torno a estas cuestiones en nuestro país. A pesar de sus diferencias y sus particularidades, ambos arquitectos reconocen, en línea con los preceptos kahnianos, la importancia de la estructura en la ordenación de la luz que configura el espacio arquitectónico. Sin embargo, en ambos casos se introduce la idea de gravedad, un concepto que apenas aparece en los textos de Kahn, seguramente por quedar implícitamente asociado a la noción de estructura. En las reflexiones teóricas y proyectuales de estos dos arquitectos se identifica a la gravedad y a la luz como elementos centrales del hecho arquitectónico, reconociendo el protagonismo del espacio y la importancia de la estructura. El estudio de la obra de ambos arquitectos precede al inicio de la presente investigación y, al mismo tiempo, deviene en punto de partida de la misma.

La presente tesis doctoral, desarrollada en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB) ha sido financiada por el Departament de Projectes Arquitectònics (DPA) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) por medio de la concesión de una *Beca FPU-UPC Recerca*, una ayuda predoctoral de cuatro años de

Politécnica de Catalunya, UPC) by means of the concession of a FPU-UPC Research Grant (Beca FPU-UPC Recerca), a pre-doctoral four year funding, destined to the training of faculty members and for the realisation of doctoral thesis.

During the development of the thesis, there was a six month exchange for research in London as a visiting teacher and researcher in the Department of Spatial Design of the Sir John Cass Faculty of Art, Architecture and Design of the London Metropolitan University. This visit allowed me to have access to original bibliography and to certain works of architecture that have turned out to be essential in the achieving of the outlined objectives.

0.3. Purpose and objectives

The purpose of this doctoral investigation is to elucidate the principles on which the structural interaction between gravity and light for spatial purposes is based upon.

It aims to raise awareness amongst architects that gravity and light are fundamental questions in architecture and that, as such, they require a specific theoretical reflection on which to base design. The spatial structure of the architectural project depends, to a large degree, on the architect's understanding of the phenomena of gravity and light. That being so, although the present research is fundamentally theoretical, it aims to have an eminently practical objective.

In order to fulfil its purpose, the present doctoral thesis has three objectives:

1. The elucidation of the historical origins and fundamental reasons for architectural interest in gravity and light.

Contemporary architectural reflections about the structural interaction between gravity and light with spatial purposes

duración destinada a la formación de profesorado universitario y a la realización de la tesis doctoral.

Durante el desarrollo de la tesis se ha hecho una estancia de investigación de seis meses en Londres como *visiting teacher and researcher* en el Department of Spatial Design de la Sir John Cass Faculty of Art, Architecture and Design de la London Metropolitan University. Esta estancia ha permitido el acceso a bibliografía original y a ciertas obras de arquitectura que han resultado fundamentales en la consecución de los objetivos planteados.

0.3. Finalidad y objetivos

La finalidad de la presente investigación doctoral es esclarecer los principios sobre los que se fundamenta la interacción estructural entre la gravedad y la luz con fines espaciales.

Se pretende concienciar al arquitecto de que la gravedad y la luz son cuestiones fundamentales en el hecho arquitectónico y que, como tales, requieren de una reflexión teórica específica sobre la que fundamentar la práctica proyectual. La estructura espacial del proyecto arquitectónico depende, en gran medida, de la comprensión de los fenómenos de la gravedad y de la luz por parte del arquitecto. Así pues, aunque la presente investigación sea fundamentalmente teórica, pretende tener una finalidad eminentemente práctica.

A fin de lograr su finalidad, la presente tesis doctoral se impone tres objetivos:

1. *El esclarecimiento del origen histórico y de las razones fundamentales del interés arquitectónico por la gravedad y la luz.*

Las reflexiones arquitectónicas contemporáneas sobre la interacción estructural de la gravedad y de la luz con fines espaciales no permiten rastrear el origen del interés de la teoría arquitectónica por ambas cuestiones. Esta circunstancia impide conocer a partir de qué

don't allow for research into the origins of architectural theories on the subject. This situation prevents us from knowing when architecture first showed an interest in these questions and what today's interest is based on. The stated inquiry doesn't intend to draft a precise history of this interest, but to elucidate the constants that have accompanied the architectural reflection on gravity and light throughout history.

2. Delving into the physical nature of gravity and light through the analysis of the historical evolution of the scientific theories that have researched both physical realities together.

Even while recognising the fundamental importance of gravity and light in architecture, architectural theory hasn't seen the need to delve into the nature of both phenomena. From architectural theory it is impossible to answer questions as apparently simple and elemental as: what is gravity? Or, what is light? This is probably due to the fact that gravity and light are so omnipresent in our daily experience of the world in which we live.

This produces a certainly paradoxical situation, in which reflection on the architectural relevance of both questions is developed without any kind of previous conceptual consideration that acts within a theoretical framework. Insofar as architectural theoretical reflection is unable to make up for this absence, it seems appropriate to broaden the scope of study of the current research to other areas of expertise. This invites us to incorporate physical knowledge of gravity and light, developed so thoroughly for so long, into the scope of architecture. The objective is to find in theoretical physics, the answers not found in the theory of architecture.

3. Analysing the design strategies destined to manipulate the structural interaction between gravity and light with spatial purposes architecturally.

Throughout history, architectural space has been conceived

momento de la historia la arquitectura empezó a interesarse por estas cuestiones y sobre qué base se fundamenta el interés que despiertan en la actualidad. Dicha indagación no pretende tanto confeccionar una historiografía precisa sobre este interés, sino esclarecer aquellas constantes que han podido acompañar a la reflexión arquitectónica sobre la gravedad y la luz a lo largo de la historia.

2. Ahondar en la naturaleza física de la gravedad y de la luz por medio del análisis de la evolución histórica de las teorías científicas que han investigado ambas realidades físicas de manera conjunta.

Incluso reconociendo la importancia fundamental de la gravedad y de la luz en el hecho arquitectónico, la teoría arquitectónica no se ha planteado nunca la necesidad de ahondar en la naturaleza de ambos fenómenos. Desde la teoría arquitectónica no es posible responder a preguntas en apariencia tan sencillas y elementales como *¿qué es la gravedad?* o *¿qué es la luz?* Probablemente esta circunstancia se deba a la presencia omnipresente de la gravedad y de la luz en nuestra experiencia cotidiana del mundo en el que vivimos.

Se produce así una situación ciertamente paradójica, en la que la reflexión sobre la relevancia arquitectónica de ambas cuestiones se desarrolla sin que exista ningún tipo de consideración conceptual previa que actúa de marco teórico. En tanto que la reflexión teórica de la arquitectura se demuestra incapaz de subsanar por sí sola esta ausencia, parece pertinente ampliar el ámbito de estudio de la presente investigación a otras áreas del conocimiento. Ello invita a incorporar el conocimiento físico sobre la gravedad y la luz, desarrollado con tanto rigor y durante tanto tiempo, al ámbito de la arquitectura. Se trata, en último término, de encontrar en la física teórica las respuestas no halladas en la teoría de la arquitectura.

3. Analizar las estrategias proyectuales destinadas a manipular arquitectónicamente la interacción estructural entre la gravedad y la luz con fines espaciales.

A lo largo de la historia se han sucedido distintas maneras de concebir

in different ways. In each of these spatial conceptions the structural interaction between gravity and light has been made under specific and distinguished terms. Based on the evolution of the comprehension of physics of gravity and light analysed in the previous section, the intention here is to study the design strategies destined to define space by means of the structural and structured interaction between gravity and light.

0.4. Structure of the research

In connection with the proposed objectives, this research has been divided into three parts. Although each section is related to the other two and it is recommended to read it in the suggested order, it should be noted that each chapter has enough autonomy to be able to be read independently. Through footnotes, the text indicates the moments in which it makes reference to contents of other parts of the thesis, so that the reader can complement the received information and deepen his understanding of the exposed ideas.

First part: Gravity and Light in the Theory of Architecture

In order to make a record of the theoretical context in which this research is inscribed, the first part of the thesis begins with the analysis of the theoretical and design reflections on the structural interaction between gravity and light with spatial purposes by Juan Navarro Baldeweg and Alberto Campo Baeza.

This analysis allows us to draw important conclusions but, as it has already been stated, it doesn't allow for research into the origins of the current interest in both questions. For this reason, this first section searches for reflections related to gravity and light in architectural theory throughout history. To this end it analyses the works of authors as diverse as the Roman treatise writer Marcus Vitruvius, the English physicist

el espacio arquitectónico. En cada una de estas concepciones espaciales la interacción estructural entre la gravedad y la luz se produce en unos términos concretos y diferenciales. En base a la evolución de la comprensión física de la gravedad y de la luz analizada en el apartado anterior, se pretende estudiar aquí aquellas estrategias proyectuales destinadas a conformar el espacio por medio de la interacción estructural y estructurada de la gravedad y la luz.

0.4. Estructura de la investigación

En correspondencia con los objetivos planteados, la presente investigación se ha estructurado en tres partes. Aunque cada una de ellas guarda relación con las otras dos y se recomienda su lectura en el orden propuesto, cabe señalar que cada capítulo posee suficiente autonomía como para posibilitar su lectura independiente. Por medio de notas al margen, el texto señala aquellos momentos en los que se hace referencia a contenidos pertenecientes a otras partes de la tesis, a fin de que el lector pueda complementar la información recibida y profundizar así en la comprensión de las ideas expuestas.

Primera parte: La Gravedad y la Luz en la Teoría de la Arquitectura

A fin de dejar constancia del contexto teórico en el que se inscribe la investigación aquí planteada, la primera parte de la tesis se inicia con el análisis de las reflexiones teóricas y proyectuales sobre la interacción estructural de la gravedad y de la luz con fines espaciales por parte de Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza.

Este análisis permite extraer importantes conclusiones pero, tal como ya se ha expuesto, no permite rastrear el origen del actual interés por ambas cuestiones. Es por ello que en este primer apartado se plantea la búsqueda de reflexiones relacionadas con la gravedad y la luz en la teoría de la arquitectura a lo largo de la historia. A tal efecto se analiza la obra de autores tan diversos

and architect Christopher Wren, or the German philosopher Arthur Schopenhauer. At the same time it has looked into the interest of the avant-garde movements in these questions and the later influence of their theoretical concerns.

Second part: Gravity and Light as Physical Phenomena

As mentioned before, the majority of architectural reflections on gravity and light have been developed without any previous consideration of the nature of both questions. In order to make up for this absence, the second part of the thesis poses the necessity of incorporating the physical knowledge of gravity and light into the theory of architecture. Thereby it proposes the analysis of the theories formulated by the brilliant minds of physicists that have addressed the research of both phenomena. The value of the second part of the research doesn't lie so much in its thoroughness –impossible for its vastness- as in the originality of its approach, since it is hard to find other research works that point out a joint historical evolution of the physical knowledge of gravity and light.

The analysis is divided into three parts. In the first, dedicated to ancient times, the physics of the Greek philosopher Aristotle is analysed, due to his influence as of the XV century. The second part focuses on the scientific revolution in the XVII century, which culminated with Isaac Newton's theories. The last part studies the modern physics of the XIX century, which, in the beginning of the XX century, led to Albert Einstein's revolutionary ideas.

The aim of this analysis is to provide the architect with a concise but precise knowledge of the different physical theories on both physical realities that have taken place throughout history. Only in this way can we have a more accurate and correct reflection on the architectural importance of gravity and light.

como el tratadista romano Marco Vitruvio, el físico y arquitecto inglés Christopher Wren o el filósofo alemán Arthur Schopenhauer. Al mismo tiempo se ha indagado en el interés de los movimientos de vanguardia modernos hacia estas cuestiones y en la influencia posterior de sus inquietudes teóricas.

Segunda parte: La Gravedad y la Luz como Fenómenos Físicos

Tal como se ha apuntado anteriormente, la mayoría de las reflexiones arquitectónicas sobre la gravedad y la luz se desarrollan sin que se produzca ningún tipo de consideración previa sobre la naturaleza de ambas cuestiones. A fin de subsanar esta ausencia, en la segunda parte de la tesis se plantea la necesidad de incorporar el conocimiento físico sobre la gravedad y la luz a la teoría arquitectónica. Para ello se propone el análisis de las teorías formuladas por las mentes más brillantes de la física que han abordado la investigación de ambos fenómenos. El valor de esta segunda parte de la investigación no reside tanto en su exhaustividad -imposible por inabarcable- como en la originalidad de su planteamiento, pues no existen apenas trabajos de investigación que señalen la evolución histórica conjunta del conocimiento físico sobre la gravedad y la luz.

Este análisis se estructura en tres partes. En la primera, dedicada a la antigüedad clásica, se analiza principalmente la física del filósofo griego Aristóteles por la influencia que tuvo a partir del siglo XV. La segunda parte se centra en la revolución científica del siglo XVII, que culmina con las teorías de Isaac Newton. Por último, se estudia la física moderna del siglo XIX que, a principios del XX, da lugar a las revolucionarias ideas de Albert Einstein.

Mediante este análisis se pretende dotar al arquitecto de un conciso pero preciso conocimiento de las distintas teorías físicas sobre ambas realidades físicas que han ido sucediéndose a lo largo del tiempo, pues sólo en él puede apoyarse una reflexión más certera y acertada en torno a la importancia arquitectónica de la gravedad y de la luz.

Third part: Gravity and Light in the Structuring of Space

The third part of the research sets out to study the different design strategies used for the architectural manipulation of the structural interaction between gravity and light with spatial purposes. This analysis incorporates, as a distinctive and entirely original element, the scientific knowledge of both phenomena analysed in the previous section, as it works on the hypothesis that the architectural manipulation of the structural interaction of gravity and light that defines the spatial fact depends on the scientific conceptualisation of the nature and the phenomena of both physical realities.

This study circumvents and is channelled by the analysis of four architectural masterpieces of all time: Stonehenge, the Pantheon in Rome, the Palais des Machines of the Universal Exhibition of Paris in 1889, and the Neue Nationalgalerie in Berlin. Beyond their distinctive features, the specific value of these masterpieces in the current research is to become a paradigmatic example of a specific way of structuring space by means of gravity and light.

Appendix: quotations

The main body of the present doctoral thesis is complemented by a broad annex of quotations, aphorisms and texts from diverse authors –mainly architects- on the structural relationship between gravity and light, which aims to make a record of the main ideas and bibliographical references that have stimulated the development of the research.

Its content has been arranged by topics. In first place, the quotations on the structural relationship between gravity and light in architecture have been exposed. After that, one can find quotations on gravity and light separately, pointing out diverse questions related to both phenomena.

Tercera parte: La Gravedad y la Luz en la Estructuración del Espacio

La tercera parte de la investigación se propone el estudio de las estrategias proyectuales destinadas a la manipulación arquitectónica de la interacción estructural entre la gravedad y la luz con fines espaciales. Este análisis incorpora, como elemento distintivo y totalmente original, el conocimiento científico sobre ambos fenómenos analizado en el apartado anterior, pues se trabaja con la hipótesis de que la manipulación arquitectónica de la interacción estructural de la gravedad y la luz que conforma el hecho espacial, depende de la conceptualización científica de la naturaleza y los fenómenos de ambas realidades físicas.

Este estudio se acota y vehicula a través del análisis de cuatro obras maestras de la arquitectura de todos los tiempos: el Stonehenge, el Pantheon de Roma, el Palais des Machines de la Exposición Universal de París de 1889 y la Neue Nationalgalerie de Berlín. Más allá de sus particularidades concretas, el valor específico de cada una de estas obras en la presente investigación reside en su capacidad de erigirse en ejemplo paradigmático de una determinada manera de estructurar el espacio por medio de la gravedad y de la luz.

Apéndice: citas textuales

El cuerpo central de la presente tesis doctoral se complementa con un nutrido anexo de citas, aforismos y textos de diversos autores -la mayoría arquitectos- sobre la relación estructural entre la gravedad y la luz, que pretende dejar constancia de las principales ideas y referencias bibliográficas que han estimulado el desarrollo la presente investigación.

Su contenido se ha ordenado por temas. En primer lugar se han expuesto las citas sobre la relación estructural entre la gravedad y la luz en la arquitectura. Luego se han apuntado citas sobre la gravedad y la luz por separado, señalando diversas cuestiones relacionadas con ambos fenómenos.

Bibliography

The bibliography reveals, through the selection of titles that define it, the multifaceted and panoramic nature of this research. Each of the three parts of the thesis has been substantiated by different bibliographic references, in accordance with the nature of the studied topic.

The first part reveals a general vision of the outlined publications on gravity and light edited during the last decades in Spain, with special mention of the works of Juan Navarro Baldeweg and Alberto Campo Baeza. It also sets forth the bibliography consulted for the analysis of the historic and conceptual origins of the architectural interest in both phenomena, emphasizing the works by Vitruvius, Wren and Schopenhauer.

The second part shows first, the general bibliography used to build the leading thread of the historical evolution of the knowledge of gravity and light, and then the specific works for each of the analysed periods: the first postulates of classical times, the scientific revolution of the XVII century and the modern physics of the XIX-XX centuries. Consulting these writings has been of great difficulty, not only for their variety of language (Spanish, Catalan, English, French, Italian, and even Latin) but also for their content. As many texts were consulted as specific writing, sometimes referring to translations, sometimes looking up original editions and even manuscripts.

The bulk of the third part is composed of publications on the four architecture masterpieces analysed as paradigms of the different spatial conceptions. Nevertheless, there is also a more general writing mentioned, used to define the theoretical frame on which the study is based.

Bibliografía

La bibliografía expresa, por medio de la variedad de títulos que la conforman, la naturaleza poliédrica y panorámica de la presente investigación. Cada una de las tres partes de las tesis se a nutrido de referencias bibliográficas muy distintas, de acuerdo con la naturaleza del objeto de estudio.

En la primera parte se ofrece una visión general de las publicaciones destacables sobre la gravedad y la luz editadas durante las últimas décadas en nuestro país, haciendo especial mención a la obra de Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza. También se expone la bibliografía consultada para el análisis del origen histórico y conceptual del interés arquitectónico por ambos fenómenos, destacando a tal efecto los escritos de Vitruvio, Wren y Schopenhauer.

En la segunda parte se muestra, en primer lugar, aquella bibliografía de carácter general que ha servido para construir el hilo conductor de la evolución histórica del conocimiento físico sobre la gravedad y la luz. Luego se han especificado aquellas obras relativas a los tres periodos analizados: los primeros postulados de la antigüedad clásica, la revolución científica del siglo XVII y la física moderna de los siglos XIX-XX. La consulta de esta bibliografía ha supuesto una gran dificultad, tanto por su variedad idiomática (castellano, catalán, inglés, francés, italiano e, incluso, latín) como por el contenido expuesto. Se han consultado tanto textos de divulgación como obras más específicas; unas veces se ha recurrido a traducciones comentadas, en otras ocasiones ha sido posible la consulta de ediciones originales e, incluso, manuscritos.

El grueso de la bibliografía de la tercera parte lo componen las publicaciones sobre las cuatro obras arquitectónicas analizadas como paradigmas de las distintas concepciones espaciales. Sin embargo, también se exponen referencias bibliográficas de carácter más general necesarias para definir el marco teórico sobre el que se fundamenta el estudio.

0.5. Study methodology

This research is presented as an eminently theoretical work. Both the analysis of the historical and conceptual origin of the architectural interest in gravity and light developed in the first part, and the study of the historical evolution of the scientific knowledge of both questions carried out in the second part, have hindered the development of a more practical work. In these cases, the textual information has prevailed over the visual, rendering it as a mere token.

The third part of the investigation is something different. The analysis of the four masterpieces chosen as paradigms of the different spatial conceptions that have taken place throughout history has allowed a more design-orientated study, where images such as photographs and drawings take on a more relevant importance.

The reader will find a large amount of footnotes throughout the research. These annotations are used to make references to other parts of the thesis alluded in the main text, to put into context or clarify secondary questions contained in the main body of the research, to indicate certain bibliographical references, and to textually reproduce bibliographic quotes designed to illustrate certain ideas set forth by the author. The excessive amount of quotes doesn't respond to anything more than the author's will to acknowledge the original concepts of the ideas exposed in the present research, so as to ease research and consulting the sources for future researchers.

First part: Gravity and Light in the Theory of Architecture

The study of the design and written reflections by Juan Navarro Baldeweg and Alberto Campo Baeza is made independently. However, the same methodology is used in both cases: first looking into their interest for gravity and light through the

0.5. Metodología de estudio

La presente investigación se presenta como un trabajo eminentemente teórico. Tanto el análisis del origen histórico y conceptual del interés arquitectónico por la gravedad y la luz desarrollado en la primera parte, como el estudio de la evolución histórica del conocimiento científico sobre ambas cuestiones realizado en la segunda, han hecho muy difícil el desarrollo de un trabajo de carácter más práctico. En estos casos, la información textual se ha impuesto al contenido visual, cuya presencia se ha visto reducida prácticamente a lo testimonial.

Caso distinto se demuestra en la tercera parte de la investigación. El análisis de las cuatro obras elegidas como paradigma de las distintas concepciones espaciales que han ido sucediendo a lo largo de la historia sí ha hecho posible el desarrollo de un estudio de carácter más proyectual, donde la imagen fotográfica y el dibujo han tenido una importancia analítica mucho más relevante.

El lector encontrará una gran cantidad de notas al margen a lo largo de toda la investigación. Estas anotaciones sirven para hacer referencia a otras partes de la tesis aludidas en el texto principal, para matizar o aclarar determinadas cuestiones secundarias contenidas en el cuerpo central de la investigación, para señalar determinadas referencias bibliográficas y para reproducir textualmente citas bibliográficas destinadas a ilustrar determinadas ideas expuestas por el autor. La sobreabundancia de notas no responde a nada más que a la voluntad del autor de dejar constancia del origen conceptual de las ideas expuestas en la presente investigación, a fin de facilitar su rastreo y consulta por parte de futuros investigadores.

Primera parte: La Gravedad y la Luz en la Teoría de la Arquitectura

El estudio de las reflexiones proyectuales y escritas de Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza se hace de manera independiente. No obstante, en ambos casos se sigue la misma metodología:

analysis of their own texts; then, by analysing the plans and photographs of their projects to expose the design strategies developed so as to manipulate gravity and light architecturally.

The lack of references that allow deeper research into the origins and reasons for their interest in gravity and light encourages analysing texts from earlier periods. As already stated, the research goes back to the works of Vitruvius, Wren, Schopenhauer, and in a more general way, the manifestations of the European avant-garde movements. Whenever possible, the original texts have been looked up; when, for idiomatic reasons this wasn't possible, translations to Spanish have been consulted.

The brevity required in this first part of the research has thwarted giving a deeper contextualisation of the specifics of the works by the previously mentioned authors, focusing the study of their works to those aspects that refer directly to gravity and light.

Second part: Gravity and Light as Physical Phenomena

As mentioned before, the second part of the thesis is destined to the analysis of the joint historic evolution of the scientific knowledge on the nature and phenomena of gravity and light. So as to achieve the conciseness of the explanation, the analysis has been limited to those theories formulated by the most important physicists of the three great periods of physics: ancient times, the scientific revolution of the XVII century, and the modern physics of the XIX and XX centuries.

The brevity required has obliged me to omit the explanations of the general beliefs of each author, and the detailed description of the more indirect theoretical questions related to gravity and light. In order to ease understanding, the analysis of the theories of gravity and light have been addressed independently for each author, indicating at all

primero se ahonda en su interés por la gravedad y la luz a través del análisis de sus propios textos; luego, a través del análisis de la información planimétrica y fotográfica de sus proyectos, se exponen las estrategias proyectuales desarrolladas a fin de manipular arquitectónicamente la gravedad y la luz.

La ausencia de referencias que permitan ahondar en el origen y la causa del interés de ambos arquitectos por la gravedad y la luz, induce al análisis de textos procedentes de épocas anteriores. Tal como ya se ha expuesto, se procede al análisis de los escritos de Vitruvio, Wren, Schopenhauer y, de un modo más general, los manifiestos de las vanguardias modernas europeas. En aquellos casos en que ha sido posible, se ha recurrido directamente a los textos originales; cuando, por razones idiomáticas, ello no ha sido posible, se han consultado las traducciones al castellano.

La brevedad exigida a esta primera parte de la investigación ha obligado a renunciar a una más profunda contextualización de las especificidades de la obra de los autores antes citados, centrando y focalizando el estudio de su obra únicamente en aquellos aspectos que se refieren a la gravedad y a la luz de un modo directo.

Segunda parte: La Gravedad y la Luz como Fenómenos Físicos

Tal como se ha expuesto anteriormente, la segunda parte de la tesis se destina al análisis de la evolución histórica conjunta del conocimiento científico sobre la naturaleza y los fenómenos de la gravedad y de la luz. A fin de garantizar la concisión de la exposición, el análisis se ha limitado a aquellas teorías formuladas por los físicos más importantes de los tres grandes periodos de la física: la antigüedad clásica, la revolución científica del siglo XVII y la física moderna de los siglos XIX y XX.

La brevedad requerida ha obligado a renunciar tanto a la explicación general del pensamiento de cada autor, como a la descripción detallada de aquellas cuestiones teóricas relacionadas con la

times the common points between both phenomena.

The analysis of the physical theories exposed has been carried out by consulting the original texts of the authors; when this wasn't possible, translations or more general works have been used.

Third part: Gravity and Light in the Structuring of Space

The research laid out in this last part has been structured into four sections that correspond to the four spatial conceptions that have taken place throughout history. This study circumvents and is channelled by the analysis of four architecture masterpieces of all times, that become true paradigms of the different ways of conceiving the spatial-structural relationship between gravity and light: the Stonehenge, the Pantheon in Rome, the Palais des Machines of the Universal Exhibition of Paris in 1889, and the Neue Nationalgalerie in Berlin.

The analysis begins with a concise presentation of the historical and design aspects that defines the masterpiece. It then proceeds to the independent analysis of those questions related to gravity and light, to finish by delving into the aspects that concern both phenomena jointly. Although the character of the analysis is distinctly theoretical, the exposed ideas on the spatial-structural relationship between gravity and light have been illustrated by a large amount of graphic documentation –in the form of images and drawings–, developed by the author or compiled from the consulted bibliography.

gravedad y la luz de un modo demasiado indirecto. A fin de facilitar su comprensión, se ha abordado el análisis de las teorías sobre la gravedad y la luz de manera independiente por cada autor, señalando en todo momento los puntos de contacto entre ambos fenómenos.

El análisis de las teorías físicas expuestas se ha desarrollado consultando los textos originales de sus autores; cuando ello no ha sido posible, se han consultado traducciones comentadas o se ha recurrido a obras de carácter más general.

Tercera parte: La Gravedad y la Luz en la Estructuración del Espacio

La investigación planteada en esta última parte se ha estructurado en cuatro apartados, que se corresponden con las cuatro concepciones espaciales que se han sucedido a lo largo de la historia. Este estudio se acota y vehicula a través del análisis de cuatro obras maestras de la arquitectura de todos los tiempos, que se erigen en verdaderos paradigmas de las distintas maneras de concebir la relación espacio-estructural entre la gravedad y la luz: el Stonehenge, el Pantheon de Roma, el Palais des Machines de la Exposición Universal de París de 1889 y la Neue Nationalgalerie de Berlín.

El análisis se inicia con una brevísima presentación de los aspectos históricos y proyectuales que caracterizan a la obra en cuestión. A continuación se procede al análisis independiente de aquellas cuestiones vinculadas a la gravedad y a la luz, para terminar ahondando en aquellos aspectos que conciernen a ambos fenómenos de manera conjunta. Aunque el carácter de dicho análisis es marcadamente teórico, las ideas expuestas sobre la relación espacio-estructural entre la gravedad y la luz han sido ilustradas por medio de una gran cantidad de documentación gráfica -en forma de imágenes y dibujos-, elaborada por el propio autor o recopilada de las fuentes bibliográficas consultadas.

1.

I. LA GRAVEDAD Y LA LUZ EN LA TEORÍA DE LA ARQUITECTURA

I.1. Introducción.....	035
I.2. Investigaciones anteriores.....	037
I.2.1. Juan Navarro Baldeweg.....	038
I.2.1.1. La manifestación de la luz y de la gravedad como objeto del arte.....	038
I.2.1.1.1. Piezas de luz.....	040
I.2.1.1.2. Piezas de gravedad.....	042
I.2.1.1.3. Piezas de luz y gravedad.....	044
I.2.1.2. Arquitectura, luz y gravedad.....	045
I.2.1.3. La estructura arquitectónica, entre la gravedad y la luz.....	050
I.2.1.3.1. Estratificación vertical de lo pesado y lo ligero.....	051
I.2.1.3.2. "Piezas de luz": cúpulas ingravidas.....	055
I.2.1.3.3. "Figuras de luz en su totalidad": vigas-lucernario unidireccionales.....	060
I.2.1.3.4. Núcleos masivos envueltos por ligeras tramas de luz.....	066
I.2.2. Alberto Campo Baeza.....	068
I.2.2.1. Arquitectura, espacio y luz.....	068
I.2.2.2. La tectónica de la luz y la estereotomía de la gravedad.....	071
I.2.2.2.1. Kenneth Frampton: estructura, tectónica y estereotomía.....	071
I.2.2.2.2. Bötticher y Semper: estructuralismo y espacialidad archi-Tectónica.....	072
I.2.2.2.3. Campo Baeza: luz tectónica y gravedad estereotómica.....	074
I.2.2.3. Gravedad estructural y luz estructurada.....	076
I.2.2.3.1. La revelación de la estructura.....	077
I.2.2.3.2. El belvedere tectónico sobre el podio estereotómico.....	080
I.2.2.3.3. La masa estructural estereotómica atravesada por la luz.....	086
I.2.2.3.4. La tectónica de la trama estructural translúcida.....	088
I.2.2.4. Arquitectura, física y Newton.....	092
I.2.3. Navarro Baldeweg y Campo Baeza: luz y gravedad.....	092
I.3. Orígenes del interés arquitectónico por la gravedad y la luz.....	095
I.3.1. Marco Vitruvio: gnomónica y mecánica.....	095
I.3.1.1. Las tres partes de la arquitectura.....	097
I.3.2. Christopher Wren: óptica y estática.....	098
I.3.2.1. Wren, arquitecto: la belleza de la luz y la estática estructural.....	100
I.3.3. Arthur Schopenhauer: luz y gravedad.....	103
I.3.3.1. La arquitectura como manifestación de la luz y de la gravedad.....	105
I.3.4. Luz y gravedad en la arquitectura moderna: entre la física relativista y el arte de vanguardia.....	109
I.4. La reflexión arquitectónica sobre la gravedad y la luz.....	112

I.1. INTRODUCCIÓN

Esta primera parte de la presente tesis doctoral se ha dedicado al análisis de las reflexiones precedentes sobre la importancia arquitectónica de la gravedad y de la luz. La finalidad de tal estudio es, por un lado, conocer las reflexiones que ya se han realizado con anterioridad sobre el tema objeto de estudio para no reincidir en cuestiones previamente planteadas y, por otro lado, extraer importantes conclusiones que ayuden a orientar y sentar las bases de la investigación aquí planteada.

En primer lugar se ha optado por analizar las investigaciones arquitectónicas sobre la gravedad y la luz más cercanas en el espacio y en el tiempo. Éstas corresponden a los arquitectos Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza, dos arquitectos que, con enfoques teóricos diversos y mediante exploraciones formales distintas, han reflexionado con más profundidad sobre estas cuestiones dentro y fuera de nuestras fronteras durante las últimas décadas.

Es necesario, también, ahondar en el origen del interés arquitectónico por la gravedad y por la luz a fin de contextualizar su aparición y conocer, así, los motivos que pudieron inducir al interés explícito por ambos fenómenos físicos desde el ámbito propio de la arquitectura. Es por ello que se ha abordado el análisis de destacados autores de periodos históricos anteriores, como Marco Vitruvio, Christopher Wren y Arthur Schopenhauer.

Además de su importancia genealógica o historiográfica, este análisis ha de permitir identificar las especificidades de las investigaciones precedentes centradas en la relación arquitectónica entre la luz y la gravedad, así como sus aportaciones específicas y sus posibles carencias. Solamente de esta manera es posible diseñar una estrategia de investigación a desarrollar por la presente tesis doctoral que, reconociendo las aportaciones anteriores, suponga un avance significativo en el tema objeto de estudio.

Se inicia así una investigación interdisciplinar donde, además de las reflexiones desarrolladas desde el ámbito de la teoría arquitectónica, tienen cabida también las aportaciones realizadas desde la filosofía y, sobretodo, la ciencia.

I.2. INVESTIGACIONES ANTERIORES

El interés arquitectónico por la gravedad y por la luz es un fenómeno relativamente nuevo en nuestro país, pues no existe constancia alguna de ninguna investigación previa a la década de los años setenta en torno a estas importantes cuestiones.

Con toda probabilidad, la primera persona en introducir en España el interés sobre los temas referentes a la gravedad y a la luz fue el arquitecto Juan Navarro Baldeweg quien, durante su estancia como investigador en Massachusetts a principios de los años setenta, desarrolla una especial sensibilidad en torno a ambas cuestiones que, de vuelta a España, sigue explorando a través de su obra artística y arquitectónica. Inestimable es también la aportación del arquitecto Alberto Campo Baeza quien, a partir de su estancia como profesor en Zúrich a finales de los años ochenta, incorpora a su arquitectura escrita, proyectada y construida, una honda reflexión sobre la importancia de la luz y la gravedad.

Cada uno con enfoques teóricos diversos y mediante exploraciones formales distintas, ambos arquitectos han contribuido al nacimiento de un creciente interés teórico y proyectual por la gravedad y la luz dentro y fuera de nuestras fronteras. Gracias a su labor, durante los últimos años se han multiplicado las investigaciones centradas en la reflexión sobre la importancia arquitectónica de la gravedad o de la luz. De hecho, es en este contexto en el que cabe situar la presente tesis doctoral.

La finalidad de este apartado es exponer y presentar, de la manera más breve y concisa posible, las más importantes aportaciones teóricas y proyectuales en torno a la gravedad y la luz desarrolladas por ambos arquitectos en su ejercicio profesional, docente e investigador. Cabe aclarar, no obstante, que la vastedad y la complejidad del conjunto de sus respectivas trayectorias impiden desarrollar aquí un análisis pormenorizado de su arquitectura que, de bien seguro, daría lugar a la realización de varias tesis doctorales. Se pretende, más bien, dejar constancia de su aportación concreta al tema objeto de estudio de la presente tesis doctoral, detectando al mismo tiempo ciertas constantes en sus trabajos que ayuden a orientar la investigación aquí planteada.



F.01. Juan Navarro Baldeweg (1939-)

01. Cabe destacar a arquitectos de la talla de Christopher Alexander (arquitecto y matemático), Ernesto Nathan Rogers, Max Bill (también pintor y escultor), Marcel Breuer, Pier Luigi Nervi (arquitecto e ingeniero), Alison & Peter Smithson o Le Corbusier (también pintor). También son importantes las aportaciones del ingeniero Richard Buckminster Fuller o del historiador Siegfried Giedion.

02. Especialmente importante fue la serie *Vision and Value*, editada por Kepes entre 1965 y 1966 compuesta por: *Education of vision* (New York: George Braziller, 1965), *Structure in art and in science* (London: Studio Vista, 1965), *The nature and art of motion* (New York: George Braziller, 1965), *Module, proportion, symmetry, rhythm* (New York: George Braziller, 1966), *Sign, image and symbol* (London: Studio Vista, 1966) y *The Man-made object* (1966). Para más detalles ver bibliografía.

03. Lazlo Moholy Naghy fue un importante artista y profesor de la Bauhaus. Igual que sus contemporáneos Theo Van Doesburg o El Lissitzky, se interesó especialmente en la implementación de los conceptos de la física relativista al ámbito del arte.

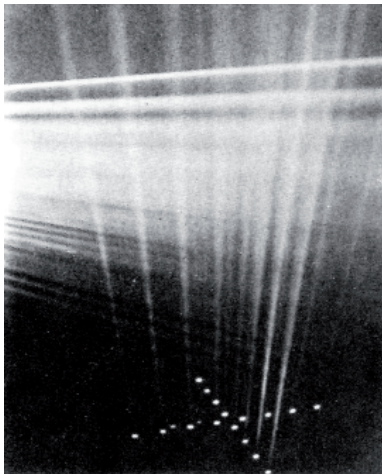
04. "Estaban allí algunos de los artistas vinculados a Gyorgy Kepes y a lo que se llamaba *The New Landscape*, que procuraba una visión del universo físico a través de los medios instrumentales de la ciencia y la tecnología. Allí sí que se daba cierta relación entre la actividad artística y la ciencia". NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante. Girona: Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya*, 1999, p.123. Conversación entre Juan Navarro Baldeweg y Luis Rojo Castro, 1995.

I.2.1. JUAN NAVARRO BALDEWEG

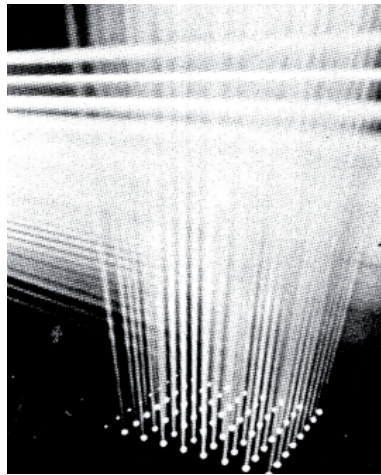
Juan Navarro Baldeweg (1939-) muestra un enorme interés por las artes y la arquitectura ya desde muy joven. En 1951, con tan sólo doce años, se inicia en el mundo de la pintura y en 1959 ingresa en Escuela de Bellas Artes de San Fernando de Madrid para cursar los estudios de grabado. No obstante, en 1960 inicia los estudios de arquitectura en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid donde, sin abandonar su pasión por la pintura, obtiene el título de Arquitecto en 1965 y el de Doctor Arquitecto cuatro años más tarde. En 1970 obtiene una beca de la Fundación Juan March para incorporarse al *Center for Advanced Visual Studies* del *Massachusetts Institute of Technology* (M.I.T.) por un periodo de cuatro años (1971-1975) como investigador invitado por Gyorgy Kepes (1906-2001).

I.2.1.1. La manifestación de la luz y de la gravedad como objeto del arte

Gyorgy Kepes fue un artista y diseñador de origen húngaro que desde 1937 impartió docencia en los Estados Unidos, primero como responsable del departamento *Light and Color* del *Institute of Design in Chicago* (1937-1947), y luego como director del *Center for Advanced Visual Studies* de la *School of Architecture and Planning* del *Massachusetts Institute of Technology* (1946-1974). Durante este dilatado periodo publicó varias monografías, editadas e introducidas por él mismo, en las que biólogos, diseñadores, historiadores del arte, científicos, pintores, ingenieros, filósofos, urbanistas, físicos y arquitectos⁰¹ desarrollaron temas tan diversos como el movimiento, la estructura, o la visión, siempre desde enfoques relacionados con las artes visuales y las ciencias naturales⁰². Tanto en su labor docente como en su propio trabajo profesional, Kepes se interesó especialmente por la expresión artística de las fuerzas fundamentales de la naturaleza estudiadas por los científicos, como la luz, la gravedad o el magnetismo. Siguiendo la estela de su maestro Laszlo Moholy-Nagy⁰³ (1895-1946) Kepes abordó, mediante la pintura, la fotografía o la instalación, la experiencia de esas fuerzas naturales con una actitud interdisciplinar e integradora, en un intento de interrelacionar ámbitos de conocimiento aparentemente tan distintos y distantes como la expresión artística o el conocimiento científico⁰⁴.



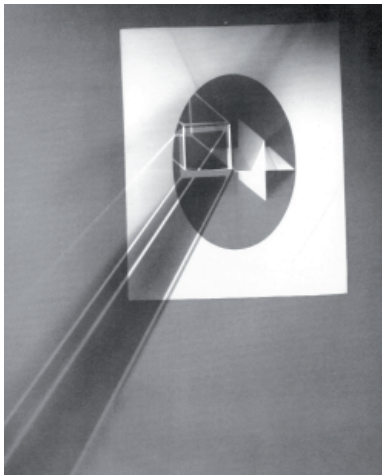
F.02



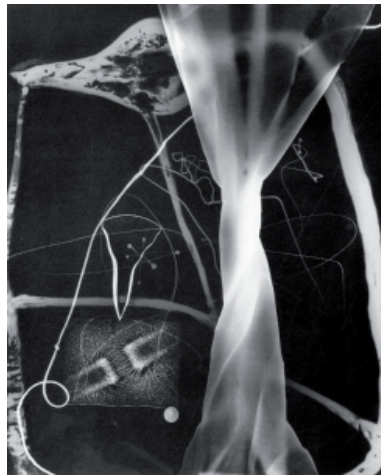
F.03

Tanto en su labor docente como en su trabajo artístico, el objetivo de Kepes es manifestar la existencia de ciertas fuerzas naturales a través de la expresión de sus fenómenos:

F.02-03. Gyorgy Kepes. *Arquitectura de luz simulada para el puerto de Boston* (1966): "Fuentes de luz flotando sobre cables programados para crear transformación del espacio". KEPES, Gyorgy (ed). *El Arte del ambiente*. Buenos Aires: Víctor Lerú, 1978, p.143 (Edición original: KEPES, Gyorgy (ed). *Arts of Environment*. New York: George Braziller, 1972).



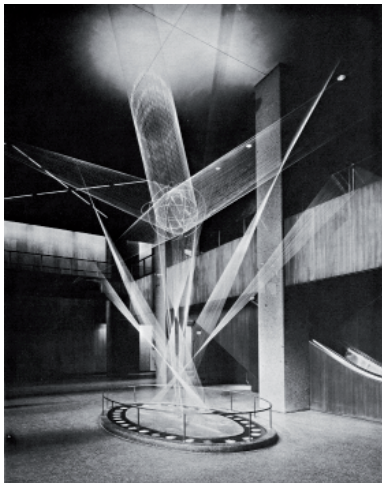
F.04



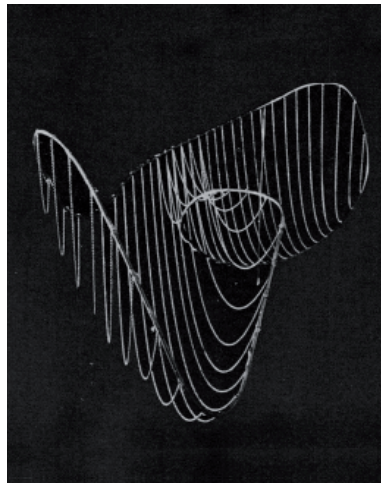
F.05

F.04. Gyorgy Kepes. *Geometría Transparente* (1978). KEPES, Gyorgy. Gyorgy Kepes: *Light Graphics: May 31-July 8, 1984*. New York: International Center of Photography, 1984, p. 33

F.05. Gyorgy Kepes. *Campo Magnético* (1938). KEPES, Gyorgy. Gyorgy Kepes: *Light Graphics: May 31-July 8, 1984*. New York: International Center of Photography, 1984, p. 19



F.06

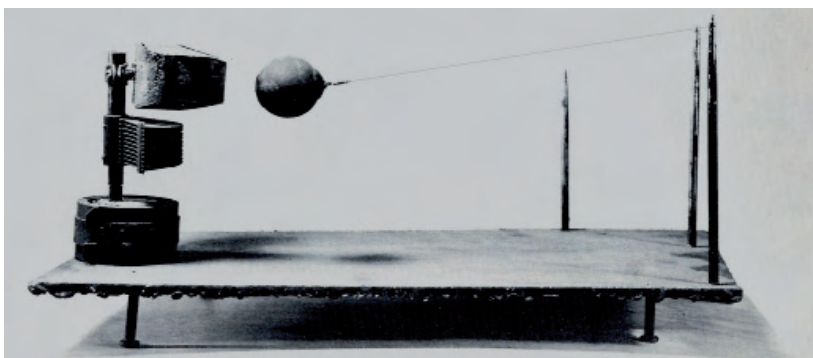


F.07

En sus libros Kepes muestra también obras de otros artistas con intereses afines:

F.06. Richard Lippold. *Flight* (1963). Pan-Am Building, New York. KEPES, Gyorgy (ed). *Structure in Art and in Science*. London: Studio Vista, 1965, p. 152. Manifestación de la presencia de la luz mediante hilos que se convierten en rayos lumínicos que evocan la sensación de livianidad.

F.07. Frei Otto and collaborating team members (J. Koch, C. Hertling, G. Minke, H. Habermann, G. Reuer, B. Romberg). *Structure study: Chains in curved frame*. KEPES, Gyorgy (ed). *Structure in Art and in Science*. London: Studio Vista, 1965, p. 7. Curvatura de un sistema de cadenas debida a la acción de la atracción gravitatoria.



F.08

F.08. Takis. *Tele-Magnetic Sculpture* (1960). Iolas Gallery, New York. KEPES, Gyorgy (ed). *The Nature and Art of Motion*. New York: George Braziller, 1965. Suspensión de un cuerpo en el aire que desobedece a las leyes de la gravedad por efecto de la atracción magnética.

05. William J.R. Curtis: "Entonces, para usted, una de las 'funciones' de una obra de arte es realzar la experiencia y revelar esas fuerzas de la naturaleza (la gravedad, la luz) de manera que puedan conmovernos". *Juan Navarro Baldeweg*: "Sí. Yo creo que eso es de lo que trata siempre el arte". *NAVARRO BALDEWEG, Juan*: Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías. *Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p.8*. Una conversación con Juan Navarro Baldeweg. William J. R. Curtis.

06. "Goethe, un autor hacia el que siente gran admiración Navarro Baldeweg, en su *Teoría de la naturaleza* y otros lugares nos depara una atractiva visión poética de la misma, ofertada como alternativa a la concepción maquinista y más extendida de Newton. Precisamente, como ponen de manifiesto las obras de Navarro Baldeweg, me atrevo a sugerir que entre Newton y Goethe anda el juego": *Simón Marchán Fiz. NAVARRO BALDEWEG, Juan*: Juan Navarro Baldeweg: arquitectura, piezas y pintura. Fundación Marcelino Botín, Santander, junio/julio 1997. *Santander: Fundación Marcelino Botín, 1997, pp. 7-8*

07. "Kepes fue el creador y director hasta el año 1974 del Center for Advanced Visual Studies en el MIT, lugar al que fui invitado al poco tiempo de terminar mis estudios en la Escuela de Arquitectura de Madrid. Allí tuve ocasión de elaborar, gracias a su tutela y a la libertad de iniciativas concedida a los artistas invitados, lo que considero ahora el fundamento de mi trabajo en todas sus vertientes. No creo que mi obra se haya alejado de aquellas raíces y de las líneas de investigación entonces emprendidas. Y esto se cumple, como he señalado, especialmente en las obras generadas en el medio de la escultura, la instalación o la pieza". *NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed)*: Una caja de resonancia. *Valencia: Pre-textos, 2007, p. 116*. La región flotante, 2002.

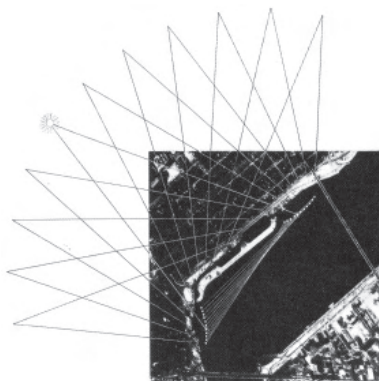
08. "De esa pieza elemental de luz [la luna de aceite] emergen, por ejemplo, las cajas de luz y, de éstas, toda la serie de estructuras pensadas para conformar figuras de la infiltración de la luz cenital en el espacio que dio pie, en años posteriores, a los modelos de figuras de luz en la luz y a mi arquitectura, en la que la luz es protagonista". *NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed)*: Una caja de resonancia. *Valencia: Pre-textos, 2007, p. 140*. La región flotante, 2002.

A partir de este planteamiento, Juan Navarro empieza a percibir el mundo físico como un entramado de energías y fuerzas elementales, como la luz o la gravedad, cuyos fenómenos debe manifestar la obra de arte con la finalidad de emocionar y conmover al espectador⁰⁵. Con esta idea y bajo la tutela de Kepes, Baldeweg desarrolla en el M.I.T. una serie de piezas e instalaciones de carácter reflexivo y conceptual cuya principal finalidad es, precisamente, servir de *caja de resonancia* de los efectos de la luz y de la gravedad a través de la expresión artística de sus fenómenos. El trabajo de Juan Navarro Baldeweg se sitúa entonces a medio camino entre la comprensión científica y la intuición artística⁰⁶, una posición que no abandonará ya en toda su obra artística y arquitectónica posterior⁰⁷.

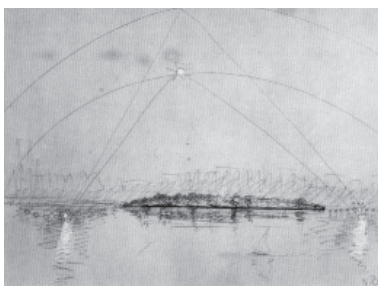
1.2.1.1.1. Piezas de luz

A instancias de Kepes, Baldeweg proyecta en 1972 un *Reloj de sol sobre el Charles River*, cerca del M.I.T. El proyecto prevé la disposición de unas boyas flotantes sobre el agua en las que se disponen unas terminaciones de fibra óptica que se encienden y se apagan de acuerdo con el movimiento de los rayos de luz solar a lo largo del día. Sin embargo, algunos problemas técnicos hacen inviable su construcción. Este hecho induce a Baldeweg a deshacerse de las sofisticaciones tecnológicas y, en 1973, concibe una sencilla *pieza de luz* basada en una simple mancha de aceite sobre una tela que flota en su estudio, gracias a la cual es capaz de captar y manifestar la luz ambiental de la habitación en un punto concreto del espacio a lo largo del tiempo.

La experiencia de la activación de la luz por la gota de aceite da lugar a la creación de una serie de sencillas piezas de luz⁰⁸, como *Fuente y fuga* -también llamada *Pieza de sombra en forma de libro*- (1973) o *Cinco unidades de luz* (1974), en las que se expresan fenómenos lumínicos tan básicos como la sombra arrojada, el reflejo, la transparencia o el color. Se forja así un interés explícito por la luz que estará presente en todas las vertientes de su obra posterior.

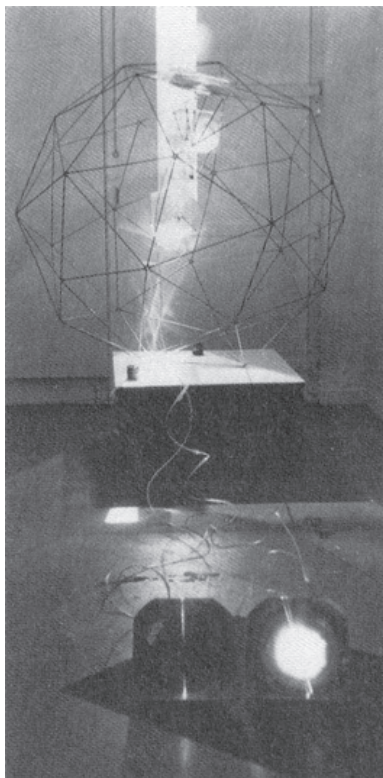


F.09

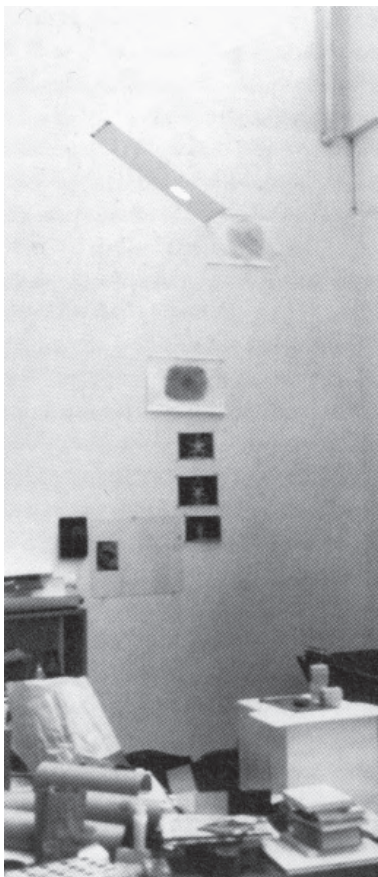


F.10

Durante su estancia en el M.I.T. Navarro Baldeweg ensaya distintas maneras de manifestar artísticamente los fenómenos asociados con la presencia de la luz, como el paso del tiempo, la captación y transmisión de la luz, el reflejo, la transparencia o el color:



F.11



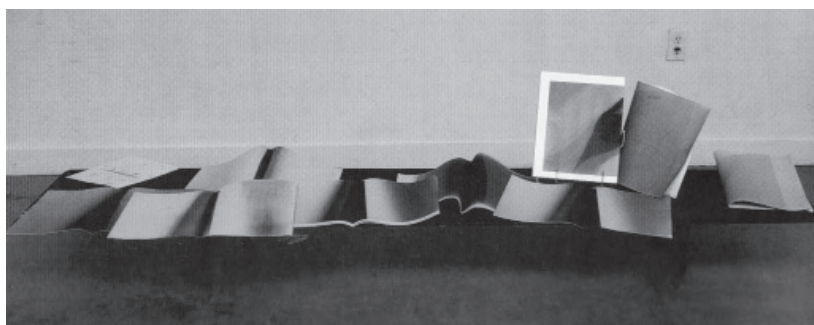
F.12

F.09-10. Juan Navarro Baldeweg. *Reloj de Sol sobre el Charles River* (1972). NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): *Una caja de resonancia*. Valencia: Pre-textos, 2007, p. 141

F.11. Juan Navarro Baldeweg. *Reloj de Sol sobre el Charles River* (1972): boya geodésica flotante con terminaciones de fibra óptica. NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): *Una caja de resonancia*. Valencia: Pre-textos, 2007, p. 142

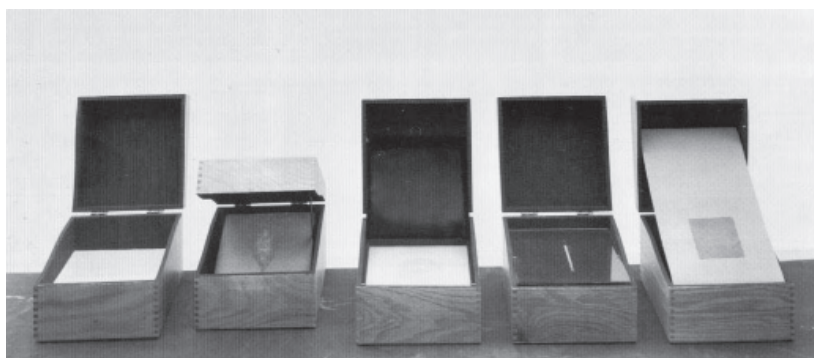
F.12. Juan Navarro Baldeweg. *Luna, pieza de luz* (1973). NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): *Una caja de resonancia*. Valencia: Pre-textos, 2007, p. 143

Para una descripción detallada del propio autor de la propuesta para el Charles River y de la sencilla pieza de luz de su estudio en el M.I.T., ver *La región flotante*, en NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): *Una caja de resonancia*. Valencia: Pre-textos, 2007, pp. 140-144



F.13

F.13. Juan Navarro Baldeweg. *Fuente y fuga: pieza de sombra en forma de libro* (1973). BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg. *IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 74



F.14

F.14. Juan Navarro Baldeweg. *Cinco unidades de luz* (1974). BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg. *IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 88. Para una descripción detallada del propio autor de esta pieza ver *La caja de resonancia*, en NAVARRO BALDEWEG, Juan: Navarro

Baldeweg. Madrid: Tanais, 2001, p. 13

09. "La columna y el peso fue una de las primeras y más sencillas obras que realicé como instalación. La motivación de hacer una pieza así proviene de la arquitectura, nace de cuestionar la expresividad en el arte de construir. (...) Esa disposición conjunta de ambos elementos deviene mecanismo para la adjetivación de la columna. Selecciona la vía de la interpretación de sus cualidades por medio de algo que hace la columna: la columna es portadora del peso estructural del edificio. El poder del pequeño peso junto a ella absorbe las miradas vagas o distraídas y fija una dirección de interpretación, un sentido. Entonces nos olvidamos de si la columna es de sección circular o de si es un elemento que refleja las características formales del lenguaje arquitectónico clásico o de si está hecha de un material determinado. El pequeño peso hace hablar a la columna y nos dice: soporto el peso. (...) Hay una fuente energética, la fuerza de la gravedad y un objeto en el que se realiza o efectúa su acción permanente, un camino que se recorre a su través. La columna es como un sumidero del peso, una línea de fuga de la fuerza actuante". NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): Una caja de resonancia. Valencia: Pre-textos, 2007, p. 22. El horizonte en la mano, 2003.

10. En El mundo como voluntad y representación, Arthur Schopenhauer advierte que, sobre un mismo cuerpo, se suceden en el tiempo y en el espacio distintos fenómenos. En el caso concreto de la arquitectura apunta que es precisamente la voluntad de evitar la caída de los elementos que la conforman lo que obliga a soportar su peso (ver apartado I-3.3.1. La arquitectura como manifestación de la luz y de la gravedad). Por otra parte, es precisamente la percatación de que mientras caemos no sentimos el peso lo que da a Albert Einstein las primeras pistas para describir la gravedad en su Teoría de la relatividad general (ver apartado II-4.2. Albert Einstein: gravedad, geometría y espacio).

11. "Son construcciones equilibradas que sorprenden, que alertan sobre su equilibrio e invitan a cuestionar su fundamento estable. Muchas de estas piezas ponen en cuestión la diferencia entre una apariencia inestable y una realidad estructural interna que se encuentra inevitablemente en equilibrio". NAVARRO BALDEWEG, Juan; Navarro Baldeweg. Madrid: Tanais, 2001, p. 16. La caja de resonancia, 2002.

1.2.1.1.2. Piezas de gravedad

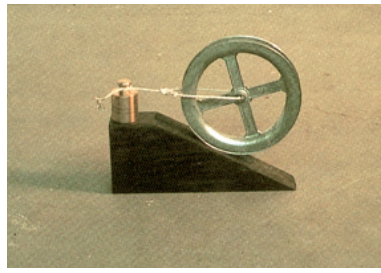
En el M.I.T. también ahonda Juan Navarro en la manifestación artística de los fenómenos de la gravedad. La primera de sus *piezas de gravedad* es *La columna y el peso* (1973), una sencilla instalación que debe su razón de ser a la noción de "peso" en el sentido más amplio del término, pues alude tanto a la acepción de "objeto" como a la de "cualidad". La colocación de un pequeño peso -objeto- al lado de una potente columna del vestíbulo del M.I.T. induce al espectador a percatarse de que la columna, más allá de sus atributos materiales, formales o estilísticos, es un elemento arquitectónico-estructural que, como tal, soporta peso -cualidad-. Con esta sencilla operación se hace posible reconocer la existencia de la omnipresente fuerza de la gravedad a través de su manifestación más elemental, el peso⁰⁹.

Es significativo que en esta primera reflexión sobre la gravedad Navarro Baldeweg utilice, de manera explícita, un elemento arquitectónico estructural como es la columna, cuya principal función es, precisamente, portar y soportar el peso de la construcción. Sin embargo, las *piezas de gravedad* realizadas con posterioridad se presentan como reflexiones de carácter más conceptual que evitan, en la mayoría de los casos, cualquier referencia explícita a la arquitectura. Desde el ámbito de la escultura y la instalación, Navarro Baldeweg concibe una larga serie de piezas en las que explora nociones estrechamente vinculadas a la gravedad, como son el peso, el movimiento, la verticalidad o el equilibrio.

En *La rueda y el peso* (1973/1993) una rueda ve frenada su tendencia natural a caer por un plano inclinado al encontrarse atada a un pequeño peso situado en la parte superior de la pendiente. Se pone de manifiesto así el hecho de que el peso y la tendencia al movimiento en caída libre de los cuerpos, los fenómenos más evidentes de la acción de la gravedad terrestre sobre la materia, se excluyen mutuamente: un cuerpo no puede pesar y caer al mismo tiempo¹⁰. Y es precisamente la negación de un fenómeno gravitatorio por otro lo que pone de manifiesto la continua acción de la gravedad sobre la materia.

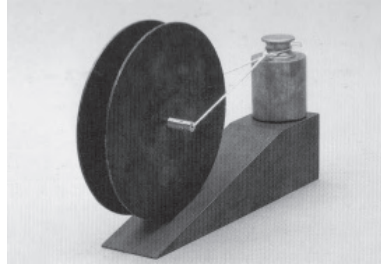


F.15



F.16

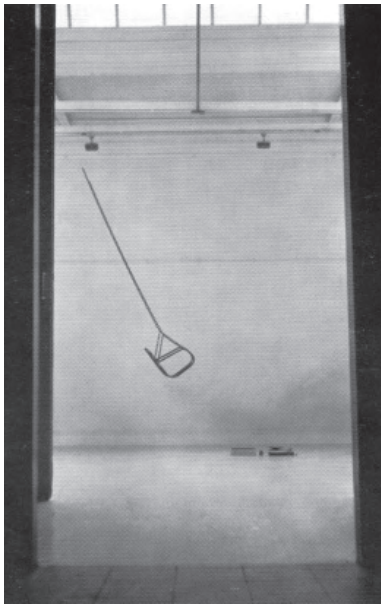
En el M.I.T. Navarro Baldeweg explora los fenómenos de la gravedad a partir de sencillas instalaciones que dan lugar a una serie llamada piezas de gravedad o piezas de equilibrio. El autor desarrolla estas piezas durante décadas, trabajando con los fenómenos gravitatorios más elementales, como el peso, la caída, la vertical o el equilibrio estático:



F.17

F.15. Juan Navarro Baldeweg. *La columna y el peso* (1973). NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: Museo Español de Arte contemporáneo: Madrid, 11 de abril - 31 de mayo de 1986*. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes, 1986, p. 32

F.16. Juan Navarro Baldeweg. *La rueda y el peso* (1973). NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p.16



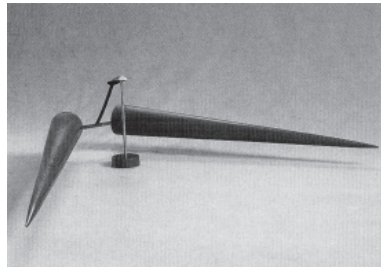
F.18



F.19

F.17. Juan Navarro Baldeweg. *La rueda y el peso* (edición de 1993). BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg. IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 86

F.18. Juan Navarro Baldeweg. *Luz y metales (Sala Vinçon, Barcelona): el columpio* (1976). BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg. IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 73



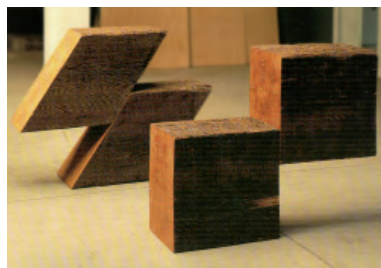
F.20

F.19. Juan Navarro Baldeweg. *Dos pesos* (1973-1999). BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg. IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 86

F.20. Juan Navarro Baldeweg. *Conos en madera de cerezo* (1973-1999). BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg. IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p.86

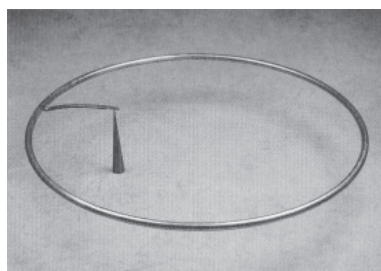


F.23



F.21

F.21. Juan Navarro Baldeweg. *Prismas* (1999). BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg. IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 65



F.22

F.22. Juan Navarro Baldeweg. *Aro dorado* (1973-1999). BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg. IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 87

F.23. Juan Navarro Baldeweg. *Aro patinado en oro* (1999). NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): *Una caja de resonancia*. Valencia: Pre-textos, 2007, p. 4

12. "¿Por qué los niños se divierten en un columpio? Porque son conscientes de que en ese momento se encuentran en un mundo gobernado exclusivamente por las fuerzas de la gravedad, y eso produce una emoción, una satisfacción y una diversión enormes". NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): La habitación vacante. Girona: Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, 1999, p. 131. Conversación entre Juan Navarro Baldeweg y Luis Rojo Castro, 1995. "La pieza del columpio en la instalación muestra un efecto de suspensión en el espacio y en el tiempo. Su pose desafiante a la gravedad nos engaña y, a la vez, como un eco, suscita por contraste la comprobación de un sentimiento de peso en nuestro propio cuerpo". NAVARRO BALDEWEG, Juan: Navarro Baldeweg. Madrid: Tanais, 2001, p. 16. La caja de resonancia, 2002.

13. "El punto de suspensión de este aro está situado a un lado de su eje central perpendicular y, por tanto, nos parece estar contemplando una figura desplomada. Sin embargo, su comportamiento estable contradice lo que uno espera de ese cuelgue equívoco. Desobedece las expectativas dictadas por las leyes de la física. No hay allí tal engaño ya que ese aro tiene un peso interior que desplaza su centro de gravedad y ocurre que lo ordinario parece extraordinario. Nos sorprende y, al hacerlo, experimentamos vívidamente la región donde rige la *dura lex* de la gravedad. A la vez, el aro, al igual que el columpio, se levanta y gira dominado por una fuerza contraria atribuible a la luz que desde lo alto se infiltra en la habitación". NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): Una caja de resonancia. Valencia: Pre-textos, 2007, p. 120. La región flotante, 2002.

14. "La gravedad se siente cuando se crea la ilusión de la ingravidez y a la inversa". Juan Navarro Baldeweg: "Entrevista a Juan Navarro", *Arquitecturas* (Madrid), núm. 247 (1988). Citado en ARNUNCIANO PASTOR, Juan Carlos: Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 129

"Puedes, mediante un contraste, hacer que aparezca la masividad de algo o, al contrario, crear la ilusión de que no existe masa pesante. (...) Al hacer mis piezas iba advirtiendo que, tanto si se potencia el valor de una variable como si se disminuye, se produce una consciencia en el espectador, alertado, excitado por esa combinación. La pieza, entonces, te conduce a donde se pretendía: al descubrimiento de que estás sumergido en esa energía que en ella se manifiesta de la manera más sencilla. Reconoces esa fuerza general. O la vuelves a conocer: estaba ahí y ahora la adviertes sintiéndote, en efecto, inmerso en ella". NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): Una caja de resonancia. Valencia: Pre-textos, 2007, p.177. Conversación de Juan Navarro Baldeweg con Juan José Lahuerta, 2000.

La rueda y el peso inaugura una serie de *piezas de equilibrio*, nombre que reciben las *piezas de gravedad* de Juan Navarro que muestran situaciones aparentemente inverosímiles que, aún poseyendo una clara lógica interna, parecen contradecir o incluso negar las leyes de la gravedad ¹¹. Algunas *piezas de equilibrio*, como *Los conos* o *El aro dorado*, llevan al límite la verosimilitud del equilibrio estático gravitatorio al disponer, de manera simétrica y equiponderada, las partes que las conforman sobre un único punto de apoyo. Otras piezas, como *Dos pesos* o *Prismas*, están formadas por un cuerpo apoyado en el suelo en el que se adosan otros, en contacto tangente o puntual respecto al primero, que mantienen una posición de equilibrio gravitatorio visualmente inverosímil. Otras piezas, como *El columpio* ¹² (1976) o *El aro patinado en oro* ¹³ (1999), desafían tanto la verticalidad de los cuerpos suspendidos en reposo, como el movimiento previo a la quietud estática de los cuerpos sometidos a la acción de la gravedad terrestre, manteniendo una posición gravitatoriamente increíble.

El objetivo de todas estas *piezas de gravedad y de equilibrio*, cuya factura se prolonga durante varias décadas después de su estancia en el M.I.T., no es anular la gravedad o aludir a la ingravidez, sino señalar la omnipresencia de los fenómenos de la gravitación que, precisamente por cotidiana, a veces parece pasar desapercibida. Para ello, Juan Navarro utiliza dos estrategias: o enfatizar y maximizar los efectos de la gravedad sobre la materia o, por el contrario, imaginar situaciones a medio camino entre la inverosimilitud y la posibilidad, en las que la gravedad parece estar ausente. Ya sea enfatizando sus fenómenos, negándolos, o transfigurándolos, el artista consigue evidenciar y recordar, de esta manera, la omnipresencia de la fuerza de la gravedad en nuestro entorno físico ¹⁴.

1.2.1.1.3. Piezas de luz y gravedad

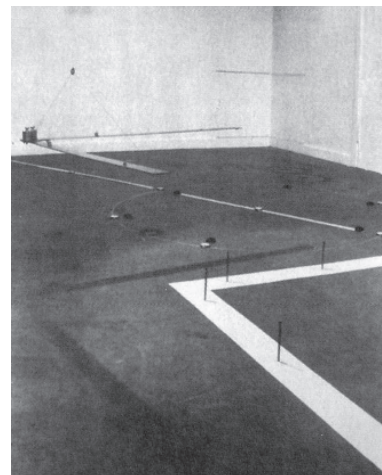
A pesar de haber expuesto aquí las *piezas de luz y de gravedad* por separado, cabe señalar que, desde un primer momento, Juan Navarro explora ambas realidades de manera conjunta,

tal como se manifiesta en su serie *Interiores* desarrollada entre 1972 y 1976. De hecho, durante toda su trayectoria Navarro Baldeweg se centra, cada vez con más claridad e intención, en la exploración de la contraposición ontológica entre los fenómenos de la luz y la gravedad.

Aunque las primeras exploraciones en torno a la luz y la gravedad que tuvieron lugar en el M.I.T. fueron realizadas en el ámbito de la escultura y la instalación, Juan Navarro Baldeweg ha desarrollado su trabajo también en el ámbito de la pintura y en el de la arquitectura. En la investigación de un determinado tema en torno a la gravedad o a la luz se produce siempre en Navarro Baldeweg un trasvase constante entre las distintas disciplinas por él dominadas que induce al desarrollo de *series* o *constelaciones*¹⁵ que ahondan en un mismo tema de estudio desde distintos medios de expresión. Esto no supone, en ningún caso, que ninguna de las disciplinas pierda su autonomía y su valor particular, o que ninguna ostente un posición preeminente por encima de las otras. No obstante, no cabe duda de que la pintura, la escultura o la instalación admiten una mayor libertad que la arquitectura a la hora de indagar en los temas de investigación planteados¹⁶.

I.2.1.2. Arquitectura, luz y gravedad

Juan Navarro realiza sus primeras incursiones en el ámbito profesional de la arquitectura siendo aún estudiante, en colaboración con Ramón Vázquez Molezún (1964-1965) y Alejandro de la Sota (1965-1966). No obstante, al margen de estas breves experiencias, en sus biografías no se recoge ningún tipo de actividad arquitectónica proyectual durante la década siguiente, en la que parece centrarse en la realización de la tesis doctoral (1965-1969), en el desarrollo de sus investigaciones en el M.I.T. (1971-1975) y en la obtención de la Cátedra de Elementos de Composición en la Escuela Técnica Superior de Madrid (1977). Sin embargo, la experiencia del M.I.T. no cae en saco roto y aflora ya en sus primeras tentativas arquitectónicas.



F.24. Juan Navarro Baldeweg. *Interior II. Instalación de piezas de luz, magnetismo y gravedad* (1973). NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: Museo Español de Arte contemporáneo: Madrid, 11 de abril - 31 de mayo de 1986*. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes, 1986, p. 37. Para una descripción de la instalación por el propio autor, ver NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): *Una caja de resonancia*. Valencia: Pre-textos, 2007, p. 139. La región flotante, 2002.

15. "Llamo 'constelaciones' al conjunto de obras en distintos medios expresivos en los que hay un mismo tema. En la escultura, en la arquitectura o en la pintura puede haber un mismo tema; algo tan aparentemente alejado de la pintura como es la gravitación aparece en algunos cuadros en los que hay vertidos de pintura". NAVARRO BALDEWEG, Juan; ZUAZNABAR, Guillermo (ed): *Juan Navarro Baldeweg: conversaciones con estudiantes*. Barcelona: Gustavo Gili, 2011, p. 23

16. "Para mí es imposible distinguir dónde empieza la arquitectura de dónde termina el arte, y al revés, dónde termina la arquitectura y dónde empieza el arte. De hecho, la arquitectura me ha inspirado muchas veces los temas de la pintura, incluso de las piezas o esculturas, y viceversa. No obstante, sí que puedo afirmar que para mí las artes y la práctica de las artes son la investigación, o mi taller de investigación como arquitecto. La práctica del arte es una investigación perenne y constante que me aporta ideas para desarrollar la arquitectura" NAVARRO BALDEWEG, Juan; ZUAZNABAR, Guillermo (ed): *Juan Navarro Baldeweg: conversaciones con estudiantes*. Barcelona: Gustavo Gili, 2011, p. 23

A la hora de afrontar sus primeros proyectos, Juan Navarro Baldeweg considera que, igual que la obra de arte, la obra de arquitectura también tiene la función de producir en las personas emociones derivadas de la pura contemplación de los fenómenos de la luz y de la gravedad en la materia construida.

Para Juan Navarro *“la luz es uno de los aspectos clave de la arquitectura de todos los tiempos, sobre todo de la arquitectura más ambiciosa. Como creador de objetos traspasados por algunos de los atributos que me parece que están en la base de la arquitectura, pues sí, he hecho investigaciones para crear, para formalizar la luz como sustancia de la arquitectura. Pero creo que su interés radica en el hecho de que es un elemento vital, una energía necesaria en la vida de los hombres, tan necesaria como el aire. Y nuestra capacidad de manejar, manipular, controlar y ordenar la forma en que la luz penetra en el espacio, en la materia esponjosa que es la arquitectura, es esencial”*¹⁷. Aun considerando la luz como una energía, la presencia física de la luz en la obra arquitectónica es tal que Juan Navarro la considera como un material constructivo más¹⁸.

En lo que se refiere a la gravedad, opina que *“la arquitectura favorece y estimula una consciencia de nuestra sujeción al campo gravitacional. Hay ocasiones que, en ella, la materia parecerá flotar y, otras, en las que se refuerzan signos de una materialidad opresiva y pesante. Señales de lo grávido o lo ingrávido aparecen en muy diversas modalidades y propósitos formales en cualquier arquitectura. Son señales que hacen referencia al peso de la materia de manera que, por un efecto empático, el sujeto percibe su inmersión en el mismo campo gravitacional. Reactivan en el usuario, en el espectador, una apreciación íntima de la necesaria tensión muscular que responde a la permanente sujeción inexorable de la gravedad”*¹⁹.

Es a partir de la consideración de la luz y de la gravedad como energías a través de las cuales se vinculan los cuerpos entre sí²⁰, que Navarro Baldeweg concibe la arquitectura como una *intervención en un campo de energías*²¹, una idea que se nutre, sin duda, de la terminología y los conceptos propios del ámbito de la física.

17. ESPAÑOL, Joaquín (ed): Invitación a la arquitectura: diálogos con Oriol Bohigas, Juan Navarro Baldeweg, Oscar Tusquets, Albert Viaplana y Peter G. Rowe. Cinco reflexiones sobre la arquitectura que nos rodea. *Barcelona: RBA, 2002, p. 59*

18. “La arquitectura es luz y sombra, pero me gusta separar ambos fenómenos y pensar en la luz de un modo positivo, como una substancia que se conduce y se canaliza: como una substancia que, en definitiva, llega a experimentarse igual que cualquier otro material constructivo”. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): La habitación vacante. *Girona: Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, 1999, p. 47. Gran interior amarillo, 1993.*

19. NAVARRO BALDEWEG, Juan: Navarro Baldeweg. *Madrid: Tanais, 2001, p.15. La caja de resonancia, 2002.*

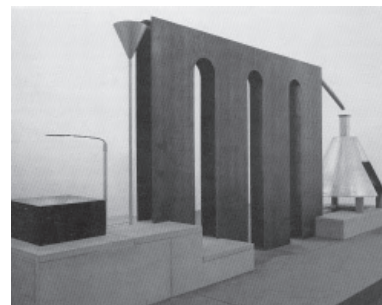
20. “Las cosas se vinculan entre sí (y nosotros a ellas) por algo tan difícilmente abarcable como la gravedad o la luz”. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): La habitación vacante, (2ª Ed). *Pre-textos de arquitectura, Girona, 2001, p. 37. La geometría complementaria, 1992.*

21. “La arquitectura como una intervención en un campo de energías: me gusta esta formulación. Como dije al comienzo, mi arquitectura se basa en investigaciones sobre fenómenos que nos ponen en relación con el mundo natural”. NAVARRO BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías. *Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 21. Una conversación con Juan Navarro Baldeweg. William J. R. Curtis.*

Quizá como consecuencia de las tempranas experiencias artísticas sobre el *Charles River* durante su estancia en el M.I.T., en sus primeras tentativas arquitectónicas Navarro Baldeweg presta una especial atención a la relación fenoménica que se establece entre la luz y la gravedad a través del agua. Así, a finales de la década de los setenta y principios de los ochenta, el arquitecto aprende a utilizar el líquido elemento para activar, al unísono, los efectos de la luz y los fenómenos de la gravedad. A partir de entonces el agua ha estado presente, de una manera u otra, en buena parte de sus proyectos y obras: intervenciones en molinos existentes, actuaciones en los cursos y márgenes de ríos y canales, propuestas en torno a planos de agua naturales o proyectados, etc²².

En tanto que materia, el agua se ve sometida a las leyes de la gravedad: en reposo se dispone siempre de manera equiponderada y forma en su superficie un plano idealmente horizontal mientras que, en movimiento, tiende a caer o deslizarse hacia abajo. En relación a la luz, el agua destaca por su transparencia aunque, en determinadas situaciones, puede manifestar también otros efectos: en reposo parte de los rayos que inciden sobre la superficie del agua se reflejan creando una imagen virtual de la realidad exterior, mientras que las gotas de agua en movimiento tienen la capacidad de activar la luz por sí mismas mediante brillos y destellos. Teniendo en cuenta estas cuestiones, la manera que tiene Navarro Baldeweg de trabajar con la luz y la gravedad a través del agua depende de si ésta se encuentra en reposo o en movimiento. Según el estado del líquido elemento, se activarán unos efectos lumínico-gravitatorios u otros y las consecuencias arquitectónicas serán también distintas.

En la instalación *Hidráulica doméstica* para la Trienal de Milán (1985) Navarro Baldeweg explora la conducción del agua en movimiento. Para ello hace referencia explícita tanto al acueducto, cuyo funcionamiento se basa únicamente en el control de la pendiente de los canales, como a la cañería de sección reducida, en la que por efecto de la presión el agua puede moverse hacia arriba en contra de las leyes de la gravedad²³. Estas exploraciones se encuentran presentes ya en los estudios previos y las maquetas de la primera



F.25. Juan Navarro Baldeweg. *Hidráulica doméstica*. Trienal de Milán (1985). LAHUERTA, Juan José; GONZÁLEZ GARCÍA, Ángel: *Juan Navarro Baldeweg: obras y proyectos*. Madrid: Electa, 1993, p. 90

22. Ver MERCÉ HOSPITAL, José María: *La arquitectura en el ciclo natural del agua*. Madrid: Mairena, 1999. *Publicación de la tesis doctoral MERCÉ HOSPITAL, José María; NAVARRO BALDEWEG, Juan (dir.): La arquitectura en el ciclo natural del agua (Tesis Doctoral)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 1987.

23. *La canalización del agua en movimiento fue una cuestión que, casualmente, interesó también a Arthur Schopenhauer en sus reflexiones sobre la gravedad (ver apartado I-3.3.1. La arquitectura como manifestación de la luz y de la gravedad). Por otro lado, no deben sorprender las alusiones de Baldeweg a los acueductos, pues fueron precisamente los romanos, descubridores del concepto de "gravedad" como tal (ver apartado II-2.3. Plutarco: la gravitas romana) los que realizaron en la antigüedad las más vastas obras de canalización hidráulica, así como las más sofisticadas instalaciones de agua en sus edificios (ver apartado III-3.4. El espacio estructurado por la curvatura de la gravedad).*

24. "A diferencia de la luz, que los objetos obstruyen y cortan, la lluvia se ciñe a la casa: la envuelve, la rodea al discurrir por su superficie y adquiere vida en los brillos de las salpicaduras. Las líneas de lluvia se abren en dos, se distribuyen como por la raya de un peinado. La silueta de la casa se amplía por arriba con la caída de esas líneas de lluvia y por los lados, al envolverla como adornos. El cuerpo de la casa se afina, se hace más tenue, concentrándose en la máscara de su cubierta, en las paredes y en los cristales mojados, en el flujo de los canalones, en las curvas del agua que salta desde las gárgolas. Y la casa se prolonga en el halo. Un halo tan grande como la región de la lluvia. La desmesura del canalón actúa también aquí como una poderosa palanca. El centro de la figura se ha desplazado. La casa abre sus límites se incorpora este halo, se invierte hacia la región de la lluvia, en cuya búsqueda sale". NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): La habitación vacante. Girona: Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, 1999, pp. 32-33. Movimiento ante el ojo, movimiento del ojo, 1981.

25. "La luz trae evocaciones del agua lejana y limpia. El agua es luminosa. La luz es acuosa. El agua refleja la luz. La luz inunda. El agua y la luz exaltan su reciprocidad. No se puede beber a oscuras. ¿Se bebe la luz? La luz te empapa". MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís: El libro de los cuartos. Madrid: Lampreave, 2011, p. 219. Ver también La luz es como el agua, en GARCÍA MÁRQUEZ, Gabriel: Doce cuentos peregrinos. Barcelona: Círculo de Lectores, 1993:

26. "El arte del agua de los siglos XVI, XVII y XVIII consiste siempre, como también ocurre con el arte de los espejos de esas mismas épocas, en juegos de luz". SEDLMAYR, Hans: La luz en sus manifestaciones artísticas. Madrid: Lampreave, 2012, p. 20

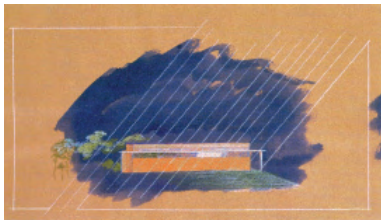
27. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): La habitación vacante. Girona: Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, 1999, p. 22. Movimiento ante el ojo, movimiento del ojo, 1981. Sobre los efectos de la simetría estructural entre suelo y techo ver el apartado III.5.3.2. La planeidad como abstracción de la forma de cubrición.

28. Narcisos, 1981: "Una de las series más importantes de cuantas ha pintado Juan Navarro Baldeweg. El precedente hay que buscarlo en Canal, cuyas casas había contemplado Patricio Bulnes como 'diferentes Narcisos reclinados ante su encarnación distorsionada en el estanque'. Si 'la arquitectura se mira a sí misma', como le dirá Juan Navarro Baldeweg a María Teresa Muñoz en el nº 1 de Periferia, 1985, también en pintura se plantea este motivo del agua como espejo y reflexión, motivo que a través del asunto mitológico de Narciso viene ocupando desde hace siglos a pintores y poetas". NAVARRO BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg: Museo Español de Arte contemporáneo: Madrid, 11 de abril - 31 de mayo de 1986. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes, 1986, p. 51

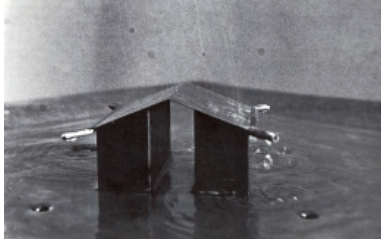
obra construida por Juan Navarro Baldeweg, la *Casa de la lluvia en Liérganes*, Santander (1978-1981), cuyo nombre hace referencia a la atención que el arquitecto presta a este fenómeno. El agua de la lluvia cae por efecto de la gravedad y, al tocar la casa, se ciñe a su forma y discurre por ella. Es entonces cuando se recoge y canaliza mediante un sistema de canalones y bajantes exentos expresamente exagerado²⁴. En su movimiento, las gotas de lluvia activan la luz mediante destellos y brillos, estableciéndose de esta manera una relación metafórica entre la luz y el agua²⁵ que Juan Navarro desarrollará también en sus pinturas.

También por acción de la gravedad, el agua en reposo forma una superficie horizontal plana en la que la luz se ve reflejada. Se crea así una imagen virtual de la realidad en la que se invierte la relación arriba-abajo²⁶. Mientras que la construcción revela en su forma la polaridad vertical debida al efecto de la gravedad sobre la materia, en la imagen virtual los rasgos formales de la arquitectura derivados de la atracción gravitatoria se invierten y pierden sentido. El reflejo produce una simetría entre el arriba y el abajo en la que la gravedad física parece ceder terreno a la ingravidez virtual: "La simetría crea la ilusión de una vibración en el espacio. Con lo cual reprime la figura: la supedita al encarnar su poder más abstracto. Los objetos pierden inercia, pierden peso y cuerpo, se ven arrastrados por las aplicaciones congruentes del espacio sobre el espacio. Los elementos físicos aparecen duplicados, reflejándose, multiplicándose en estados correlativos o translaciones, vaivenes, rotaciones, giros, hélices. La vista sigue esos movimientos, encontrándose y reencontrándose con lo que ya conoce y espera. Es el momento de la comprobación y de la conjetura, de la esperanza y de la satisfacción de la esperanza"²⁷.

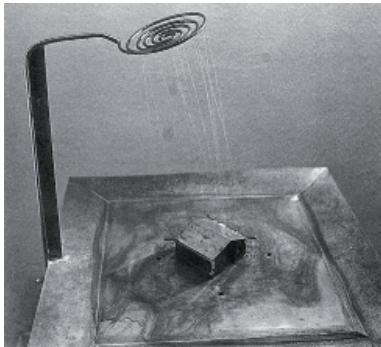
Navarro Baldeweg explora estas cuestiones a través de la realización de maquetas que se encuentran a medio camino entre la pieza y el proyecto arquitectónico, pero también mediante la pintura²⁸ o la reflexión escrita. Como consecuencia directa de estas reflexiones en distintos ámbitos, puede observarse que buena parte de los proyectos arquitectónicos de Navarro Baldeweg se vertebran o apoyan, de alguna forma, en torno a un plano de agua. Mención



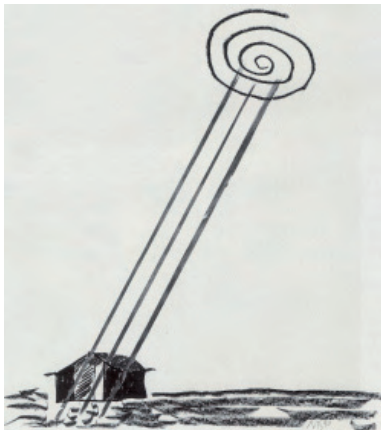
F.26



F.27



F.28



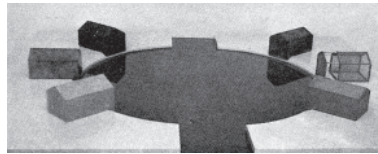
F.29



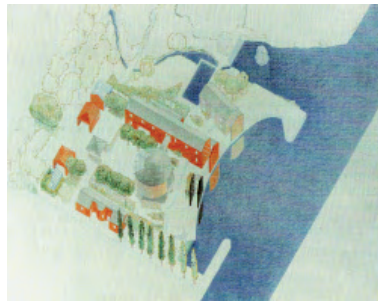
F.30



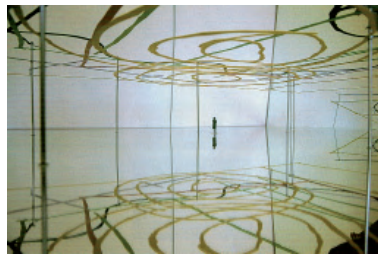
F.31



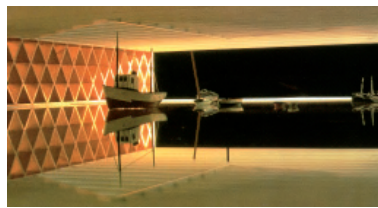
F.32



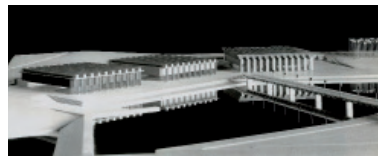
F.33



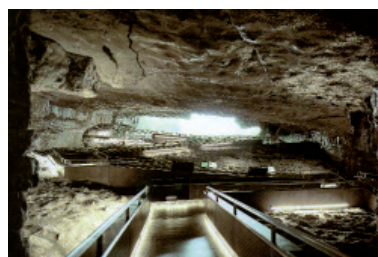
F.34



F.35



F.36



F.37

Agua, luz y gravedad en la arquitectura de Baldeweg:

F.26. Juan Navarro Baldeweg. *Casa de la lluvia en Liérganes, Santander* (1978-1981). Lluvia de luz sobre la casa de la lluvia. BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg. *IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 108

F.27. Juan Navarro Baldeweg. *Casa de la lluvia en Liérganes, Santander* (1978-1981). Destellos de gotas de agua sobre grandes canalones. BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg. *IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 67

F.28. Juan Navarro Baldeweg. *Casa de la lluvia en Liérganes, Santander* (1978-1981). Instalación de agua de lluvia. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 11

F.29. Juan Navarro Baldeweg. *Casa de la lluvia en Liérganes, Santander* (1978-1981). Rayos de luz solar sobre la casa de la lluvia. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 26

F.30. Juan Navarro Baldeweg. *Casa de la lluvia en Liérganes, Santander* (1978-1981). Canalones y bajantes de la obra construida. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 41

F.31. Juan Navarro Baldeweg. *Paisaje con lluvia de luz* (1989). LAHUERTA, Juan José; GONZÁLEZ GARCÍA, Ángel: *Juan Navarro Baldeweg: obras y proyectos*. Madrid: Electa, 1993, p. 39

F.32. Juan Navarro Baldeweg. *Casas en el estanque* (1979). NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: Museo Español de Arte contemporáneo: Madrid, 11 de abril - 31 de mayo de 1986*. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes, 1986, p. 41

F.33. Juan Navarro Baldeweg. *Una casa para Karl Friederich Schinkel* (1979). LAHUERTA, Juan José; GONZÁLEZ GARCÍA, Ángel: *Juan Navarro Baldeweg: obras y proyectos*. Madrid: Electa, 1993, p. 75

F.34. Juan Navarro Baldeweg. *Estructura espacial dibujada* (1998). Estructura simétrica, efecto espejo. BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg. *IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 90

F.35. Juan Navarro Baldeweg. *Ideas previas para el diseño urbano de la Marina de Arrecife, Lanzarote* (1998). Imagen virtual en el reflejo del agua. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 114

F.36. Juan Navarro Baldeweg. *Recinto ferial de Silleda, Pontevedra* (1998). Un lago artificial organiza el conjunto de la propuesta. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 217

F.37. Juan Navarro Baldeweg. *Museo de las cuevas de Altamira, Cantabria* (1995-2000). Simetría pétreca entre suelo y -falso- techo en la reproducción de la cueva original. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 59

aparte y destacada merece el *Museo de las cuevas de Altamira* (1994-2000), en el que la necesidad de reproducir una cueva natural brinda la oportunidad, al arquitecto, de explorar la tensión visual que se produce entre la pesantez y la ingravidez cuando, sin tener que recurrir al reflejo virtual de la luz en el agua, se crea una simetría formal y material entre suelo y techo. Igual que en sus *piezas de gravedad*, Navarro Baldeweg crea aquí una obra en la que, a pesar de transmitir la sensación de burlar las leyes de la gravedad, existe una clara lógica estructural interna, pues la reproducción del falso techo de piedra está colgada de una estructura de vigas ocultas, de entre 30 y 40 metros de luz, que cubren la cueva de lado a lado.

I.2.1.3. La estructura arquitectónica, entre la gravedad y la luz

En *La columna y el peso* (1973), su primera *pieza de gravedad*, Navarro Baldeweg pone de manifiesto ya un interés explícito por la investigación de la acción que ejerce la fuerza de la gravedad sobre la estructura arquitectónica, pues “*la estructura es (...) allí donde, en última instancia, se encarna para el hombre el problema de la gravedad*”²⁹. Además de su ineludible función portante, Juan Navarro considera que la estructura debe manifestar los fenómenos de la gravedad de tal manera que su contemplación llegue a emocionar al espectador³⁰.

No obstante, a pesar de la atención puesta en los fenómenos gravitatorios, afirma Baldeweg que “*en muchos proyectos se han trabajado las estructuras como piezas de gravedad al unísono con la luz*”³¹, pues “*se trata de investigar estructuras que, además de resistentes, canalicen la luz, otorgándole valor y protagonismo*”³², de modo que la luz esté también presente en el diseño de la estructura.

A diferencia de otros arquitectos, Juan Navarro no opta por la construcción de potentes estructuras atravesadas por la luz en las que se haga evidente el esfuerzo estructural provocado por la atracción gravitatoria sobre la masa construida. Más bien al contrario, y de acuerdo con las exploraciones realizadas en el ámbito de la pieza y de la instalación, Baldeweg construye estructuras en

29. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante*, (2ª Ed). *Pre-textos de arquitectura*, Girona, 2001, p. 88. El límite de los principios en la arquitectura de Mies van der Rohe, 1983.

30. “Un techo o las figuras estructurales concretas canalizan el flujo energético de la gravedad, y hasta los mismos propioceptores del cuerpo resuenan y se estremecen durante la contemplación”. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante*, (2ª Ed). *Pre-textos de arquitectura*, Girona, 2001, pp. 37-38. *Movimiento ante el ojo, movimiento del ojo*, 1981. En lo referente a la manifestación de los fenómenos de la gravedad -y también de la luz- por parte de la estructura, ver apartado I-3.3.1. La arquitectura como manifestación de la luz y de la gravedad.

31. NAVARRO BALDEWEG, Juan: Navarro Baldeweg. *Madrid: Tanais*, 2001, p.16. La caja de resonancia, 2002.

32. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante*. Girona: *Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya*, 1999, p. 64. *Figuras de luz en la luz*, 1998.

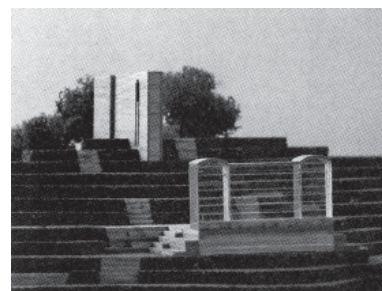
las que la gravitación parece tener una presencia velada por los fenómenos de la luz.

Bajo este punto de vista, es posible distinguir en la obra de Navarro Baldeweg cuatro modos de trabajar estructuralmente con la gravedad y la luz: 1) una primera estrategia, que puede observarse a lo largo de toda su trayectoria, se basa en la voluntad de *estratificar verticalmente lo pesado y lo ligero*, siendo las partes en contacto con la tierra las más pesadas y las que se elevan sobre él las más livianas; 2) otra estrategia proyectual consiste en crear *piezas de luz* que toman la forma de *cúpulas flotantes* que evocan la sensación de ingravidez; 3) también explora Juan Navarro la creación de *figuras de luz en su totalidad*, espacios de luz difusa cubiertos por *vigas-lucernario unidireccionales* que, en determinadas ocasiones, pueden permitir el ingreso puntual de luz sólida; 4) por último, en algunos proyectos se recupera la dicotomía entre lo pesado y lo ligero propia de la primera estrategia, aunque de una forma distinta, pues se construyen *núcleos pesados y opacos* que se envuelven con *ligeras tramas estructurales* totalmente permisivas al paso de la luz.

1.2.1.3.1. Estratificación vertical de lo pesado y lo ligero ³³

En la *Propuesta de intervención en el alto de Belo* (1984) Juan Navarro Baldeweg dispone sobre el paisaje dos piezas arquitectónicas, una pétreo y otra cristalina ³⁴. Mediante esta elocuente declaración de intenciones el arquitecto expresa la contraposición que se produce en gran parte de su obra entre la gravedad y la luz, la pesantez y la ligereza, la opacidad y la translucidez.

En diversos proyectos Juan Navarro formaliza esta contraposición mediante la estratificación vertical de los elementos arquitectónicos. Los elementos material y formalmente más pesados, generalmente muros pétreos de cerramiento, se disponen en la parte inferior de la construcción en contacto con la tierra, mientras que cubiertas y techos se conforman como ligeras estructuras metálicas apoyadas de distintos modos sobre las partes inferiores, más pesadas.



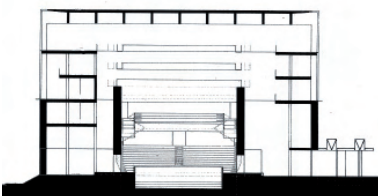
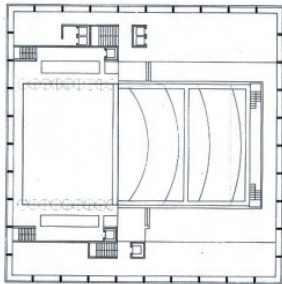
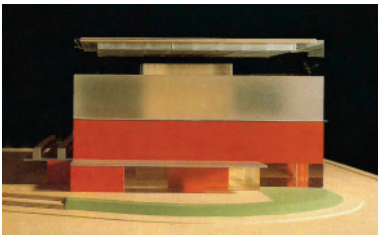
F.38. Juan Navarro Baldeweg. *Propuesta de intervención en el alto Belo* (1984). LAHUERTA, Juan José; GONZÁLEZ GARCÍA, Ángel: *Juan Navarro Baldeweg: obras y proyectos*. Madrid: Electa, 1993, p. 86

33. Sobre la contraposición vertical entre lo ligero y lo pesado ver el apartado 1-2.2.3.2. El belvedere tectónico sobre el podio estereotómico.

34. "El proyecto se compone de dos edificaciones dispuestas ortogonalmente en el eje norte-sur: una de ellas es de piedra, la otra de cristal.(...) El capitel de alabastro encastrado en el muro de piedra, quedará engarzado en una superficie luminosa -tanto de día como de noche- por efecto del material translúcido empleado. (...) La otra construcción, planteada sobre una plataforma artificial de piedra, estaría constituida por elementos prismáticos acristalados, bajo una techumbre protectora de plomo y acero galvanizado. (...) Ambas obras, de piedra y cristal, destacarán en el árido paisaje circundante". LAHUERTA, Juan José; GONZÁLEZ GARCÍA, Ángel: *Juan Navarro Baldeweg: obras y proyectos*. Madrid: Electa, 1993, p. 86



F.39. Juan Navarro Baldeweg. *Rehabilitación del Molino de Martos* (2001-2005). Baldaquino de aluminio sobre podio pétreo existente. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 75



F.40. Juan Navarro Baldeweg. *Proyecto para un centro de espectáculos en Blois* (Francia, 1991). Maqueta, sección y alzado del volumen del teatro estratificado en tres franjas: opaca, translúcida y transparente. La cubierta parece volar. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, pp. 214-215

En otros proyectos construye Baldeweg un volumen masivo en contacto con el suelo en el que asienta un ligero baldaquín. Éste es el caso, por ejemplo, del volumen de la sala de exposiciones del *Palacio de Exposiciones y Congresos de Salamanca* (1985-1992). Este espacio se cubre con un techo de 22,5 x 15,0 m. que transmite bidireccionalmente los esfuerzos a los esbeltos soportes de su perímetro, su único sustento. En la parte superior de la cubierta una delgada capa de hormigón estructural absorbe las compresiones propias de la flexión, mientras que en la parte inferior un entramado de pletinas de acero de gran canto absorbe los esfuerzos a tracción sin añadir prácticamente peso propio. En el tramo central, el canto de estas nervaduras es de aproximadamente un metro, aunque a medida que se aproxima a los soportes, disminuye progresivamente. Gracias a ello el canto aparente exterior de la cubierta es mínimo, hecho que enfatiza la sensación de ligereza³⁵. Desde el interior, la “convexidad” del techo impide que, desde determinados ángulos, pueda verse el apoyo de la cubierta en los soportes, de manera que ésta parece sostenerse en la luz que ingresa por el perímetro acristalado, dotando al espacio de una ligereza inverosímil. Se consigue disponer así un espacio luminoso y diáfano cuya cubierta parece sostenerse en la luz.

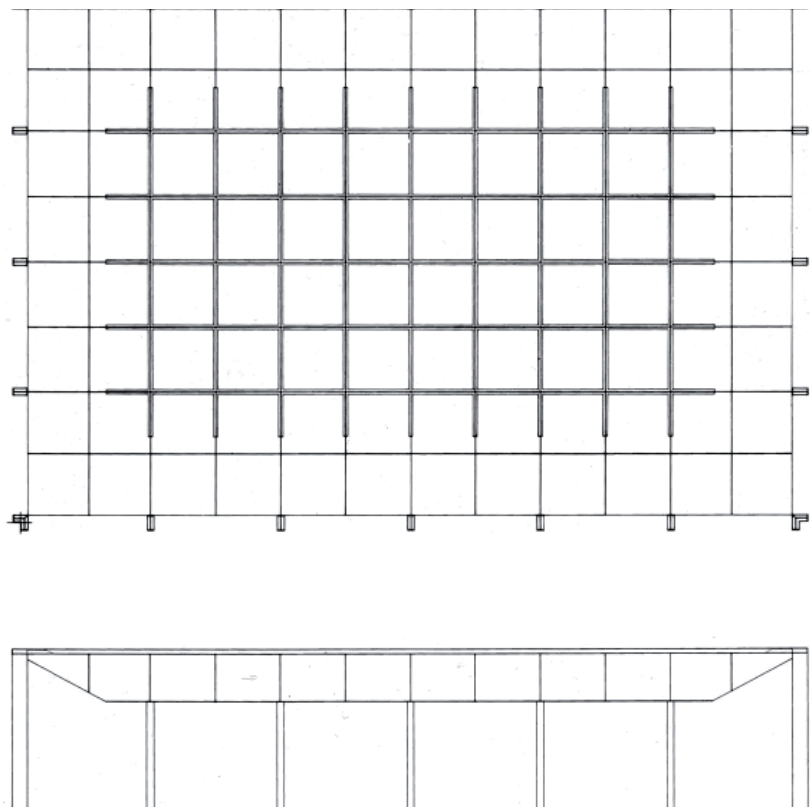
En el proyecto para el *Centro de espectáculos de Blois* en Centro cultural de Villanueva de la Cañada Francia (1991) Juan Navarro enfatiza aún más esta estratificación. El volumen cúbico del teatro se divide en tres franjas, siendo la inferior opaca, la intermedia translúcida y, la superior, totalmente transparente: “*El teatro y sala de música de cámara es una forma masiva, un cubo lleno, autocontenido, que se aligera por su piel cristalina en sus estratos superiores. (...) Estos distintos momentos funcionales del teatro -en orden concéntrico- se manifiestan al exterior como estratos en su volumen cúbico, haciéndose legible en la opacidad del ladrillo, en lo introvertido de la masa opalina y en la expansión visual, el entorno natural del cristal superior transparente*”³⁶. La abstracción de la maqueta permite transmitir la idea de que la cubierta del volumen flota sobre la transparencia y los reflejos del cristal de la franja superior, idea que Baldeweg materializa finalmente en el baldaquino de la biblioteca del *Centro cultural de Villanueva de la Cañada* en Madrid (1992-1997).



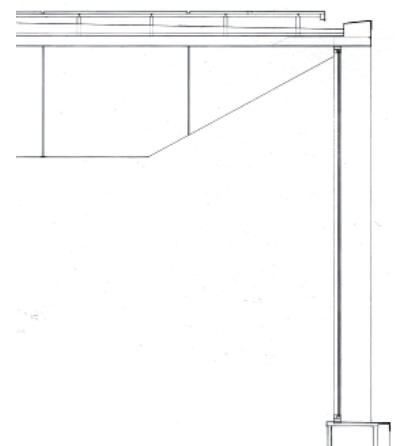
F.41. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca* (1985-1992). Baldaquino metálico sobre podio pétreo. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p.121



F.42. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca* (1985-1992). Interior de la sala de exposiciones. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 143

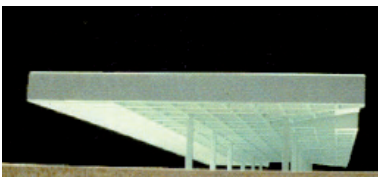


F.43. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca* (1985-1992). Planta y secciones de la cubierta. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 6





F.44. Juan Navarro Baldeweg. *Casa de la lluvia en Liérganes, Santander (1978-1981)*. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 40



F.45. Juan Navarro Baldeweg. *Propuesta para la Isla de los museos de Berlín (1994)*. Marquesina de acceso al Neues Museum. NAVARRO BALDEWEG, Juan; LUPANO, Mario (ed): *Juan Navarro Baldeweg: il ritorno della luce*. Milano: Motta Editore, 1996, p.36

35. "El dintel de este último se ha hecho mínimo, de modo que parece libre de carga o sosteniendo, simplemente, el volumen del espacio libre sobre la vertical de su forma". NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: *El Croquis*, nº 54, 1992, p. 113

36. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: *El Croquis*, nº 54, 1992, pp. 210-211

37. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante*. Girona: *Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya*, 1999, p.140. Conversación entre Juan Navarro Baldeweg y Luis Rojo Castro, 1995.

38. Ver apartado III.5. La abstracción de la gravedad y la levedad de la luz en la estructuración del espacio interior en continuidad con el exterior, a propósito de la *Neue Nationalgalerie* de Mies.

En la ya mencionada *Casa de la lluvia en Liérganes (1978-1981)* puede verse materializada, de alguna manera, la aspiración que Navarro Baldeweg muestra en la maqueta del proyecto de Blois. El muro pétreo que conforma la fachada lateral descansa sobre el terreno y, encima de él, una franja de cristal parece soportar, solamente con sus reflejos, el ligero techo que cubre la casa.

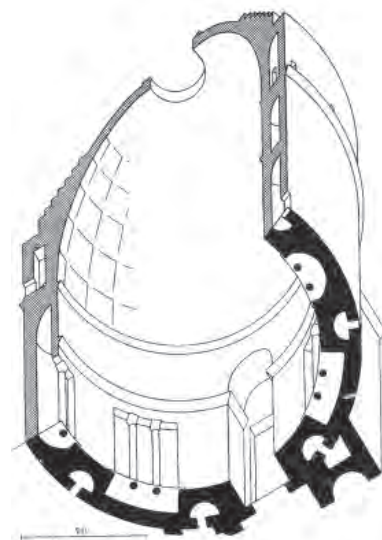
En la *Propuesta para la ordenación de la Isla de los museos de Berlín (1994)* la existencia de una serie de edificios de gran potencia arquitectónica induce a Navarro Baldeweg a plantear una propuesta basada, únicamente, en la realización de algunas operaciones en la cota cero y en la construcción de algunas marquesinas donde albergar los nuevos accesos y vestíbulos de los museos. Así, en este proyecto la distinción entre lo telúrico y lo aéreo es radical: *"Fundamentalmente se trataba de trabajar el suelo como un bajorrelieve, creando una colina artificial en la cual se fueran «hundiendo» los edificios mismos. (...) En Berlín había que evitar todo lo que compitiera con los edificios existentes. Por ello, después del suelo, hay que tener en cuenta un segundo nivel: el de las marquesinas. Y las llamo «marquesinas» porque son piezas muy importantes en cuanto arquitectura. Es como si se dijera que la Galería Nacional de Berlín, que es un techo flotante, muy cuidado, es una marquesina... Pues bien, en este proyecto de Berlín yo quería que las marquesinas tuvieran su naturaleza material propia, metálica, de acero, para diferenciarse de la piedra o los estucos de los edificios"*³⁷. Como no podía ser de otra manera, Baldeweg hace referencia a la estructura de la *Neue Nationalgalerie* de Mies van der Rohe³⁸ aunque, no obstante, la marquesina nervada propuesta por el arquitecto español no comparte algunos de los principales atributos formales de la estructura miesiana. A diferencia de los baldaquinos construidos en Salamanca o Martos, Juan Navarro plantea aquí la ubicación de los soportes estructurales en la parte central de la cubierta, lejos del perímetro. Con esta operación, el arquitecto pretende liberar el perímetro de toda carga estructural, de tal modo que pueda disponerse en él un cerramiento enteramente de cristal. La voluntad de transparencia de este cerramiento es tal que el arquitecto considera que innecesaria su maquetación.

1.2.1.3.2. "Piezas de luz": cúpulas ingrávidas

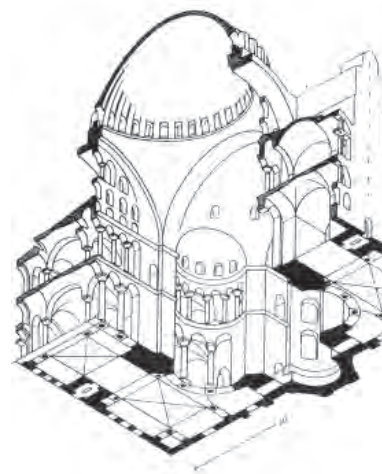
A principios de los años ochenta y durante una década (1982-1994), Navarro Baldeweg emplea en sus proyectos determinadas estructuras arquetípicas, como el arco o la cúpula, cuya forma revela de manera inequívoca la función de encauzar o portar el peso. No obstante, el arquitecto no se interesa por estas formas por su capacidad de aludir a una determinada tradición histórico-arquitectónica ni tampoco por su eficiencia mecánico-estructural. Más bien, su interés radica en el hecho de que, con la utilización de elementos estructurales cuya forma viene dada como respuesta a la atracción gravitatoria ejercida sobre la masa construida, es fácil aludir a la omnipresencia de la gravedad. Como veremos, de manera análoga a lo que ocurre en algunas de sus piezas de gravedad, Navarro Baldeweg intenta activar con sus cúpulas la percepción de la fuerza de la gravedad y, para ello, construye situaciones arquitectónicas en que, mediante la luz, se alude al mismo tiempo a la gravedad del peso y a la ingravidez de la flotación.

Desde un punto de vista gravitatorio-estructural, las "cúpulas" rebajadas de Navarro Baldeweg no deberían ser consideradas como tales pues, a pesar de que se conciben como elementos de cubrición espacial, no transmiten por compresión el peso de la gravedad. A pesar de ello, por analogía formal estas piezas son consideradas comúnmente como "cúpulas".

Por lo que se refiere a la luz, como muy bien explica Enric Granell las cúpulas de Baldeweg atienden a dos modelos claramente definidos: *"Podemos establecer dos grandes familias de cúpulas. Una arrancarí­a del Panteón de Roma. La otra de Santa Sofía de Constantinopla. En el Panteón la única entrada de luz está en el óculo central. Podríamos decir que es la máxima definición de la luz gravitatoria, de la luz que se contamina del peso de los cuerpos y que define el cuenco espacial de la cúpula mientras va cayendo. Por el contrario la cúpula de Santa Sofía no se abre en su cenit sino en su arranque por una serie de cuarenta ventanas colocadas entre sus nervios. Estamos frente a una luz que es como el fuego. No cae sino que asciende hinchando el vacío de la cúpula desde abajo con una luz ingrávida"* ³⁹. Efectivamente, igual

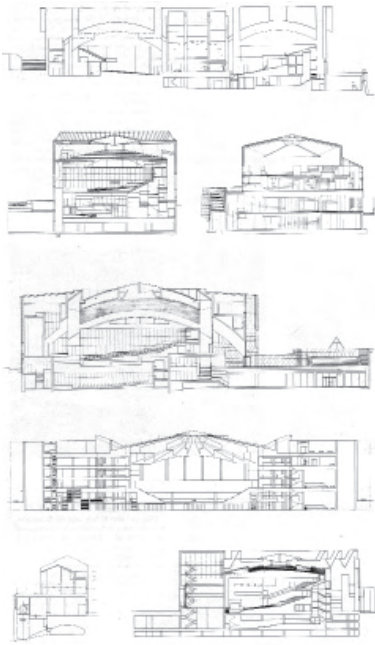


F.46. Panteón de Roma.



F.47. Santa Sofía.

39. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg*. IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 14



F.48. Cúpulas de Juan Navarro Baldeweg. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 26

40. Sigue una relación de instalaciones, proyectos y obras donde Juan Navarro Baldeweg ha construido cúpulas ingravidas: Biblioteca San Francisco El Grande, Madrid (1982-1994); Rehabilitación de los molinos viejos de Murcia a centro cultural y museo hidráulico (1984-1988); proyecto para el Palacio de festivales de Santander (1984); Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca (1985-1992); concurso "Nueve proyectos para nueve ciudades: Turín", Trienal de Milán (1986); proyecto para un Centro deportivo en la ciudad olímpica, Barcelona (1988); proyecto para un Centro cultural de defensa, Madrid (1988); proyecto para un Palacio de Congresos en Cádiz (1988); instalación de la exposición de Fort Asperen (1989); proyecto para un Auditorio y palacio de congresos en San Sebastián (1990).

41. NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): Una caja de resonancia. Valencia: Pre-textos, 2007, p. 159. Conversación de Juan Navarro Baldeweg con Juan José Lahuerta, 2000.

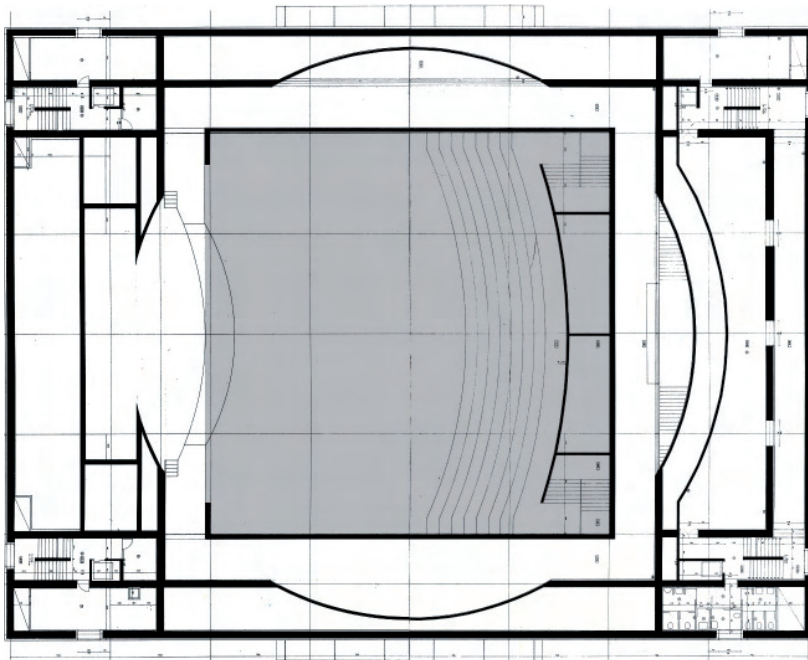
42. NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): Una caja de resonancia. Valencia: Pre-textos, 2007, p. 165. Conversación de Juan Navarro Baldeweg con Juan José Lahuerta, 2000.

que otras tantas cúpulas construidas a lo largo de la historia, las de Baldeweg intentan aunar en su forma estas dos maneras de introducir la luz.

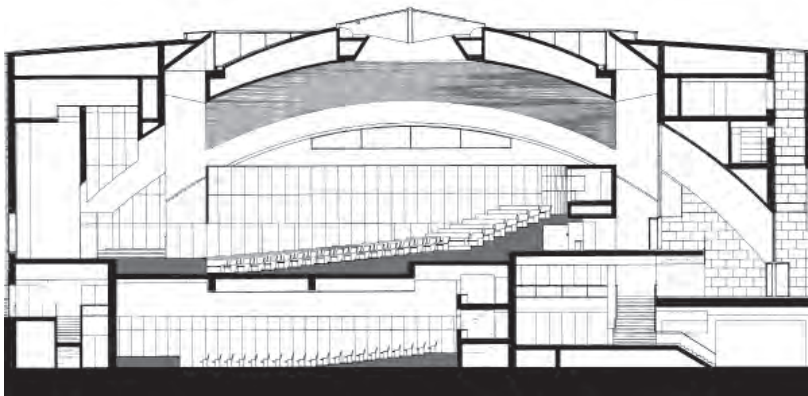
Sin duda alguna, de las cúpulas construidas por Baldeweg ⁴⁰ es la del *Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca* (1985-1992) la más imponente. El cuerpo que constituye la cúpula central que cubre el auditorio está formado por una doble membrana hueca de hormigón de 30 x 30 metros sujeta, mediante cuatro soportes en cada lado, a un muro perimetral.

Tal como ocurre en sus *piezas de gravedad*, Navarro Baldeweg manipula y transfigura los atributos formales y estructurales de esta cúpula de tal manera que, al mismo tiempo, alude a la pesantez y evoca la ingravidez: *"Frente a alguna de mis cúpulas -la del Palacio de Congresos de Salamanca, por ejemplo- he oído comentarios bien diversos: unos creen que es muy pesada, otros que es muy ligera. Da lo mismo porque la cúpula contiene necesariamente las dos sensaciones. Un mismo espectador podría percibirla de un modo y de otro, alternativamente, porque en realidad lo que provoca es la consciencia de que ahí, en ese lugar en el que estamos, hay algo que vuela y que no debería volar"* ⁴¹. En definitiva, *"de lo que se trata es de liberarse de las cargas de la materia, de sus imposiciones, sin dejar de reconocer sus leyes"* ⁴².

Como se ha apuntado más arriba, la forma abovedada de una cúpula transmite, de por sí, la sensación de portar las cargas gravitatorias de su peso propio desde lo alto de la misma hasta sus apoyos. Cuanto más abovedada es la cúpula, más esfuerzo parece tener que hacer ésta para soportar su propio peso. De esta manera, el hecho de que la de Salamanca sea una cúpula rebajada transmite la sensación de que las cargas que debe soportar no son lo suficientemente importantes como para obligar a una geometría más abultada. Además, a diferencia de las cúpulas nervadas, la superficie inferior de la cúpula de Salamanca muestra una estratigrafía circular perpendicular a la dirección de transmisión de las cargas que evoca la sensación de que no transmite carga alguna.



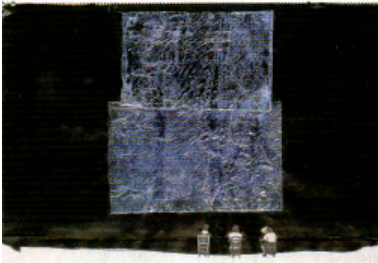
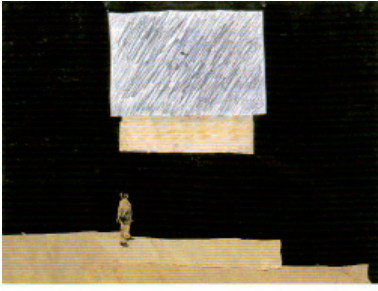
F.49. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca* (1985-1992). Planta nivel +10,0 m. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 118



F.50. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca* (1985-1992). Sección longitudinal por la sala principal. NAVARRO BALDEWEG, Juan; LUPANO, Mario (ed): *Juan Navarro Baldeweg: il ritorno della luce*. Milano: Motta Editore, 1996, p. 26



F.51. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca* (1985-1992). Vista interior de la sala principal. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 136



F.52. Juan Navarro Baldeweg. *Collage* (1963). Masas de pintura flotando ante los espectadores. NAVARRO BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg. *IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 99



F.53. Juan Navarro Baldeweg. *El baño* (1963). Cúpula de luz. LAHUERTA, Juan José; GONZÁLEZ GARCÍA, Ángel: *Juan Navarro Baldeweg: obras y proyectos*. Madrid: Electa, 1993, p. 50

43. "El efecto que causan algunos de mis edificios es el de objetos que parecen flotar en la luz y el espacio". NAVARRO BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías. Madrid: *El Croquis*, nº 133, 2006, p.11. Una conversación con Juan Navarro Baldeweg. William J. R. Curtis.

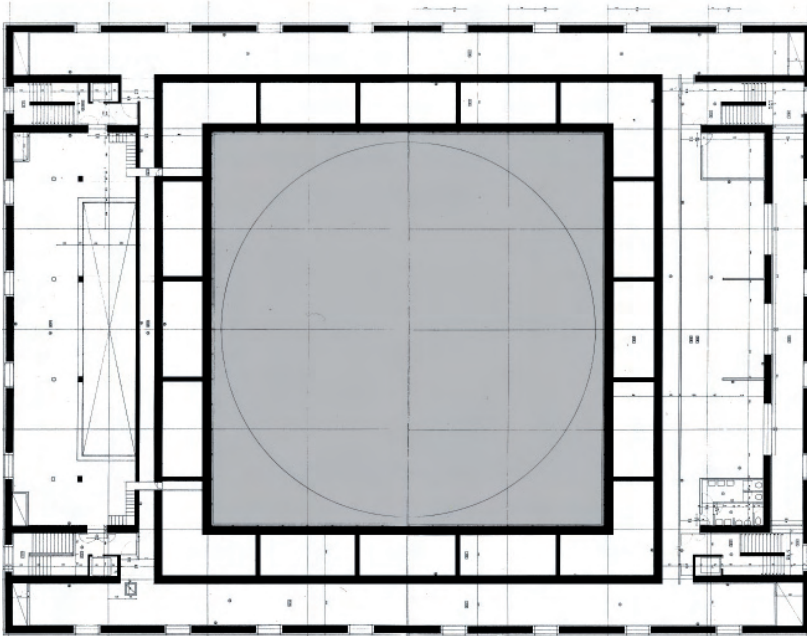
44. *Ver apartado I-2.1.1.2. Piezas de gravedad.*

45. "El baldaquino sobre el auditorio principal, flotando y recortado en la luz, se muestra en una tensión equilibrada entre gravedad e ingravidez. Por un lado, sentimos el atirantamiento de la envoltura interior al suelo y, por otra parte, el techo parece suspendido sin esfuerzo en el aire". NAVARRO BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992. Madrid: *El Croquis*, nº 54, 1992, p. 112

De acuerdo con lo apuntado anteriormente, el cuerpo de la cúpula está formado por una doble membrana de hormigón que permite aumentar su volumen sin incrementar en exceso su peso. No obstante, a pesar de esta operación de aligeramiento su peso real supera las mil toneladas. Además, visualmente se percibe como un enorme volumen recortado y macizo al que parece haberse dado forma de cúpula por sustracción de materia. Es por ello que, a pesar de la operación de aligeramiento estructural interior, el volumen de la cúpula se muestra al espectador como un cuerpo realmente pesado.

En contra de lo esperado, la cúpula no descansa, ni estructural ni visualmente, sobre ningún tipo de apoyo en su base, sino que es sostenida tangencialmente en su perímetro por un total de dieciséis soportes. Mientras que desde los espacios circundantes a la sala principal es posible distinguir estos soportes, desde el interior del auditorio éstos quedan fuera del campo visual. Así, desde la sala principal se niega visualmente el apoyo de la cúpula, que parece flotar o sostenerse en la luz ⁴³, mientras que, desde los espacios circundantes, se muestra el artilugio que hace posible este efecto. Es así como Navarro Baldeweg consigue construir una cúpula de casi mil metros cuadrados de superficie y de más de un millar de toneladas de peso que, no obstante, parece flotar o sostenerse en la luz.

La idea de la flotación ha estado presente en la obra de Juan Navarro ya desde sus inicios. En sus tempranos *Collage* (1963), realizados antes de iniciar sus estudios de arquitectura, las grandes masas de color parecen flotar frente a los atónitos espectadores. No obstante, a partir de su experiencia en el M.I.T., Baldeweg ahonda en piezas como *El columpio* o *El aro patinado en oro*, en las que es la luz, en última instancia, la que parece suspender en el aire la acción la gravitatoria. Igual que en sus *piezas de gravedad* ⁴⁴, sus cúpulas transmiten al unísono una contradictoria sensación de peso e ingravidez ⁴⁵ que, precisamente, es lo que hace posible manifestar ante el espectador la omnipresencia de la gravedad.



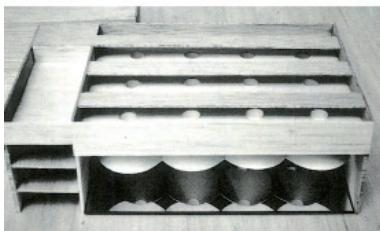
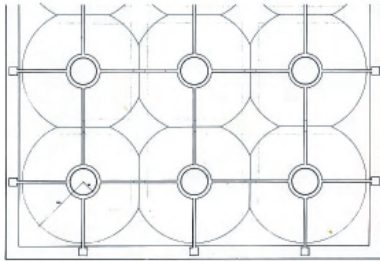
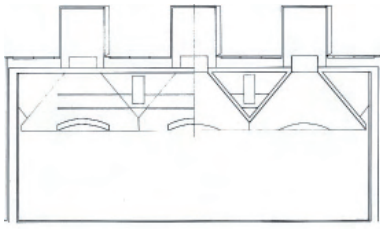
F.54. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca* (1985-1992). Planta nivel +13,5 m. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 118



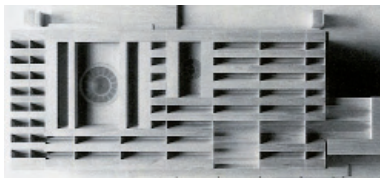
F.55. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca* (1985-1992). Sección longitudinal por el triple espacio. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 114



F.56. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de exposiciones y congresos de Salamanca* (1985-1992). Vistas de los sopoertes desde el interior de la sala principal y desde los espacios perimetrales. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, pp. 129, 137



F.57. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de exposiciones y congresos de Cádiz* (1988). Sección, planta y modelo de los lucernarios de la sala de exposiciones. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 180



F.58. Juan Navarro Baldeweg. *Auditorio y palacio de congresos de San Sebastián* (1990). Maqueta de la cubierta y maqueta del espacio interior. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, pp. 190 y 194

46. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, p. 194

1.2.1.3.3. "Figuras de luz en su totalidad": vigas-lucernario unidireccionales

A finales de los años ochenta Navarro Baldeweg empieza a desplazar su interés por las *piezas de luz* en forma de cúpulas flotantes hacia la posibilidad de concebir sistemas estructurales de iluminación cenital. Así, en proyectos como el *Centro cultural de defensa de Madrid* (1988) o el *Palacio de congresos de Cádiz* (1988), ensaya la posibilidad de utilizar lucernarios unidireccionales en los que la conducción de la luz se plantea a través de una serie de *piezas de luz* en forma de conos, embudos o campanas cuya forma recuerda a sus cúpulas ingravidas.

No obstante, la transición definitiva hacia una nueva vía de investigación en la relación entre la gravedad, la luz y la estructura se produce en el proyecto del *Auditorio y palacio de congresos de San Sebastián* (1990), donde las *piezas de luz* en forma de cúpulas flotantes se suspenden de un techo de luz cenital: "La estructura puede considerarse como un sistema único constituido por varios subsistemas interconectados. Toda la cubierta está formada por un orden gigante de siete pórticos cuyos pilares se sitúan en los lados Norte y Sur de la planta rectangular, y con vigas de 51 metros de longitud. De éstas pende un segundo subsistema formando un techo constituido por grandes piezas en sección en V que deja pasar la luz cenital orientada al Sur (a excepción de la zona que cubre la sala de exposiciones que se abre al Norte). En esta estructura secundaria, de carácter lineal, se hace sitio a unas estructuras radiales y focalizadas singulares correspondientes a los techos de las salas grandes y pequeñas del conjunto"⁴⁶. Las cúpulas ingravidas planteadas en el proyecto de San Sebastián son las últimas que proyecta Juan Navarro. A partir de este momento su interés se centra, no en la construcción de *piezas de luz*, sino en la creación de *figuras de luz en su totalidad*⁴⁷, en las que fondo llega a identificarse con la figura de luz misma hasta llenar el espacio.

El proyecto de para la *Sede de la Presidencia y cuatro consejerías de la Junta de Extremadura* (1988-1995) es una obra importante en la trayectoria de Navarro Baldeweg, porque es aquí donde construye

sus primeros lucernarios unidireccionales y, casi por casualidad, donde experimenta la potencia espacial de la repetición estructural.

Juan Navarro proyecta en la planta superior cuatro lucernarios longitudinales en sentido norte-sur cuyo trazado reproduce la inflexión del edificio siguiendo, así, la dirección del espacio. En la cubierta la dirección de la estructura gira noventa grados con respecto a la dirección de los forjados de las plantas inferiores para disponerse en la misma dirección de los lucernarios, quedando situados éstos entre las vigas. La parte superior de los lucernarios sobresale del plano de cubierta y está constituida por una viga triangular flanqueada por dos planos de cristal por donde entra la luz. La parte inferior se corresponde con el canto de las vigas que soportan el techo y es donde se disponen los elementos de regulación lumínica: a diferencia de los lucernarios de los proyectos de Cádiz o de Madrid, el ingreso de luz no se controla ya con conos o embudos, sino con una serie de delgadas láminas no estructurales de protección solar, cuya misión es precisamente interceptar cualquier rayo de luz directa que pudiera traspasar la geometría de la parte superior del lucernario.

Durante las excavaciones propias del inicio de la obra se hallan en el subsuelo los restos de un asentamiento romano, hecho que obliga al arquitecto a replantearse la manera en que el volumen debe asentarse sobre el terreno. La solución adoptada consiste en construir una secuencia de pórticos de hormigón de vigas de gran canto biapoyadas en los que se apea la estructura superior, de manera que la superficie de cimentación se ve enormemente minimizada. La contemplación de la nueva estructura proyectada durante su proceso de ejecución en obra resulta especialmente reveladora para Navarro Baldeweg: *“Durante la construcción del edificio de las Consejerías de Mérida, precisamente cuando se cubrió el yacimiento arqueológico con grandes pórticos de hasta veintiséis metros, se produjo un extraordinario espectáculo de luz cenital: la luz se filtraba entre las grandes vigas, dando lugar a un fondo ideal, a un marco genérico de luz controlada que hacía justicia a todas y cada una de las figuras particulares: los objetos,*

47. El propio Navarro Baldeweg explica la transición de sus investigaciones sobre piezas de luz hacia figuras de luz en su totalidad en NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): La habitación vacante. Girona: Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, 1999, pp. 63-69. Figuras de luz en la luz, 1998.



F.59. Juan Navarro Baldeweg. *Casa estudio para el pintor Gordillo* (1992). Vistas frontal e inferior de la maqueta del taller. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, pp. 222 y 224

48. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante. Girona: Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya*, 1999, p. 66. Figuras de luz en la luz, 1998.

49. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 13

50. *Sigue una relación de obras, proyectos y protoarquitecturas basadas en el control estructural de la luz: Centro cultural de Villanueva de la Cañada, Madrid (1988-1995); proyecto Centro de espectáculos en Blois, Francia (1991); proyecto para una Casa-estudio para el pintor Juan Luis Gordillo (1992); pieza "Espacio expositivo" I y II (1993); proyecto para el Museo y centro cultural "Salvador Allende", Chile (1993); Museo de las cuevas de Altamira (1994-2000); pieza "Estructura para luz cenital en dos orientaciones" (1996); proyecto para el Recinto ferial de Silleda, Pontevedra (1998); proyecto de Diseño urbano de la Marina de Arrecife, Lanzarote (1998); proyecto para la Ampliación de Museo nacional de arte "Reina Sofía", Madrid (1999); Museo de la evolución humana, Burgos (2000-2010); proyecto para el Parque lineal del río Manzanares, Madrid (2005).*

las piedras, las construcciones confusas de las ruinas. Era como un techo entoldado, protector del trabajo y de la investigación arqueológica del yacimiento. De manera natural el lugar se aproximaba al ideal de un espacio expositivo con luz universal, homogénea, constante, no directa" ⁴⁸.

A partir de esta experiencia, a principios de los años noventa Navarro Baldeweg inicia una serie de estructuras cuya finalidad es la construcción de espacios iluminados con una indirecta y difusa luz de norte, sin sombras arrojadas e independiente de las variaciones lumínicas de la luz solar: *"Después de trabajar en estas piezas [Navarro Baldeweg se refiere aquí a las cúpulas ingravidas], en las que aparecen "figuras" destacándose en un fondo indiferenciado de la luz ambiental, exploré estructuras que presentaban precisamente el fondo de luz universal uniforme, luz norte indirecta y homogénea. Las estructuras de estos modelos de arquitectura están originadas con el propósito de evitar sombras arrojadas en sus miembros constructivos. Se formalizan pórticos de sección en uve que dejan resbalar la luz cenital sin producir sombras. He intentado controlar la forma de tal modo que el protagonismo se redujera, exclusivamente, a ese fondo. Cualquier figuración de los elementos constructivos se hace desaparecer, es casi invisible. De ese modo se obtiene un volumen de textura luminosa pura que parece palpable, sin obstrucciones figurativas, donde la mirada puede vagar libremente. Esta investigación ha dado origen a un conjunto de modelos y a una serie de objetos a medio camino entre la pieza y la propuesta de arquitectura"* ⁴⁹.

Siguiendo la experiencia de Mérida, tanto las propuestas más conceptuales de Juan Navarro como los proyectos finalmente construidos ⁵⁰ se plantean como una secuencia de pórticos estructurales de gran luz, cuya sección triangular -o en "V"- revela la intención de controlar la entrada de luz directa. Dado que estas cubiertas de luz cenital son concebidas como abstracción de los livianos mecanismos de control solar de la arquitectura vernácula meridional (tales como celosías, emparrados, cañizos, o entoldados), Navarro Baldeweg les exige una gran ligereza



F.60

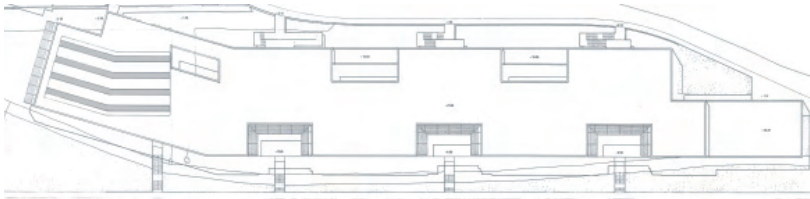


F.61

Juan Navarro Baldeweg. *Sede de la Presidencia y cuatro consejerías de la Junta de Extremadura (1988-1995)*:

F.60-61. Lucernarios planta superior. NAVARRO BALDEWEG, Juan; LUPANO, Mario (ed): *Juan Navarro Baldeweg: il ritorno della luce*. Milano: Motta Editore, 1996, p. 91

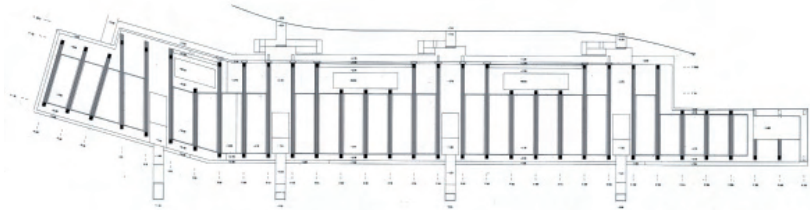
F.62. Planta cubierta con indicación de lucernarios. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1992-1995*. Madrid: El Croquis, nº 73 (II), 1995, p. 43



F.62

F.63. Planta de los pórticos sobre los que se apoya el edificio. NAVARRO BALDEWEG, Juan; LUPANO, Mario (ed): *Juan Navarro Baldeweg: il ritorno della luce*. Milano: Motta Editore, 1996, p. 83

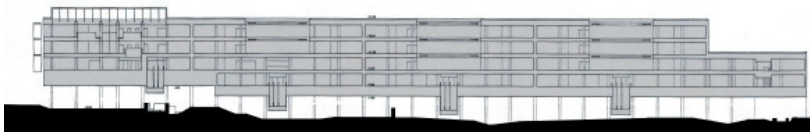
F.64. Sección. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1992-1995*. Madrid: El Croquis, nº 73 (II), 1995, p. 42



F.63

F.65-66. Fotografías durante la construcción. NAVARRO BALDEWEG, Juan; LUPANO, Mario (ed): *Juan Navarro Baldeweg: il ritorno della luce*. Milano: Motta Editore, 1996, p. 82

F.67. Visión longitudinal de la secuencia de pórticos. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg. IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999, p. 18



F.64

F.68. Patio. NAVARRO BALDEWEG, Juan; LUPANO, Mario (ed): *Juan Navarro Baldeweg: il ritorno della luce*. Milano: Motta Editore, 1996, p. 93



F.65



F.66

F.69. Vista de las ruinas. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 65

F.70. Vista exterior. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1992-1995*. Madrid: El Croquis, nº 73 (II), 1995, p. 51



F.67



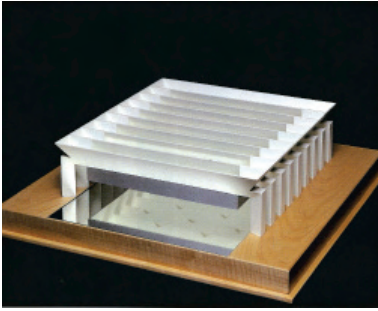
F.68



F.69



F.70



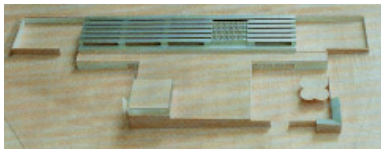
F.71. Juan Navarro Baldeweg. *Casa estudio para el pintor Gordillo* (1992). Vistas frontal y superior de la maqueta del taller. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992, pp. 222 y 224

51. "En los países meridionales la luz solar se encauza y se controla de muy distintos modos: con celosías, emparrados, cañizos, persianas o cortinas. Se crea una piel tridimensional mediante una arquitectura intermedia (loggias, pórticos, umbrales, patios) o instalando toldos en calles y plazas. Unas estructuras interpuestas rompen la luz, la distribuyen, la dispersan o la filtran desde el exterior, haciendo decaer su impulso, domesticando su fluir. La violencia del sol crudo y deslumbrante afuera, se remansa mediante espacios intermedios o gracias a filtros". NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante. Girona: Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, 1999, p. 63. Figuras de luz en la luz, 1998.*

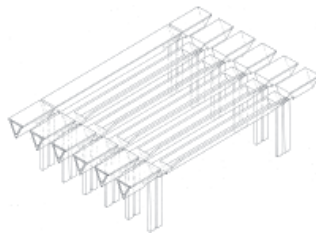
visual⁵¹. Para conseguir este efecto, y a pesar de las considerables dimensiones que alcanzan algunas de sus vigas-lucernario, Baldeweg evita toda alusión formal o material a la acción de la gravedad sobre estas cubiertas de luz. Así, el arquitecto concibe estas cubriciones como elementos arquitectónicos cuya forma debe revelar la luz y no la gravedad.

En el *Centro cultural de Villanueva de la Cañada* en Madrid (1988-1995) Juan Navarro construye la primera de estas estructuras. Las distintas piezas de programa se distribuyen bajo una gran cubierta de luz cenital de setenta y cinco por diecisiete metros dispuesta en sentido este-oeste. Esta gran cubierta está formada por cinco crujías de seis vigas de gran canto en forma de V. La eficacia lumínica de estos lucernarios queda garantizada por el hecho de que la práctica totalidad de la fachada de los espacios cubiertos por ellos es opaca.

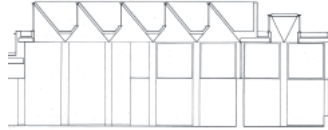
Aunque el compartimentado programa de Villanueva de la Cañada impide a Navarro Baldeweg proyectar una estructura monoespacial similar a las de sus maquetas conceptuales de principios de los años noventa. En el *Museo de la evolución humana*, Burgos (2000-2010) consigue aproximarse con más fidelidad a las investigaciones realizadas en esas proto-arquitecturas. El proyecto se articula en tres cuerpos: el museo, el centro de investigación y el auditorio. El volumen correspondiente al museo se concibe como un inmenso espacio único orientado de norte a sur, techado por una cubierta de vigas-lucernario de cincuenta y cinco metros de luz y cinco metros de canto. Como la geometría triangular de estas vigas no resuelve las necesidades de control lumínico requeridas por un espacio expositivo, es necesario disponer, a tal fin, lamas de protección solar en los lucernarios. La envolvente de soporte se plantea como una enorme celosía estructural diagonalizada, opción ensayada ya en maquetas de tipo conceptual. No obstante, pesar de la potencia espacial del volumen del museo, la permisividad lumínica de la estructura vertical y la transparencia de sus fachadas ponen en cuestión la efectividad de los lucernarios como mecanismos de luz cenital difusa.



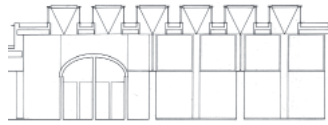
F.72



F.73



F.74



F.75



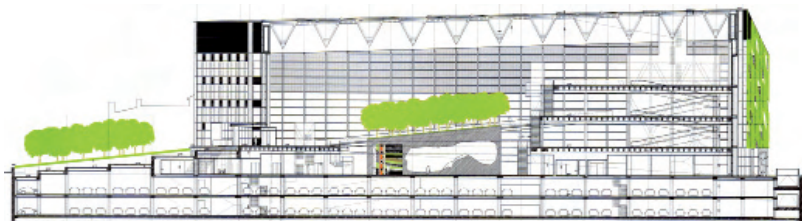
F.76



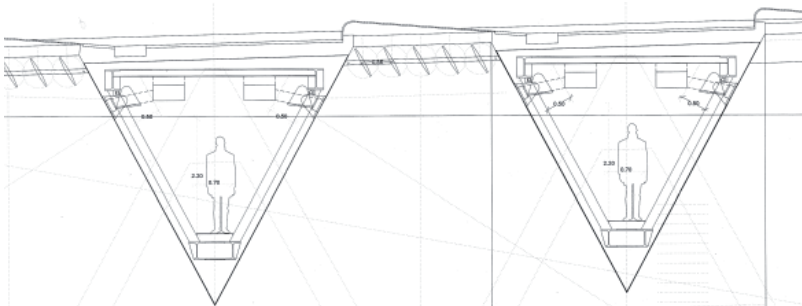
F.77



F.78



F.79



F.80



F.81



F.82

Juan Navarro Baldeweg. *Centro cultural de Villanueva de la Cañada*, Madrid (1988-1995):

F.72. Maqueta. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: arquitectura, piezas y pintura*. Fundación Marcelino Botín, Santander, junio/julio 1997. Santander: Fundación Marcelino Botín, 1997, p. 45

F.73. Axonometría pórticos. NAVARRO BALDEWEG, Juan; LUPANO, Mario (ed): *Juan Navarro Baldeweg: il ritorno della luce*. Milano: Motta Editore, 1996, p. 40

F.74. Sección de la zona de exposiciones. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 87

F.75. Sección de los talleres. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 87

F.76. Imagen en construcción. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Constelaciones*. Navarra: Universidad Pública de Navarra, Cátedra Jorge Oteiza, 2011, p. 49

F.77. Vista longitudinal, pasillo. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 84

F.78. Vista transversal, sala de exposiciones. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 87

Juan Navarro Baldeweg. *Museo de la evolución humana*, Burgos (2000-2010):

F.79. Sección longitudinal del volumen del museo. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 165

F.80. Detalle en sección de la cubierta del museo. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 167

F.81. Maqueta. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 161

F.82. Fotografía del interior del museo.

1.2.1.3.4. Núcleos masivos envueltos por ligeras tramas de luz

Con la finalidad de garantizar unas condiciones óptimas de sonoridad, iluminación y visión en teatros, auditorios y salas de congresos, es habitual en Navarro Baldeweg la delimitación de estas piezas con gruesos muros de hormigón armado, opacos y masivos, cuyo trazado sigue geometrías sencillas, paralelepédicas y simétricas. Alrededor, y a cierta distancia de estos introvertidos volúmenes, se proyecta un segundo cerramiento perimetral que conforma un espacio intersticial donde se disponen los accesos y las circulaciones a las salas interiores.

Aunque, en el proyecto de Salamanca Navarro Baldeweg concibe esta segunda envolvente como un cerramiento murario y pétreo de geometría regular, en la mayoría de sus proyectos esta piel tiene un carácter mucho más liviano y luminoso. Aún cuando no envuelven ningún volumen macizo, estas pieles se configuran como un conjunto de superficies anguladas e inclinadas en las que, al chocar los rayos lumínicos con ángulos de incidencia desiguales y gracias a la capacidad de interacción lumínica de los materiales empleados, se manifiestan ante el espectador los efectos de la luz de la manera más variada. Así concebidas, estas pieles se “activan” por medio de la luz ⁵² y, visualmente, restan peso al volumen construido ⁵³.

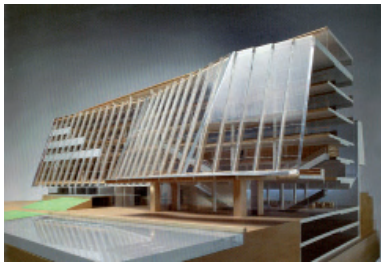
Entre el cerramiento interior y la envolvente exterior se conforma un espacio intersticial de geometría compleja cuya cualidad lumínica viene determinada, sin duda, por las propiedades de los materiales empleados en la piel exterior. No obstante, a pesar de que el uso de estos espacios intersticiales no requiere condiciones de iluminación especiales, la elevada permisividad lumínica de estas envolventes a veces es excesiva y, en ocasiones, es necesario disponer algún tipo de protección solar. Concebida de esta forma, la piel exterior de estos proyectos se presenta como un elemento arquitectónico de luz autoportante, independiente por tanto de la estructura gravitatoria del edificio ⁵⁴.

En estos proyectos Juan Navarro manifiesta la contraposición entre las características gravitatorias -masividad y opacidad- del cerramiento interior, y las propiedades lumínicas -ligereza y translucidez- de la envolvente exterior.

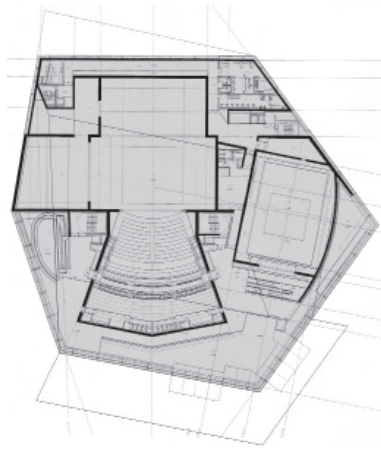
52. “Con respecto a la piel del edificio (...) sólo está completa bajo el influjo de la luz”. NAVARRO BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías. Madrid: *El Croquis*, nº 133, 2006, p. 13. Una conversación con Juan Navarro Baldeweg. William J. R. Curtis.

53. “El Centro de congresos de Salzburgo (1992), en cambio, es un proyecto que se asemeja algo más al de Salamanca: podemos entenderlo como una caja de luz en forma estrellada: se trata de una envolvente desplazada. En cierto modo es una homotecia, una prolongación de la envoltura de lo que había antes alrededor del palacio Mirabell... Por otro lado, la masa es tan grande que la mejor forma de que se adaptara a la ciudad era recurrir a una superficie que reflejara la luz y que no estuviera muy formalizada, que tuviera muchas fugas: eso es lo que explica la forma estrellada. Porque una forma masiva, de carácter representativo (un paralelepípedo, por ejemplo) hubiera resultado muy pesada, entre otras razones, porque hubiera tenido más volumen que el resto de los edificios de la calle. Había que deshacer el edificio, entrelazarlo con el aire y con la luz, resaltando las fugas visuales, de manera que no le impusiera a la calle su orden, sino que adquiriera libertad”. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): La habitación vacante. Girona: *Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya*, 1999, p. 138. Conversación entre Juan Navarro Baldeweg y Luis Rojo Castro, 1995.

54. “Cuando se piensa en la piel, se piensa en algo autónomo, en algo que al margen de la estructura, circunscribe un interior acogedor”. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): La habitación vacante. Girona: *Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya*, 1999, p.48. Gran interior amarillo, 1993.



F.83

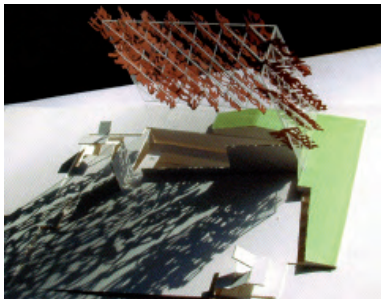


F.83. Juan Navarro Baldeweg. *Instituto del conocimiento en Amersfort*, Holanda (2003-2010). Maqueta donde se manifiestan los reflejos de luz de la piel de cristal. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p.189



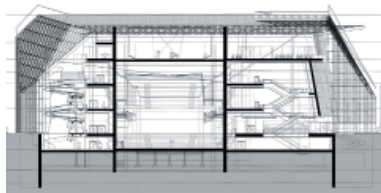
F.84

F.84. Juan Navarro Baldeweg. *Instituto del conocimiento en Amersfort*, Holanda (2003-2010). Imagen de los reflejos vítreos del edificio construido.



F.85

F.86 F.85. Juan Navarro Baldeweg. *Edificio departamental en la universidad Pompeu Fabra*, Barcelona (1996-2007). Maqueta de la protección solar. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 107



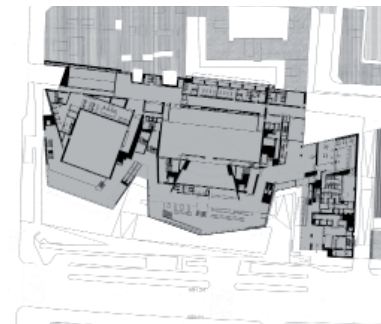
F.87

F.86-87. Juan Navarro Baldeweg. *Palacio de la música y de las artes escénicas de Vitoria* (2002). Planta (cota 6.30 m) y sección transversal, donde se muestra el núcleo interior y la envolvente exterior. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 174



F.89

Juan Navarro Baldeweg. *Centro para las artes escénicas de la comunidad de Madrid, "Teatros del Canal"* (2000-2008):



F.88

F.88. Planta. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 139

F.89. Luminosidad y ligereza de la piel en la zona de acceso.

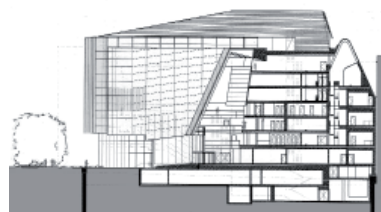


F.90

F.90. Imagen del espacio intersticial entre la envolvente exterior y el cerramiento interior durante su construcción, donde se pueden observar las distintas estructuras. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 147



F.91



F.92

F.91-92. Secciones transversales donde se aprecian los distintos cerramientos y el espacio intersticial. NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 144



F.01. Alberto Campo Baeza (1946-)

I.2.2. ALBERTO CAMPO BAEZA

Alberto Campo Baeza (1946-) obtiene el título de arquitecto en 1971 por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (E.T.S.A.M.). En 1974 construye ya su primera obra en solitario y, en 1976, se incorpora como profesor de Proyectos Arquitectónicos en la E.T.S.A.M., donde obtiene el grado de Doctor Arquitecto en 1982 y la Cátedra de Proyectos Arquitectónicos en 1986. Toda su trayectoria ha estado marcada por la reflexión teórica y proyectual en torno a la luz y la gravedad, consideradas ambas cuestiones fundamentales de la arquitectura. Su labor docente no puede desligarse de su actividad como arquitecto, constituyendo su obra escrita, proyectada y construida una unidad indisoluble.

I.2.2.1. Arquitectura, espacio y luz

Aunque en sus primeras obras puede advertirse un interés más o menos implícito por el uso de la luz natural, es a partir de la segunda mitad de los años ochenta cuando se empieza a hacer ya evidente una explícita sensibilidad por la cualidad arquitectónica de la luz solar. Con la construcción de ciertos paramentos traslúcidos mediante bloques de cristal -llamados *pavés*- en proyectos como el *Centro preescolar de San Sebastián de los Reyes* (1984) o la *Escuela pública de San Fermín* (1985), ambas en Madrid, se inicia Campo Baeza en el trabajo consciente y refinado de la luz con fines espaciales⁰¹. No obstante, es la *Casa Turégano* en Madrid, (1988) la que inaugura una serie de proyectos⁰² en los que el espacio es construido únicamente por medio de una luz solar que perfora los planos y los volúmenes de una abstracta arquitectura blanca que no hace alusión alguna a la estructura portante o a la gravedad.

En los textos escritos por Alberto Campo entre 1988 y 1990 sobre diversos arquitectos españoles⁰³ aparecen ya, cada vez con mayor intensidad, referencias explícitas a la importancia arquitectónica de la luz. Además, dedica el curso 1990-1991 de la asignatura de Proyectos Arquitectónicos que imparte en la

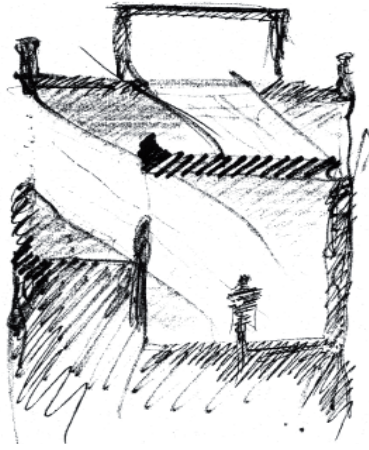
01. Ver apartado I-2.2.3.4. La tectónica de la trama estructural translúcida.

02. A continuación sigue una relación de obras y proyectos concebidos por Campo Baeza como arquitecturas blancas de espacio y luz: *Casa Turégano* en Pozuelo de Alarcón, Madrid (1988); *Casa García Marcos* en Valdemoro, Madrid (1991); *Aulario de Vellilla* de San Antonio, Madrid (1991); *Casa Janus* en Reggio Emilia, Italia (1992); *Escuela pública "Drago"*, Cádiz (1992); *Casa Gaspar*, Cádiz (1992); *Casas para la Embajada española en Argel* (1992); *Proyecto para viviendas sociales en Ibiza* (1994); *Proyecto para la Casa Pino*, Madrid (1998); *Casa Asencio* en Chiclana, Cádiz (2000); *Casa Guerrero*, Cádiz (2005); *Guardería Benetton* en Treviso, Italia (2007); *Casa Moliner*, Zaragoza (2009).

03. Paladear el viejo vino de la buena arquitectura: sobre el Conservatorio de Almería de César Ruiz Larrea (1988). La Belleza Calva: sobre la arquitectura de Alejandro De la Sota (1990). Son lo que son: sobre la arquitectura de José Llinás (1990). *Textos publicados en CAMPO BAEZA, Alberto: La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996.*



F.02



F.02. Alberto Campo Baeza. *Casa Turégano*, Madrid (1988). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 75

F.03. Alberto Campo Baeza. *Casa Turégano*, Madrid (1988). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, p. 32

F.04. Alberto Campo Baeza. *Casa García Marcos*, Madrid (1991). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 86



F.04



F.05

F.05. Alberto Campo Baeza. *Casa Gaspar*, Madrid (1992). CAMPO BAEZA, Alberto: *Campo Baeza*. Madrid: Munilla-Lería, 1999, Portada

F.06. Alberto Campo Baeza. *Escuela pública "Drago"*, Cádiz (1992). <http://www.flickr.com/photos/campobaeza>

F.07. Alberto Campo Baeza. *Casa Guerrero*, Cádiz (2005). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, p. 145



F.06



F.07

F.08-09. Alberto Campo Baeza. *Casa Asencio*, Cádiz (2000). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, pp. 112-113



F.08



F.09

E.T.S.A.M. a la reflexión sobre la luz, tema en el que ahondará a lo largo del curso 1992-1993.

En el manifiesto *Esencialidad. Más con menos* (1992)⁰⁴ Campo Baeza propone una arquitectura basada en la idea, la luz y el espacio⁰⁵ y dedica a cada una de estas cuestiones un apartado. El correspondiente a la luz lleva el sugerente título de *Architectura sine luce nulla architectura est*, axioma mediante el cual pretende evidenciar la enorme importancia de la luz en la arquitectura: “*La LUZ es componente esencial para toda posible comprensión de la cualidad del ESPACIO. (...) La LUZ es el material básico, imprescindible, de la Arquitectura. Con la misteriosa pero real capacidad, mágica, de poner el ESPACIO en tensión para el hombre. Con la capacidad de dotar de tal CUALIDAD a ese espacio, que llegue a mover, a conmover, a los hombres*”⁰⁶. Sin embargo, las pocas líneas que Alberto Campo dedica a la luz en este texto se revelan insuficientes para ahondar en la importancia de la luz.

04. *Esencialidad. Más con menos* (1992), en CAMPO BAEZA, Alberto: *La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, pp. 43-47

05. “Propongo una Arquitectura esencial de IDEA, LUZ Y ESPACIO. De Idea construida, materializada en Espacios esenciales animados por la Luz”. CAMPO BAEZA, Alberto: *La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, p. 43. *Esencialidad. Más con menos* (1992).

06. CAMPO BAEZA, Alberto: *La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, p.44. *Esencialidad. Más con menos* (1992).

07. *Architectura sine luce nulla architectura est. Sobre la luz* (1992), en CAMPO BAEZA, Alberto: *La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, pp. 55-65. *Aunque, en aras de la brevedad, no es posible ahondar aquí en el contenido de este importante texto de Alberto Campo Baeza, el apartado IV-3.1. Sobre la luz y el espacio arquitectónico recoge de manera textual las partes más relevantes de este escrito.*

08. *La posible condición matérica de la luz es una cuestión recurrente tanto en las reflexiones arquitectónicas como en las investigaciones científicas. Esta cuestión se resume en el apartado II-5.2. La evolución de las teorías de la luz.*

Ese mismo año Campo Baeza escribe otro texto con el mismo título, *Architectura sine luce nulla architectura est. Sobre la luz*⁰⁷, en el que desarrolla con más profundidad las ideas planteadas en el escrito anterior. Otorga a la luz una condición matérica⁰⁸ y, por tanto, lejos de considerarla algo inasible, vago y difuso, la concibe como algo controlable, cuantificable y cualificable. Distingue así varios tipos de luz según sea su dirección (luz horizontal, vertical o diagonal) y su cualidad (luz sólida o difusa) y plantea la posibilidad de utilizar varias luces distintas para construir un único espacio. Mediante un breve repaso a la historia de la arquitectura, Campo Baeza apunta distintas maneras de entender la luz y de trabajar con ella con finalidades espaciales, advirtiendo de la necesidad de reflexionar con profundidad sobre su papel en la arquitectura por venir.

No obstante, en estos escritos Campo Baeza no habla únicamente de la luz, sino que alude también a la gravedad. De hecho, en base a las reflexiones realizadas por Kenneth Frampton en base a los postulados de Karl Bötticher y Gottfried Semper, a principios de la década de los años noventa Alberto Campo concibe una manera

de entender la arquitectura basada en la articulación estructural de la *tectónica* y la *estereotomía* en relación a los fenómenos de la gravedad y de la luz.

I.2.2.2. La tectónica de la luz y la estereotomía de la gravedad

*“La interacción de la naturaleza con la cultura en la arquitectura se manifiesta, ante todo, a través de los efectos de la gravedad y la luz. La estructura resiste y, a la vez, revela el impacto de la gravedad en su forma, mientras que la luz revela, por así decir, la naturaleza intrínseca de la estructura.”*⁰⁹

Kenneth Frampton

Durante su estancia como profesor invitado en la *Eidgenössische Technische Hochschule* (E.T.H.) de Zúrich a finales de los años ochenta, Kenneth Frampton (1930-) se inicia en el estudio de la tectónica alemana del siglo XIX a través de los textos de Karl Bötticher (1806-1889) y Gottfried Semper (1803-1879). Fruto de estas investigaciones, a principios de los años noventa el profesor Frampton desarrolla una particular interpretación¹⁰ de la *tectónica* y la *estereotomía* en correspondencia a la relación estructural entre la luz y la gravedad.

I.2.2.2.1. Kenneth Frampton: estructura, tectónica y estereotomía

De los distintos procedimientos técnico-materiales que desarrolla Semper en su “*Der Stil in den technischen und tektonischen Künsten, oder praktische Aesthetik*” (*El estilo en las artes técnicas y tectónicas o Estética práctica*, 1860-1863), Frampton centra su atención en la tectónica y la estereotomía. Desde un punto de vista etimológico ambas palabras provienen del griego: “tectónica” procede de *ΤΕΚΤΟΝ* (*tekton*), que significa *carpintero, artesano o constructor*¹¹, mientras que “estereotomía” deriva de *σπερεος* (*stereos*), que significa *sólido*, y *τεμνυος* (*temnos*) que significa *cortar o dividir*¹².

09. FRAMPTON, Kenneth: Reflexiones sobre la autonomía de la arquitectura: una crítica a la producción contemporánea, en *Criterios*, La Habana, nº 31, enero-junio 1994.

10. La teoría de Semper ha sido objeto de estudio durante las últimas dos décadas. En un ejercicio de interpretación más que de análisis descriptivo, algunos autores han fundido los postulados del arquitecto alemán con sus propias ideas e intereses arquitectónicos, dando lugar a construcciones teóricas donde no siempre es fácil distinguir las aportaciones originales de las contribuciones propias de cada autor. En este sentido, hay que advertir que el objetivo del presente apartado no es desarrollar los conceptos de lo tectónico y lo estereotómico según la teoría de Semper, sino exponer la interpretación que Frampton realiza en torno a ambos conceptos a principios de los años noventa:

FRAMPTON, Kenneth: Rappel à l'Ordre: The Case for the Tectonic, en *Architectural Design*, vol. 60, nº 3/4, 1990, pp.19-25. Este texto ha sido compilado en FRAMPTON, Kenneth: *Labour, work and architecture: collected essays on architecture and design*. London: Phaidon, 2002, pp. 91-103.

FRAMPTON, Kenneth; GHIRARDO, Diane (ed.): *Reflections on the Autonomy of Architecture: A Critique of Contemporary Production. Out of Site: A Social Criticism of Architecture*. Seattle: Bay Press, 1991, pp. 17-26.

FRAMPTON, Kenneth; CAVA, John (ed): *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*. Cambridge: the MIT Press, 1995.

11. La palabra “arquitecto” proviene del compuesto griego “archi-tekton”, que significa “constructor principal” o “maestro constructor”, pues el prefijo “archi-” significa “el primero” y denota preeminencia o superioridad.

12. Según la R.A.E.: Tectónica: Perteneciente o relativo a los edificios u otras obras de arquitectura. Perteneciente o relativo a la estructura de la corteza terrestre. Parte de la geología que trata de dicha estructura. Estereotomía: Arte de cortar piedras y maderas.

13. FRAMPTON, Kenneth: Labour, work and architecture: collected essays on architecture and design. London: Phaidon, 2002, p. 95. Rappel à l'Ordre: The Case for the Tectonic, 1990.

14. Ver apartado I-3.3.1. La arquitectura como manifestación de la luz y de la gravedad.

15. Ver FRAMPTON, Kenneth: Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal, 1999, p. 87

16. "Podemos decir que el concepto de cada parte está compuesto por dos elementos: forma-núcleo y forma-artística. La forma-núcleo de cada parte es la estructura estáticamente funcional y mecánicamente necesaria; la forma-artística tan sólo es la caracterización por la que la función estático-mecánica se hace aparente". BÖTTICHER, Karl: Die Tektonik der Hellenen, 2 vols. Postdam: 1852, vol. 1, p. XV. Citado en FRAMPTON, Kenneth: Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal, 1999, p. 88

17. Ver FRAMPTON, Kenneth: Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal, 1999, pp. 30-31

18. FRAMPTON, Kenneth: Labour, work and architecture: collected essays on architecture and design. London: Phaidon, 2002, p. 92. Rappel à l'Ordre: The Case for the Tectonic, 1990.

Sobre la relación entre la tectónica y la estructura, cabe destacar la crítica realizada por William J. R. Curtis, que bien podría estar dirigida a Kenneth Frampton o Campo Baeza: "Se han escrito un montón de estupideces sobre la supuesta integridad "tectónica" de la arquitectura española reciente, como si hubiese una sencilla equivalencia ética entre la integridad intelectual y la expresión directa de los medios estructurales". NAVARRO BALDEWEG, Juan: Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006, p. 26. Teatros de luz: la arquitectura de Juan Navarro Baldeweg (William J. R. Curtis, 2006).

19. HERNÁNDEZ DE LEÓN, Juan Miguel: La Casa de un solo muro. Madrid: Nerea, 1990, p. 126. Atributos de la belleza formal (introducción a Teoría de la Belleza Formal, hacia 1856/59): Definición de la tectónica.

Frampton identifica ambos conceptos como nociones opuestas vinculadas a una determinada manera de concebir el espacio arquitectónico y su estructura portante. Así, mientras que la tectónica se identifica con la trama estructural adintelada -tradicionalmente de madera o sus equivalentes textiles- obtenida por conjugación o el ensamblaje de elementos o partes distintas que transmiten los efectos de la gravedad de manera sincopada y articulada, la estereotomía se identifica con la idea de espacio interior vacío, negativo de la masa estructural obtenida por sustracción material o por superposición de elementos iguales -generalmente pétreos o arcillosos- capaces de transmitir los efectos de la gravedad de manera continua, a compresión, mediante muros de cargas, arcos, cúpulas y bóvedas. De esta manera, Frampton asocia la tectónica a la ligereza, la levedad, la luminosidad y la translucidez, pues tiende a lo aéreo y a la desmaterialización de la trama. La estereotomía, por el contrario, la vincula a la pesantez, la oscuridad y la opacidad, pues tiende a lo telúrico y a la materialidad de la masa.

Kenneth Frampton desarrolla, pues, una interpretación en clave estructural de la tectónica y estereotomía, presentando ambos conceptos como ideas ontológicamente opuestas en relación a la gravedad y a la luz: "*aunque estos hechos sean tan conocidos por todos, es necesario repetirlos. Tendemos a ignorar las causas ontológicas de estas distinciones: esto es, la manera en que la trama tiende a lo aéreo y a la desmaterialización de la masa, mientras que la forma de la masa es telúrica, se asienta siempre en lo más profundo, dentro de la tierra. La primera tiende a la luz, mientras que la otra lo hace hacia la oscuridad. Estos dos opuestos gravitatorios, la inmaterialidad de la trama y la materialidad de la masa, pueden simbolizar los dos opuestos cosmológicos a los que aspiran: el cielo y la tierra*"¹³.

I.2.2.2.2. Bötticher y Semper: estructuralismo y espacialidad archi-Tectónica

Tal como expresa Karl Bötticher en su "Die Tektonik der Hellenen" (La Tectónica de los Helenos, 1843-1852), la tectónica puede

estar relacionada, también, con una cierta expresividad estático-resistente de la estructura portante. Conocedor de la estética de Arthur Schopenhauer, según la cual la finalidad de la arquitectura es expresar la naturaleza de la luz y de la gravedad mediante una correcta disposición de los elementos estructurales¹⁴, Bötticher afirma en su tratado que la belleza de la arquitectura reside, precisamente, en la explicación de los conceptos mecánicos¹⁵. En su estudio analítico sobre la tectónica helénica, Bötticher distingue el concepto de *forma-núcleo* (*kernform*), que se identifica con la estructura estáticamente funcional y mecánicamente necesaria de cada parte del objeto arquitectónico, de la noción de *forma-artística* (*kuntsform*), que se refiere a la caracterización o expresión artística por la que la función estático-mecánica se hace aparente¹⁶.

Según esta distinción, el carácter *tectónico* -o *atectónico*- de la forma construida no depende de *forma-núcleo*, es decir, de la capacidad de la estructura para portar y soportar correctamente las cargas, sino de la capacidad de la *forma-artística* de transmitir y expresar una correcta correspondencia entre la construcción y la estructura, una adecuada relación visual de las partes de la componen, y una acertada articulación entre la carga y el soporte¹⁷. En palabras de Frampton, la tectónica no alude “a la revelación mecánica de la construcción sino al potencial poético de la manifestación de la estructura”¹⁸.

A pesar de ser contemporáneo a Bötticher, Gottfried Semper no asocia a la tectónica con la función estructural, sino que la vincula con la delimitación espacial propia de la arquitectura. Según Semper, la finalidad de la arquitectura reside en la voluntad de envolver y subdividir el espacio y afirma que, para ello, inicialmente el ser humano se sirvió del arte textil, mediante el cual tejió alfombras y tapices con los que pudo delimitar el espacio. La malla estructural que sirviera de soporte a este cercado textil o los muros resistentes ocultos tras los tapices, nada tuvieron que ver con la original voluntad arquitectónica de la delimitación espacial, sino que sirvieron para garantizar la protección y la defensa frente a ataques externos, para asegurar la permanencia de los paramentos espaciales, para servir de cimiento

20. “La cestería fue la esencia del muro. Las alfombras tapizadas se mantienen aún como “muros” verdaderos, como los límites visibles del espacio. Los muros sólidos que acostumbraban a estar detrás de ellos eran necesarios por razones que nada tenían que ver con la creación del espacio; eran necesarios por razones de seguridad, para soportar las cargas, para su permanencia, etc. Donde la necesidad de estas funciones secundarias no se manifiesta, las alfombras mantienen el sentido original de la división del espacio. Incluso donde la construcción de sólidos muros era necesaria, éstos fueron sólo la interior e invisible estructura escondida detrás de las verdaderas y legítimas representaciones del muro, las alfombras fuertemente coloreadas”. SEMPER, Gottfried; MALLGRAVE, Harry Francis (trad); HERRMANN Wolfgang (trad): *The Four elements of architecture and other writings*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989, p. 104. Los cuatro elementos de la arquitectura, 1851.

“El muro es aquel elemento arquitectónico que formalmente representa y hace visible el espacio cerrado como tal, por decirlo así, sin referencia alguna a conceptos secundarios. (...) La estructura que servía de soporte, para asegurar, para aguantar este cercado espacial textil fue un requerimiento que no tenía directamente nada que ver con el espacio y su subdivisión. Estaba fuera del primitivo pensamiento arquitectónico e inicialmente no era un elemento determinante de la forma. El mismo razonamiento es válido para muros construidos con ladrillo, piedra u otros materiales de construcción, cuya naturaleza y uso no tenían nada que ver con el concepto de espacio. Fueron utilizados como protección y defensa, para asegurar la permanencia de los paramentos, o para servir de cimiento y soporte de la delimitación espacial superior, para aguantar cargas, en definitiva, por motivos que quedan fuera de la idea original de envolver o crear espacio”. SEMPER, Gottfried; MALLGRAVE, Harry Francis (trad); HERRMANN Wolfgang (trad): *The Four elements of architecture and other writings*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989, pp. 254-255. El estilo en las artes técnicas y tectónicas o Estética práctica: El arte textil, considerado en sí mismo y en relación con la arquitectura. §60: *El más primitivo principio formal de la arquitectura basado en el concepto de espacio e independiente de la construcción*, 1860.

y soporte de la delimitación espacial superior, para aguantar cargas, etc. Así, a pesar de reconocer que *“la tectónica aspira a crear espacio mediante inertes y pesadas masas de materia”*¹⁹, Semper afirma que aún cuando fue necesario recurrir a la construcción muraria por razones ajenas a la delimitación espacial propia de la arquitectura, los muros portantes de la arquitectura antigua quedaron ocultos detrás de alfombras y tapices²⁰.

Las diferencias conceptuales observables en la articulación estructural del concepto de tectónica por parte de Bötticher y de Semper²¹ dejan en evidencia la subjetividad con que Frampton se decanta por una interpretación estructuralista de la idea de tectónica.

21. Para una clara comprensión de las antagónicas posiciones de Bötticheer y Semper en relación a la tectónica de la estructura, es preciso contextualizar mínimamente el momento en que ambos manifiestan sus opiniones, a mediados del siglo XIX. En ese momento, los arquitectos están enfrascados en dos debates distintos. Por un lado, se debate sobre el estilo a seguir en el futuro, pues no existe consenso sobre la conveniencia de la arquitectura griega, la gótica, etc. Por otro lado, se debate sobre la conveniencia de la aplicación arquitectónica de las estructuras de hierro. Estos dos debates, en principio inconexos, acaban por confluír en un tercero: la capacidad del hierro de crear un nuevo estilo arquitectónico. Y es en este contexto que deben entenderse las posturas de ambos pensadores.

En su estudio sobre la tectónica, Bötticher llega a la conclusión de que cada gran estilo arquitectónico ha estado basado en un principio estructural objetivo, pero al mismo tiempo considera que la arquitectura griega y gótica han agotado las posibilidades estructurales de la piedra. En este sentido, ve en el uso del hierro, sin necesidad de añadirle estilo alguno pues posee una tectónica propia derivada de su función estructural, la posibilidad de un tercer estilo arquitectónico.

Semper, por su parte, se centra en el problema del estilo como una cuestión técnico-artística y, al mismo tiempo, se opone al empleo y la exhibición del hierro estructural en la arquitectura por considerarlo un material “invisible” y, por tanto, incapaz de delimitar el espacio. En este sentido, su principal argumento consiste en atacar de raíz la importancia de la estructura, considerándola una necesidad de orden práctico que no tiene ninguna importancia, ya no sólo en la cuestión del estilo, sino en la propia delimitación del espacio.

1.2.2.2.3. Campo Baeza: luz tectónica y gravedad estereotómica

Durante su estancia como profesor invitado en la E.T.H. a lo largo del curs o académico de 1989/1990, Alberto Campo Baeza coincide con Kenneth Frampton quien, por entonces, ha realizado ya importantes avances en sus investigaciones sobre la relación estructural de la luz y de la gravedad en base a las nociones de tectónica y estereotomía²². Tras casi dos décadas de ejercicio profesional, la reflexión sobre el papel de la estructura arquitectónica en relación a la luz y a la gravedad desarrollada por Alberto Campo Baeza durante la década de los noventa sienta las bases de una nueva manera de concebir la arquitectura que guiará todo su trabajo posterior.

Ya en su célebre escrito sobre la luz, *Architectura sine luce nulla architectura est*, Campo Baeza expone, con meridiana claridad, la importancia fundamental de la luz y de la gravedad en la arquitectura: *“La LUZ, como la GRAVEDAD, es algo inevitable. Afortunadamente inevitable, ya que en definitiva, la Arquitectura marcha a lo largo de la Historia gracias a esas dos realidades primigenias: LUZ y GRAVEDAD”*²³. No obstante, si bien es cierto que al margen de vincular el fenómeno de la luz a la noción de tiempo, las palabras que Campo Baeza dedica a la luz después de este importante escrito no añaden más que precisión a unas ideas ya existentes, es en el texto

Idea, luz y gravedad (1995)²⁴ donde el arquitecto sienta y asienta sus ideas en relación a la importancia arquitectónica de la gravedad, ideas que irá precisando en escritos posteriores.

La gravedad es una realidad ineludible, una fuerza imposible de evitar, por medio de la cual todo material tiende a volver a la tierra y, en este sentido, es la estructura portante la encargada de encauzar sus efectos, de dirigirla, de transmitir el peso de la materialidad a la tierra. No obstante, más allá de su evidente función mecánica, Alberto Campo Baeza atribuye a la estructura portante la importante capacidad de construir el espacio, de dotarlo de orden arquitectónico, de estructurarlo²⁵: *“Cuando digo que la GRAVEDAD construye el ESPACIO, estoy hablando de la ESTRUCTURA, de la llamada estructura portante. De la estructura que a lo largo de la Historia ha generado el ESPACIO arquitectónico. Casi siempre la forma de la arquitectura ha ido, lógicamente, ligada a la estructura portante. Es más, estructura y forma y espacio, han sido siempre la misma cosa. (...) Y así no me canso de repetir que la ESTRUCTURA, la estructura portante, más que sólo transmitir las cargas del edificio a la tierra por causa de la ineludible gravedad, lo que verdaderamente transmite es el orden del espacio, ESTABLECE EL ORDEN DEL ESPACIO, construye el espacio. (...). El establecimiento del orden del Espacio es algo más que el sólo portar, soportar las cargas de la Gravedad. Es poner en orden todo aquello”*²⁶.

Campo Baeza considera que la obra arquitectónica debe dialogar con la luz para luchar contra la gravedad, para vencerla, para dominarla “a la fuerza”, con la finalidad de alcanzar los niveles más sublimes de la belleza: *“La Luz (...) es precisamente la única capaz de hacer que los espacios conformados por las formas construidas con material grávido floten, leviten. Hace volar, desaparecer la Gravedad. La vence. La insoportable pesantez de la materia inevitable e imprescindible sólo puede ser vencida por la Luz. (...) La Luz venciendo a la Gravedad convoca a la Belleza sublime”*²⁷. Entre la luz y la gravedad se produce, entonces, una tensión ontológica que se revela en la forma de la estructura y que, sin duda, tiene importantes repercusiones espaciales.

22. “Durante todo el Curso Académico 1989-1990, estuve como *gastdocent* en la ETH de Zurich, coincidiendo con una estancia allí del profesor Frampton que daba su clase allí todos los lunes a las 10 de la mañana. Como yo viajaba desde Madrid cada lunes, tras las correspondientes carreras a los aeropuertos, siempre llegué puntual a esas interesantes clases en las que Frampton explicaba estos temas de lo tectónico y lo estereotómico con una claridad meridiana” (CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 35. De la cueva a la cabaña: sobre lo estereotómico y lo tectónico en arquitectura, 2003).

Casualmente, en 1990 el Catedrático de Composición de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid Juan Miguel Hernández León traduce, por primera vez al castellano, varios textos de Semper (HERNÁNDEZ DE LEÓN, Juan Miguel: *La Casa de un solo muro*. Madrid: Nerea, 1990).

Importante es también la contribución de Jesús María Aparicio, pues en su tesis doctoral “El muro concepto esencial en el proyecto arquitectónico: la materialización de la idea y la idealización de la materia”, codirigida por Frampton y Campo y leída en 1994 en la ETSAM, ahonda en lo tectónico y lo estereotómico en relación con la luz y la gravedad.

23. CAMPO BAEZA, Alberto: *La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, p.57. *Idea, luz y gravedad. Sobre las bases de la arquitectura* (1995).

24. Campo Baeza dedica el curso académico de *Proyectos Arquitectónicos en la E.T.S.A.M. de 1994-1995 a la Gravedad*.

25. Campo Baeza dedica los cursos académicos de *Proyectos Arquitectónicos en la E.T.S.A.M. de 1997-1998 y 2007-2008 a la Estructura* (y el espacio).

26. CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires: Nobuko, 2009, pp.63-64. *La estructura de la estructura. Sobre la estructura que establece el orden del espacio*, 2007.

27. CAMPO BAEZA, Alberto: *La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, p.79. *Idea, luz y gravedad. Sobre las bases de la arquitectura* (1995).

28. "Pienso que en los próximos años, este mecanismo de análisis arquitectónico a través de las categorías de lo tectónico y lo estereotómico, en definitiva un mecanismo capaz de concretar los temas de la Luz y la Gravedad, puede ser enormemente útil a los arquitectos tanto para desarrollar sus ideas como para poner en pie las obras que las materializan". CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 34. De la cueva a la cabaña. Sobre lo estereotómico y lo tectónico en arquitectura, 2002.

29. Campo Baeza dedica los cursos académicos de *Proyectos Arquitectónicos en la E.T.S.A.M. de 2000-2001 y 2002-2003 a lo tectónico/estereotómico*.

30. CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires: Nobuko, 2009, pp.31-32. De la cueva a la cabaña. Sobre lo estereotómico y lo tectónico en arquitectura, 2002. Este texto es una revisión de Cajas, Cajitas, Cajones. Sobre lo estereotómico y lo tectónico (1997), publicado en CAMPO BAEZA, Alberto: *La idea construida*. Buenos Aires: Nobuko, 2005, p. 61

Interesante es la contraposición que establece Jesús María Aparicio Guisado entre el espacio estereotómico y el tectónico: "El espacio estereotómico valora la luz y la visión gracias a la oscuridad ciega de la materia. El espacio tectónico valora la oscuridad en la luz natural que le rodea y de la que nace". APARICIO GUIADO, Jesús María: *El muro: concepto esencial en el proyecto arquitectónico: la materialización de la idea y la idealización de la materia*. Buenos Aires: Universidad de Palermo, 2000, pp. 196-197

31. "Estos dos términos [estereotómico y tectónico], recogidos de Gottfried Semper a través de Kenneth Frampton, son para mí de un tiempo a esta parte un eficaz instrumento para elaborar una arquitectura más precisa". CAMPO BAEZA, Alberto: *La idea construida*. Buenos Aires: Nobuko, 2005, p. 61. Cajas, Cajitas, Cajones. Sobre lo estereotómico y lo tectónico (1997).

Para Alberto Campo la interpretación estructural desarrollada por Frampton sobre la tectónica y la estereotomía resulta un instrumento de excepcional utilidad para comprender la relación arquitectónica entre la luz y la gravedad ²⁸. Convencido de ello, se esfuerza por difundir estas nociones arquitectónicas a través de sus propios cursos de *Proyectos Arquitectónicos* ²⁹ y por medio de sus escritos. No obstante, su labor no se limita únicamente a la difusión de estas ideas, sino que aspira también a una mayor precisión: "se entiende por arquitectura estereotómica aquella en que la fuerza de la gravedad se transmite de una manera continua, en un sistema estructural continuo y donde la continuidad constructiva es completa. Es la arquitectura masiva, pétreo, pesante. La que se asienta sobre la tierra como si de ella naciera. Es la arquitectura que busca la luz, que perfora sus muros para que la luz entre en ella. Es la arquitectura del podio, del basamento, del estilóbato. Es para resumirlo, la arquitectura de la cueva. Se entiende por tectónica aquella en que la fuerza de la gravedad se transmite de una manera sincopada, en un sistema estructural con nudos, con juntas, y donde la construcción es articulada. Es la arquitectura ósea, leñosa, ligera. La que se posa sobre la tierra como alzándose de puntillas. Es la arquitectura que se defiende de la luz, que tiene que ir velando sus huecos para poder controlar la luz que la inunda. Es la arquitectura de la cáscara. La del ábaco. Es, para resumirlo, la arquitectura de la cabaña. Es evidente que esta distinción se hace a base a una consideración 'estructural' de la arquitectura" ³⁰.

Como podrá constatarse en el siguiente apartado, estas consideraciones sobre la luz y la gravedad en torno a la tectónica y a la estereotomía de la estructura portante han tenido una influencia enorme en el desarrollo de la arquitectura realizada por Alberto Campo Baeza a partir de la década de los noventa ³¹.

I.2.2.3. Gravedad estructural y luz estructurada

La estructura portante ha sido siempre, de un modo u otro, un elemento protagonista en la obra proyectada y construida por Alberto Campo

Baeza. En una primera etapa de su trayectoria, que comprende sus dos primeras décadas de ejercicio profesional (aproximadamente desde 1971 hasta 1992), la expresión formal de la estructura portante se funde y confunde con la experimentación arquitectónica en torno a otras cuestiones proyectuales. La manifestación y la formalización de los elementos estructurales, así como una incipiente comprensión de la espacialidad inherente a la estructura son las cuestiones que ocupan al arquitecto durante esta etapa.

Una segunda etapa se inaugura aproximadamente en 1989, cuando Alberto Campo se inicia en la conceptualización teórica de la luz, la gravedad, la espacialidad de la estructura y la articulación estructural de lo tectónico y lo estereotómico. Hasta hoy, la mayor parte de la obra de Campo Baeza ha sido concebida en base a estas cuestiones. A partir de la comprensión estructural de la tectónica y la estereotomía en relación a su manera de encauzar la gravedad y de dialogar con la luz, pueden distinguirse tres grandes maneras de concebir el proyecto arquitectónico. Por un lado, se encuentran aquellos proyectos ideados como estructuras estereotómicas atravesadas por la luz. Por otro lado, algunos proyectos se plantean como ligeras tramas tectónicas donde la luz tiene que velarse de alguna manera. Por último, determinados proyectos están basados en la voluntad de expresar en las distintas partes de una misma obra, las nociones de lo tectónico y lo estereotómico.

1.2.2.3.1. La revelación de la estructura

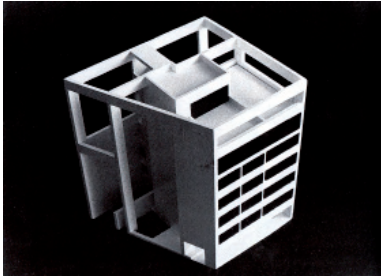
Desde sus primeras experiencias profesionales, Campo Baeza demuestra ya un cierto interés por mostrar, explícitamente, los elementos estructurales sobre los que se soportan sus obras ³². Así, en proyectos como el *Colegio oficial de arquitectos de Sevilla* (1976), la *Guardería pública de Aspe* (1982) o el *Pabellón escolar de servicios de Aluche* (1984), el arquitecto sustrae determinadas partes del volumen proyectado en lugares estratégicamente ubicados, generalmente en las esquinas, con la finalidad de dejar al descubierto los pilares y las jácenas que constituyen la estructura.

32. A continuación sigue una relación de obras y proyectos de la primera etapa profesional de Campo Baeza donde ciertos elementos estructurales quedan manifiestamente expuestos tras someter la volumetría a ciertas operaciones de sustracción o adición volumétrica: *Proyecto para el Colegio oficial de arquitectos de Sevilla* (1976); *Proyecto Casa Balseiro en Madrid* (1976); *Ayuntamiento de Fene en La Coruña* (1980); *Guardería pública en Onil, Alicante* (1982); *Guardería pública en Aspe, Alicante* (1982); *Escuela pública en San Sebastián de los Reyes, Madrid* (1983); *Pabellón escolar de servicios en Aluche, Madrid* (1984).

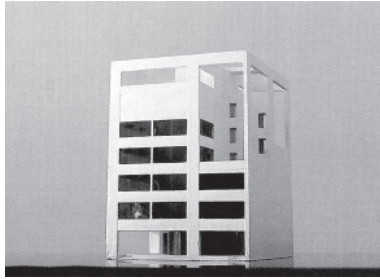
No obstante, en proyectos como en el *Ayuntamiento de Fene* (1980) o en la *Guardería pública de Onil* (1982) se procede de manera opuesta, pues de la compacta volumetría principal se proyectan, hacia el exterior, ciertos elementos arquitectónicos que muestran una clara caracterización estructural. Tanto en unos casos como en otros se observa en la obra una gran unidad material, ya sea mediante el empleo del estuco blanco, ladrillo u hormigón visto, que impide la distinción o la caracterización de los elementos estructurales verticales y horizontales mediante la abstracción formal y material.

Durante este periodo, Campo Baeza también centra su atención en la expresión de la relación entre la carga y el soporte en determinados elementos estructurales. Tal es el caso, por ejemplo, del *Centro preescolar de San Sebastián de los Reyes* (1984), la *Tienda de Jesús del Pozo* también (1988) o la *Biblioteca pública de Orihuela* (1992), donde los soportes son concebidos como columnas telescópicas de diferentes esbelteces. Es una realidad que, por efecto de su propio peso, las partes inferiores de la columna se ven sometidas a mayores cargas que las superiores. Por tanto, si se pretende que a mayor carga los esfuerzos internos sean los mismos, la sección del soporte debe verse aumentada. Parece poder entenderse así el hecho de que el diámetro de dichas columnas sea mayor en la base que en sus tramos superiores. No obstante, en caso de ser cierta la suposición aquí aventurada, sería manifiesta la desproporción entre las diferencias de sección observables en los distintos tramos del soporte y las diferencias de carga que pueden derivarse del peso propio de la columna.

Con independencia de la formalización de estos soportes, deben advertirse las consecuencias espaciales que tiene, tanto en el proyecto del pabellón preescolar como en el de la tienda, la disposición central de un soporte único. Mediante esta sencilla operación, la columna no solamente se encarga de transmitir la gravedad, sino que ordena también el espacio dispuesto a su alrededor. Esta simple decisión proyectual parece anticipar la reflexión realizada más tarde por el propio arquitecto sobre la capacidad de la estructura portante de ordenar el espacio.



F.10



F.11

F.10. Alberto Campo Baeza. *Colegio de Arquitectos*, Sevilla (1976). CAMPO BAEZA, Alberto: *Campo Baeza*. Madrid: Munilla-Lería, 1999, p. 186

F.11. Alberto Campo Baeza. *Ayuntamiento de Fene*, La Coruña (1980). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 37



F.12



F.13

F.12-13. Alberto Campo Baeza. *Ayuntamiento de Fene*, La Coruña (1980). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 43



F.14



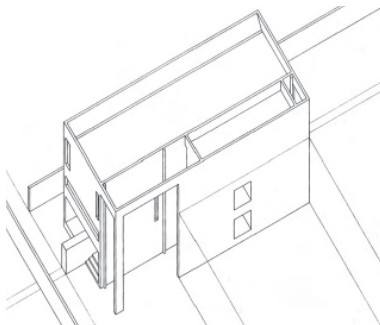
F.15

F.14. Alberto Campo Baeza. *Guardería pública en Onil*, Alicante (1982). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 52

F.15. Alberto Campo Baeza. *Guardería pública en Onil*, Alicante (1982). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 46



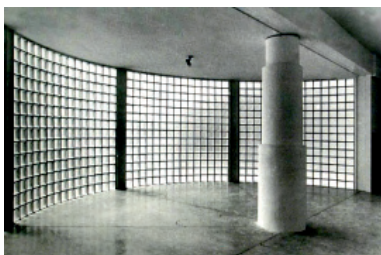
F.16



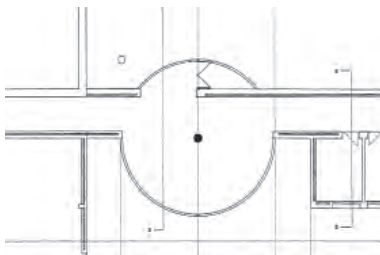
F.17

F.16-17. Alberto Campo Baeza. *Pabellón escolar de servicios en Aluche*, Sevilla (1984). CAMPO BAEZA, Alberto: *Campo Baeza*. Madrid: Munilla-Lería, 1999, pp. 136-137

F.18-19. Alberto Campo Baeza. *Centro preescolar en San Sebastián de los Reyes*, Madrid (1984). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 59 y 61



F.18

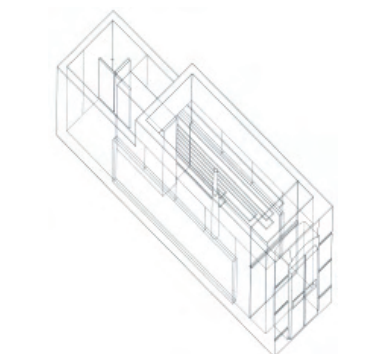


F.19

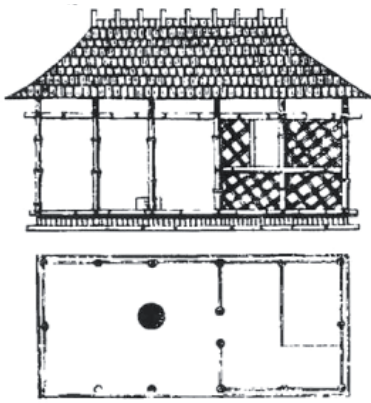
F.20-21. Alberto Campo Baeza. *Tienda Jesús del Pozo*, Madrid (1988). CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 79



F.20



F.21



F.22. Cabaña primitiva de Arima, cerca de Puerto de España, en Trinidad. Expuesta en el Crystal Palace en 1851. FRAMPTON, Kenneth: *Labour, work and architecture: collected essays on architecture and design*. London: Phaidon, 2002, p. 97.

33. "Los cuatro elementos de Semper, corroborados por la evidencia de la cabaña caribeña que había visto en la Exposición del Palacio de Cristal en 1851, representan una ruptura fundamental con la tríada vitruviana de utilitas, firmitas, venustas". FRAMPTON, Kenneth: *Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX*. Madrid: Akal, 1999, p. 90. *Sobre la tríada vitruviana, ver el apartado I-4.1.1. Las tres partes de la arquitectura.*

34. "Así pues, de las más inmediatas necesidades surgen cuatro elementos de la edificación primitiva: el techo, el dique, la cerca y, como centro espiritual del conjunto, el fuego social". *Los elementos básicos de la arquitectura, capítulo tercero: primeros elementos de la vivienda*. HERNÁNDEZ DE LEÓN, Juan Miguel: *La Casa de un solo muro*. Madrid: Nerea, 1990, p. 120. *En lengua castellana se han empleado varios sinónimos para cada uno de los elementos, que se enumeran a continuación: 1) techo, armazón, tejado; 2) dique, terraplén, basamento, montículo, podio; 3) cercado, recinto, cerramiento, tabique; 4) fuego, hoguera, hogar.*

35. "Semper asignó ciertas cualidades tectónicas a cada uno de los cuatro elementos: los textiles pertenecían al arte del cerramiento y a los muros laterales y tejados; la carpintería al esqueleto básico estructural; la mampostería al basamento; la metalurgia y cerámica al hogar". FRAMPTON, Kenneth: *Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX*. Madrid: Akal, 1999, p. 91

I.2.2.3.2. El belvedere tectónico sobre el podio estereotómico

A partir de una cabaña caribeña observada por Semper en la *Gran Exposición* de 1851, el arquitecto alemán propone, en su "Die vier elemente der baukunst" (*Los cuatro elementos de la arquitectura*, 1850-52), una contra-hipótesis antropológica a la neoclásica cabaña primitiva formulada por Marc-Antoine Laugier (1713-1769) en "Essai sur l'architecture" (*Ensayo sobre arquitectura*, 1753). En base a la cabaña observada en la exposición, Gottfried Semper reemplaza la clásica tríada vitruviana de la *utilitas*, la *firmitas* y la *venustas*³³, sobre la que se había estructurado la teoría arquitectónica de los últimos siglos, en favor de un esquema elemental cuatripartito: el *hogar*, el *terraplén*, el *techo* y el *recinto*³⁴.

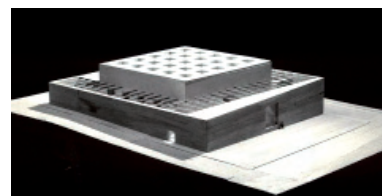
Según Frampton, el elemento de *terraplén* puede identificarse con una noción más arquitectónica como es el *podio*, relacionado con la mampostería. El elemento *techo* puede ampliarse a todo el *armazón estructural*, perteneciente al ámbito de la carpintería. Y el elemento *recinto* puede referirse a una noción más general como es el *cerramiento*, vinculado originalmente al arte textil³⁵. En opinión de Frampton, estos tres elementos semperianos "dan origen a todo un discurso del que podemos decir que se expresa en términos de *pesado vs. ligero*"³⁶, pues tanto el armazón estructural como el cerramiento se identifican con la ligereza de la tectónica, mientras que el podio se pertenece al ámbito de la pesadez estereotómica: "basándose en esta taxonomía, Semper clasificó las técnicas de la edificación según dos procedimientos fundamentales: la tectónica de la estructura, donde los ligeros componentes lineales están ensamblados como si abarcaran una matriz espacial y la estereotomía del basamento, donde masa y volumen se forman conjuntamente mediante el apilamiento repetido de los elementos más pesados"³⁷.

Así pues, Frampton considera que en toda obra de arquitectura tectónicamente bien planteada, debe existir, de algún modo, un basamento estereotómico sobre el que se pueda apoyar un entramado estructural tectónico, siendo la esencia de la arquitectura, precisamente, la transición sintáctica entre estas dos partes³⁸.

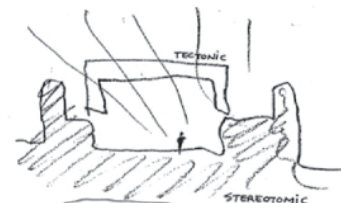
En base a estas consideraciones y después de su estancia en Zúrich junto a Frampton, Alberto Campo Baeza fundamenta gran parte de su obra en la articulación estructural entre el podio estereotómico y la estructura tectónica a través del concepto de *horizonte*³⁹. El establecimiento de un plano horizontal es, para Campo Baeza, “*un mecanismo, una situación, que se relaciona con los temas más básicos del hombre en su condición de ser físico dependiente de la ley de la gravedad, que no puede evitar. O mejor aún, que si la Arquitectura no puede dejar de contar con la gravedad como ingrediente necesario, la cuestión del plano horizontal seguirá siendo un tema ineludiblemente básico*”⁴⁰. Este plano horizontal puede servir de apoyo para la construcción de un techo y un recinto -dos elementos intrínsecamente tectónicos- tanto si se formaliza como un pesado podio estereotómico (basamento) o como un ligero podio tectónico (plataforma).

A principios de los años noventa, Campo Baeza explora distintas formas de expresión de lo tectónico y lo estereotómico a través del basamento y la trama estructural, como puede observarse en proyectos como el *Centro cultural de Villaviciosa de Odón* en Madrid (1992) o la *Filarmónica de Copenhague* (1993). No obstante, el arquitecto finalmente opta por articular estos elementos esenciales de la arquitectura tomando como referencia la depurada arquitectura de Mies van der Rohe⁴¹.

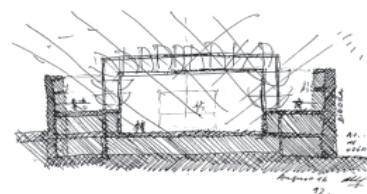
En 1990 proyecta la *Casa Dalmau* en Madrid, el primer proyecto donde se expresa ya, con claridad y rotundidad, la dicotomía entre lo tectónico y lo estereotómico. La vivienda se concibe como un volumen paralelepédico articulado en dos partes: un basamento pétreo de dos plantas de altura donde se sitúan los dormitorios, el comedor y la cocina, y un ligero belvedere tectónico a modo de sala de estar. El cuerpo inferior se concibe como una arquitectura masiva e introvertida con pequeñas aberturas hacia el exterior. El cuerpo superior se plantea como una arquitectura transitiva con la luz y las vistas al exterior, a modo de mirador. Esta casa inaugura una dilatada serie de proyectos y obras de viviendas unifamiliares donde, a pesar de plantear una y otra vez el mismo tema, el arquitecto ensaya ciertas variaciones formales en la relación entre el basamento y el belvedere⁴².



F.23. Alberto Campo Baeza. *Centro cultural en Villaviciosa de Odón*, Madrid (1992): Maqueta. CAMPO BAEZA, Alberto: *Campo Baeza*. Madrid: Munilla-Lería, 1999, p. 233



F.24. Alberto Campo Baeza. *Centro cultural en Villaviciosa de Odón*, Madrid (1992): Boceto tectónico/estereotómico. CAMPO BAEZA, Alberto: *Campo Baeza*. Madrid: Munilla-Lería, 1999, p. 230



F.25. Alberto Campo Baeza. *Centro cultural en Villaviciosa de Odón*, Madrid (1992): Dibujo de la sección. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 114



F.26. Alberto Campo Baeza. *Casa Dalmau*, Burgos (1990): Maqueta. www.campobaeza.com



F.27. Alberto Campo Baeza. *Casa Dalmau*, Burgos (1990): Croquis de la sección, tectónica y estereotomía. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 116

36. FRAMPTON, Kenneth: Reflexiones sobre la autonomía de la arquitectura: una crítica a la producción contemporánea, en *Criterios, La Habana*, nº 31, enero-junio 1994.

37. FRAMPTON, Kenneth: Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal, 1999, p. 16

38. "Semper enfatizó el basamento de este ensamblaje jerárquico, ya que se trataba de una masa topográfica estereotómica sobre la que se asentaba literalmente una estructura tectónica mucho más efímera. (...) El énfasis de Semper en el acto de unión supone una transición sintáctica fundamental que se expresa a medida que pasamos de la base estereotómica de un edificio a su estructura tectónica, una transición que es la auténtica esencia de la arquitectura". FRAMPTON, Kenneth: Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal, 1999, pp.91-92

39. "Con Semper y con Frampton diríamos que el horizonte es la misteriosa línea que separa el mundo estereotómico ligado a la tierra pesante del mundo tectónico ligado al cielo, a la luz". CAMPO BAEZA, Alberto: Pensar con las manos. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 21. El establecimiento de la arquitectura. Sobre la construcción del plano horizontal: el podio y la plataforma.

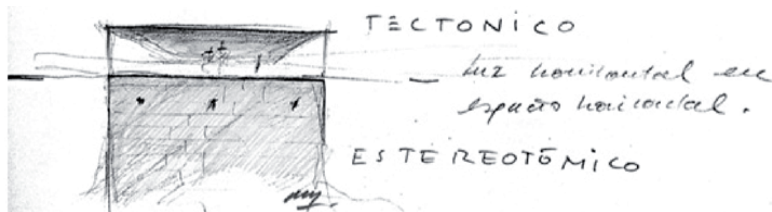
40. CAMPO BAEZA, Alberto: Pensar con las manos. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 21. El establecimiento de la arquitectura. Sobre la construcción del plano horizontal: el podio y la plataforma.

41. "Todos los proyectos de Mies manifiestan su empeño en crear este plano horizontal del que ya nunca se apeará. Y para ello utiliza dos vías de gran eficacia, según trabaje con ese plano como límite superior de un podio o como plano aislado flotante. En el primer caso podríamos hablar con terminología tomada de Semper del podio estereotómico. En el segundo caso de podio tectónico, o mejor todavía de plataforma". CAMPO BAEZA, Alberto: Pensar con las manos. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 22. El establecimiento de la arquitectura. Sobre la construcción del plano horizontal: el podio y la plataforma.

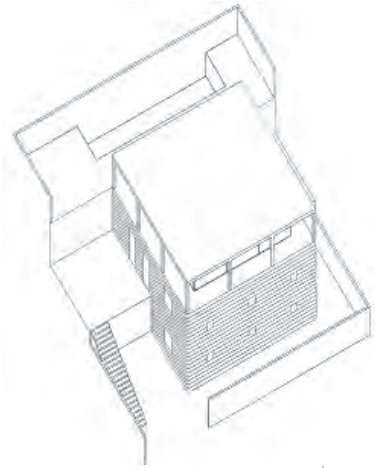
En la *Casa de Blas* de Madrid (2000) Campo Baeza consigue construir, con la mayor precisión, su idea estructural de la relación entre lo tectónico y lo estereotómico. Siguiendo el esquema funcional y conceptual de la *Casa Dalmau*, el proyecto se articula también en un estereotómico basamento de hormigón, masivo e introvertido con el paisaje y la luz, y un ligera estructura de acero⁴³ y cristal, transitiva con la luz y la visión del horizonte lejano. Dado que esta obra se concibe como la construcción de una idea planteada una década antes, las variaciones formales con respecto al proyecto anteriormente citado se derivan, simplemente, de las especificidades concretas del lugar y el programa.

En cambio, aunque conceptualmente es prácticamente idéntica a sus predecesoras, en la *Casa Olnick Spanu* de Nueva York (2007) sí se pueden apreciar ciertas variaciones en la formalización del belvedere. Si en los proyectos anteriores los soportes coinciden con el perímetro de la estructura de cubrición, aquí están retirados hacia el interior. Este hecho permite plantear que la sección del soporte sea circular y no cuadrada. Además, mientras que en los dos proyectos anteriores el cerramiento vítreo queda siempre por detrás de los pilares, todos ellos exteriores, ahora esta relación se produce con mucha más libertad pues, mientras que una hilera de columnas queda en el exterior, a poca distancia del vidrio, la otra hilera queda dentro del recinto acristalado.

En los proyectos anteriores la estructura tectónica superior se concibe siempre en acero, mientras que el basamento estereotómico inferior se plantea en piedra u hormigón armado. Así, de acuerdo a los planteamientos de Frampton, se produce una distinción material entre ambas partes del proyecto. No obstante, en la *Casa Rufo* de Toledo (2010) Campo Baeza indaga en la posibilidad de dotar al conjunto de una fuerte unidad material mediante el empleo de hormigón armado en la totalidad de la construcción. Desaparece así la articulación matérico-estructural entre lo tectónico y lo estereotómico. Esta unidad material, en conjunción con la situación perimetral de los pilares del belvedere y ciertas operaciones de sustracción material recuerdan a algunas operaciones proyectuales realizadas por el arquitecto durante la década de los ochenta⁴⁴.



F.28. Alberto Campo Baeza. *Casa Dalmau*, Burgos (1990): Croquis tectónico y estereotómico. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 84



F.29



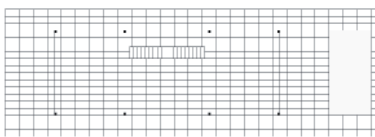
F.29. Alberto Campo Baeza. *Casa Dalmau*, Burgos (1990): Axonometría del volumen. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 84



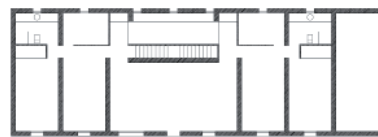
F.31

F.30. Alberto Campo Baeza. *Casa de Blas en Sevilla la Nueva*, Madrid (2000): Boceto tectónico/estereotómico. BLANCO, Manuel: *Campo Baeza: light is more*. Madrid: T.F., 2003, p. 115

F.31-33. Alberto Campo Baeza. *Casa de Blas en Sevilla la Nueva*, Madrid (2000): Sección y plantas. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, p. 83



F.32



F.33

F.34. Alberto Campo Baeza. *Casa de Blas en Sevilla la Nueva*, Madrid (2000): Imagen exterior: basamento y belvedere. BLANCO, Manuel: *Campo Baeza: light is more*. Madrid: T.F., 2003, p. 119

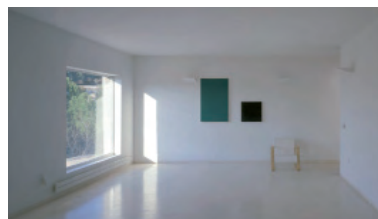


F.34

F.35. Alberto Campo Baeza. *Casa de Blas en Sevilla la Nueva*, Madrid (2000): Imagen del espacio del belvedere con vistas al horizonte. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, p. 84



F.35



F.36

F.36. Alberto Campo Baeza. *Casa de Blas en Sevilla la Nueva*, Madrid (2000): Imagen del espacio interior del basamento. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, p. 84



F.37



F.38

F.37. Alberto Campo Baeza. *Casa Olnick Spanu*, Nueva York (2007): Imagen exterior del belvedere. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, p. 171

F.38. Alberto Campo Baeza. *Casa Rufo*, Toledo (2010): Imagen exterior. www.campobaeza.com

Aunque hasta aquí se ha repasado la articulación estructural entre el basamento estereotómico y el belvedere tectónico en algunos proyectos y obras de viviendas unifamiliares, lo cierto es que esta relación se produce, también, en proyectos con programas y dimensiones muy diversas. Es en el proyecto de *Oficinas para la Universidad Pompeu Fabra* en Barcelona (1996) donde Campo Baeza se plantea, por vez primera, la construcción de un pequeño belvedere en la cumbre de un edificio de cierto tamaño. Años más tarde, el arquitecto construye esta idea en la *Delegación provincial de salud de Almería* (2002), un edificio de siete plantas con apariencia pétreo en toda su altura rematado con un ligero belvedere metálico, operación que se repite en la *Sede central de la editorial SM* en Madrid (2003). No obstante, a pesar de las similitudes formales entre los belvederes de las viviendas unifamiliares y los de estos proyectos, existe una gran diferencia entre unos y otros: los primeros albergan una función fundamental en el uso de la vivienda, mientras que la utilidad de los segundos no es tan evidente, hecho que parece relegarlos a un papel secundario casi icónico en el conjunto de la obra.

En proyectos como el *Centro de innovación tecnológica en Inca* en Mallorca (1998) o la *Junta de Castilla y León* en Zamora (2010) Campo Baeza plantea una cierta variación en la manera de articular lo tectónico y lo estereotómico basada en el concepto miesiano de las *casas patio*. Mediante un pesado muro pétreo se construye un recinto donde se disponen, sobre un sótano de marcado carácter estereotómico, unas estructuras tectónicas que, en cada proyecto, presentan ciertas variaciones en las relaciones que se establecen entre sus tres principales elementos: los soportes, los recintos acristalados y el techo.

En todos estos proyectos Alberto Campo Baeza trabaja con la noción de *espacio horizontal*, un espacio definido por la opacidad de los planos de suelo y techo y por la *luz horizontal*⁴⁵ que penetra entre ambos planos a través de la transparencia del cerramiento vertical. Una arquitectura de aire miesiano construida con los mínimos elementos necesarios.

42. La lista de proyectos y obras en los que Campo Baeza plantea de algún modo la relación estructural entre el basamento y el belvedere sería demasiado larga, de modo que en este breve apartado se ha optado por repasar únicamente los más significativos.

43. En este proyecto, igual que en otros, la materialidad aparente de la obra no siempre se corresponde con su realidad constructiva. Por ejemplo, en los belvederes tectónicos los soportes sí son metálicos, pero el techo se resuelve con placas alveolares pretensadas de hormigón (como ocurre en la Casa de Blas). Del mismo modo, aunque en las plantas de los podios estereotómicos se representan las divisiones interiores con el mismo grafismo que los muros de hormigón armado del perímetro, en realidad están contruidos con placas de cartón-yeso, entre los que se esconden los pilares metálicos de la estructura superior (como ocurre en la Casa Olnick Spanu).

44. Ver apartado I-2.2.3.1. La revelación de la estructura.

45. En el texto *Architectura sine luce nulla architectura est* (1992) Campo Baeza distingue tres tipos de luz, según su dirección: "El tipo de LUZ, HORIZONTAL, VERTICAL o DIAGONAL, depende de la posición del SOL respecto a los planos que conforman los espacios tensados por esa LUZ. La LUZ HORIZONTAL la producen los rayos del SOL al penetrar a través de perforaciones en el plano vertical. La LUZ VERTICAL, al entrar por huecos practicados en el plano horizontal superior. La LUZ DIAGONAL, al atravesar tanto el plano vertical como el plano horizontal". CAMPO BAEZA, *Alberto: La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, p. 60



F.39



F.40

F.39-40. Alberto Campo Baeza. *Delegación provincial de salud*, Almería (2002): Edificio estereotómico, belvedere tectónico. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, p. 120



F.41



F.42

F.41-42. Alberto Campo Baeza. *Delegación provincial de salud*, Almería (2002): Belvedere. <http://www.flickr.com/photos/campobaeza/>

F.43. Alberto Campo Baeza. *Sede central de la editorial SM*, Madrid (2003). www.campobaeza.com

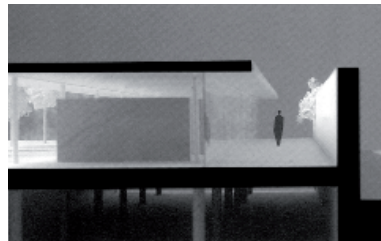


F.43

F.44. Alberto Campo Baeza. *Centro de innovación tecnológica en Inca*, Mallorca (1998): vista aérea. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 128



F.44



F.45

F.45. Alberto Campo Baeza. *Centro de innovación tecnológica en Inca*, Mallorca (1998): maqueta. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 128

F.45. Alberto Campo Baeza. *Casa de Blas en Sevilla la Nueva*, Madrid (2000): Imagen del espacio del belvedere con vistas al horizonte. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, p. 84



F.46



F.47

F.46-47. Alberto Campo Baeza. *Centro de innovación tecnológica en Inca*, Mallorca (1998): imagen del interior del recinto. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, pp. 130-131

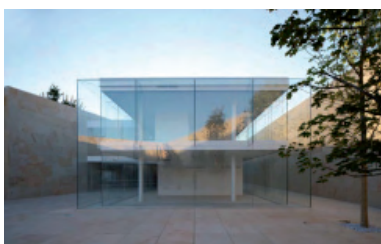


F.48



F.49

F.48. Alberto Campo Baeza. *Junta de Castilla y León*, Zamora (2010): Imagen aérea. www.campobaeza.com



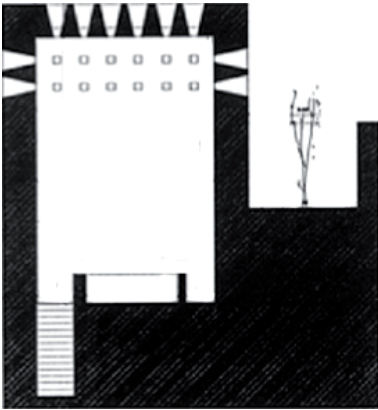
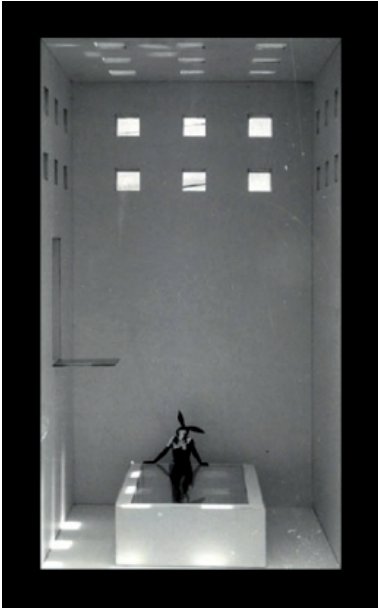
F.50



F.51

F.49. Alberto Campo Baeza. *Junta de Castilla y León*, Zamora (2010): Sección. www.campobaeza.com

F.49-50. Alberto Campo Baeza. *Junta de Castilla y León*, Zamora (2010): Imágenes del interior del recinto. www.campobaeza.com



F.52. Alberto Campo Baeza. *Museo Elsa Peretti*, Girona (1996): Secciones. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Piza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 139



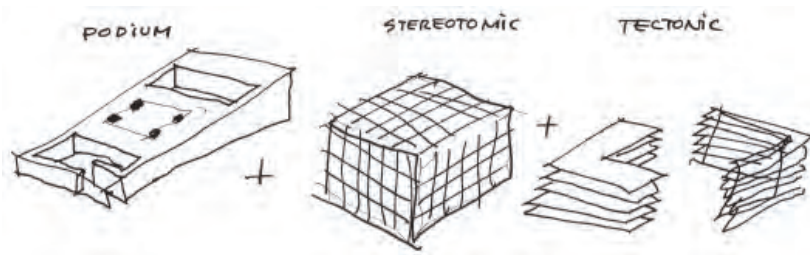
F.53. Alberto Campo Baeza. *Guardería Benetton*, Italia (2007): Imagen del vestíbulo y sección. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, pp. 161-166

1.2.2.3.3. La masa estructural estereotómica atravesada por la luz

Campo Baeza concibe algunos de sus proyectos únicamente a partir de la idea de lo estereotómico. En estos casos, una pesada envolvente estructural de hormigón armado porta y soporta la gravedad y, al mismo tiempo, conforma el espacio, produciéndose una enorme unidad entre la estructura, la forma y el espacio. La luz cualifica este espacio interior e introvertido desde lo alto, a través de una serie de perforaciones de geometrías y disposiciones diversas y específicas para cada proyecto.

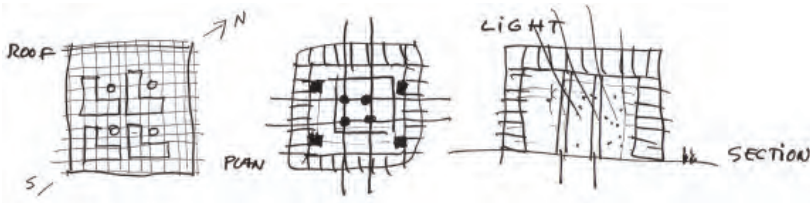
Aunque Campo Baeza ha trabajado en esta idea a lo largo de su carrera en proyectos como el *Museo Elsa Peretti de Sant Martí Vell* en Girona (1996) o la *Guardería Benetton en Treviso* (2007) -entre otros-, es en la *Sede central de la Caja General de Ahorros de Granada* (1992-2001) donde esta idea se materializa con mayor rotundidad. Sobre un basamento donde se alojan los archivos y el aparcamiento se dispone el gran volumen semicúbico (57x57x36m.) de hormigón armado que, además de albergar las oficinas, se concibe como un artefacto estereotómico con el que atrapar la luz en su interior. Este volumen de planta cuadrada se orienta disponiendo sus diagonales sobre los ejes norte-sur y este-oeste. Todo el programa se organiza en torno a un gran vacío central desplazado sobre el eje norte-sur en dirección norte, dando lugar a dos zonas en “L” de distintas anchuras soportadas por una ligera estructura tectónica de columnas de acero. Las dos fachadas a sur se conciben como una retícula de 3x3x3m. de hormigón cuya profundidad es capaz de matizar la dureza de la luz de mediodía. En cambio, la difusa luz de norte hace innecesario dotar de tal profundidad a las dos fachadas opuestas, que se resuelven con un cerramiento de piedra y vidrio enrasado con la retícula estructural.

En el interior, cuatro grandes columnas de tres metros de diámetro soportan la cubierta enorme cubierta, constituida por un entramado de cerchas metálicas recubiertas de hormigón que conforma un encasetonado de 6x6x3m. En ella se disponen tres grupos de tres lucernarios orientados en la dirección norte-sur. Atravesando las grandes jácenas de cubierta y las enormes columnas, la luz penetra



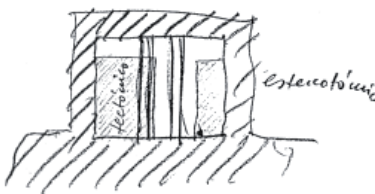
Alberto Campo Baeza. *Sede central de la Caja General de Ahorros de Granada*, Granada (1992-2001):

F.54. Esquema tripartito: podio, envolvente estereotómica e interior tectónico. BLANCO, Manuel: *Campo Baeza: light is more*. Madrid: T.F., 2003, p. 67

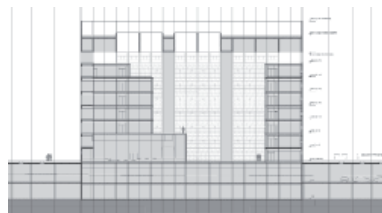


F.55. Croquis de idea: diagonalidad y cubierta, geometría estructural de la planta y sección atravesada por la luz. BLANCO, Manuel: *Campo Baeza: light is more*. Madrid: T.F., 2003, p. 67

F.55 F.56-57. Sección. BLANCO, Manuel: *Campo Baeza: light is more*. Madrid: T.F., 2003, pp. 67 y 69

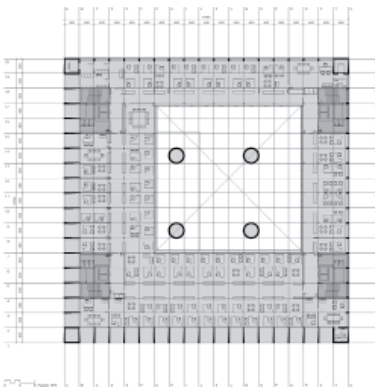


F.56

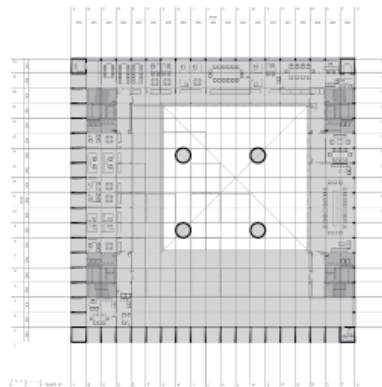


F.57

F.58-59. Planta tipo y planta altillo (con proyección de los lucernarios). DAS NEVES, José Manuel: *Caja General de Ahorros, Granada: Alberto Campo Baeza*. Madrid: Iberica Estar Books, 2003, pp. 39-40



F.58

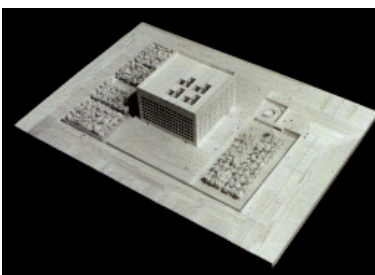


F.59

F.60. Maqueta del conjunto. DAS NEVES, José Manuel: *Caja General de Ahorros, Granada: Alberto Campo Baeza*. Madrid: Iberica Estar Books, 2003, p. 6

F.61. Imagen exterior, fachadas a sur. Estudio Alberto Campo Baeza.

F.62. Imagen del "impluvium de luz". Estudio Alberto Campo Baeza.



F.60



F.61



F.62

hacia el interior del gran espacio central, concebido como un “impluvium de luz” que dota de luz difusa al anillo de oficinas.

En esta imponente obra, Campo Baeza consigue llevar hasta sus últimas consecuencias el diálogo que se establece entre la gravedad y la luz a través de la estructura arquitectónica: “*se descubre entonces, precisa y preciosa coincidencia, que la Luz es la única que de verdad es capaz de vencer, de convencer a la Gravedad. Y así, cuando el arquitecto le pone las trampas adecuadas al Sol, a la Luz, ésta, perforando el espacio conformado por estructuras que, más o menos pesantes, necesitan estar ligadas al suelo para transmitir la primitiva Fuerza de la Gravedad, rompe el hechizo y hace flotar, levitar, volar a ese espacio*”⁴⁶.

1.2.2.3.4. La tectónica de la trama estructural translúcida

Mientras que en el apartado anterior se ha mostrado una arquitectura eminentemente estereotómica, Campo Baeza ha concebido también obras basadas solamente en la ligereza y la luminosidad de la tectónica, soportadas por livianas tramas estructurales de acero y cristal tan permisivas con el paso de la luz que se hace necesario algún mecanismo de control translúcido.

Antes de ponerse en contacto con la teoría de Semper y Frampton en la E.T.H., Campo Baeza se había interesado ya por este tipo de arquitecturas en algunos de sus primeros proyectos docentes, entre los cuales cabe destacar la *Escuela pública de San Fermín* en Madrid (1985). Alberto Campo plantea aquí la construcción de un cuerpo de planta circular y triple altura donde se ubican la escalera y los servicios del centro escolar. Este cuerpo circular se conforma mediante un entramado estructural de acero en cuyos huecos se dispone, a fin de obtener una luz difusa y adireccional en el interior, un paramento de bloques de vidrio. La definición formal de la escalera se confía también a la construcción de un entramado estructural plano en cuyo interior se dispone una fina malla metálica que, siendo transitiva con la luz y la visión, garantiza s seguridad de uso.

46. CAMPO BAEZA, Alberto: La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, p. 57. *Architectura sine luce nulla architectura est. Sobre la luz (1992)*



F.63



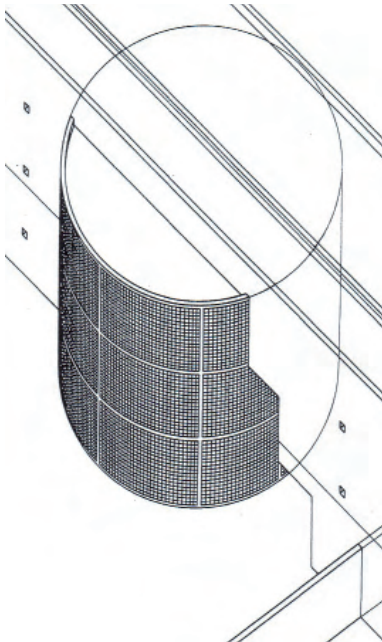
F.64

Alberto Campo Baeza. *Escuela pública de San Fermín*, Madrid (1985):

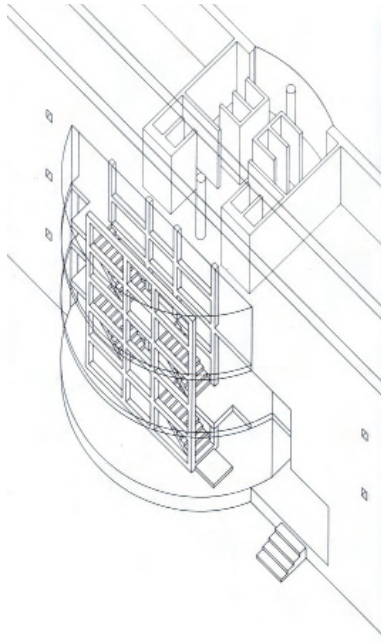
F.63. Dibujo del espacio interior. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, p. 24

F.64. Imagen de la trama de acero y pávez. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 67

F.65-66. Axonometrías donde se pueden apreciar las dos tramas de luz: la exterior cilíndrica de la fachada y la interior plana de la escalera. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, pp. 65-66



F.65



F.66

F.67-68. Tramas estructurales. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 66 / CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009, p. 26



F.67



F.68

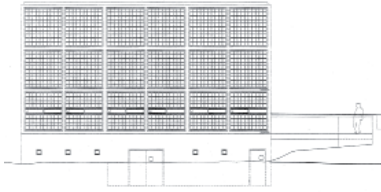
Aunque de geometría semicúbica, Campo Baeza construye el *Gimnasio Leonardo Da Vinci en Majadahonda* (1997) en base a estos mismos principios tectónicos. Se incorpora aquí la reflexión sobre la combinación de transparencia y translucidez en los paramentos de fachada, ensayada previamente en el *Proyecto para las oficinas de la Universidad Pompeu Fabra en Barcelona* (1996). No obstante, a pesar de que el volumen del gimnasio queda definido por una retícula metálica isotrópica, sólo se permite el ingreso de luz por los paramentos verticales de bloques de vidrio, y no por la cubierta, que se concibe totalmente opaca.

Esta solución se ve invertida en la *Biblioteca pública de Orihuela* en Alicante (1992), donde el vacío construido como articulación del edificio existente con el de nueva planta se cubre con una ligera estructura metálica triangulada y acristalada soportada por unos esbeltos pilares telescópicos. Así, al contrario que en el gimnasio, la luz ingresa aquí únicamente por el transparente plano de cubierta, siendo el resto paramentos totalmente opacos. Campo Baeza advierte la necesidad de poder controlar la cualidad y la intensidad de esta luz cenital, para lo que dispone un sistema de toldos textiles retráctiles.

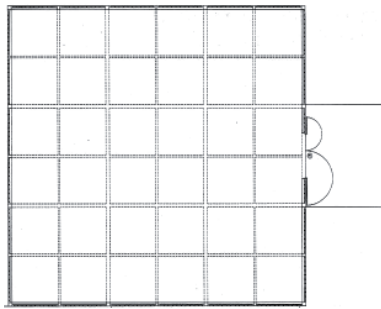
En el proyecto de concurso para el *Aeropuerto Porta de Milano* (2009) Campo Baeza incorpora gran parte de las reflexiones realizadas hasta el momento en torno a las posibilidades tectónicas de la trama estructural de luz. El volumen principal se concibe como una gran caja de luz de 30x60 m. en planta y 45 m. de altura, soportada por una ligera estructura metálica banca de tres metros de profundidad. A ambos lados de esta estructura se plantea una piel de vidrio translúcido, de modo que toda la envolvente se concibe como una doble piel de cristal capaz de atrapar la luz y convertirla en una luz difusa y homogénea. Sin embargo, esta homogeneidad lumínica del interior se ve afectada por las perforaciones circulares transparentes previstas en esta doble piel a fin de que la luz sólida del Sol penetre en el espacio.



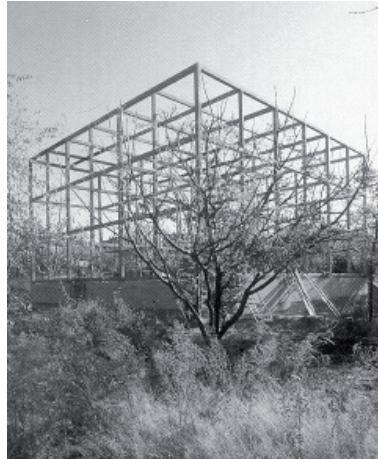
F.69



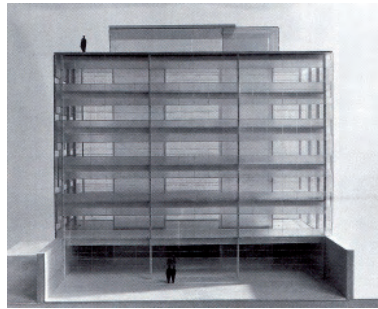
F.70



F.71



F.72



F.73



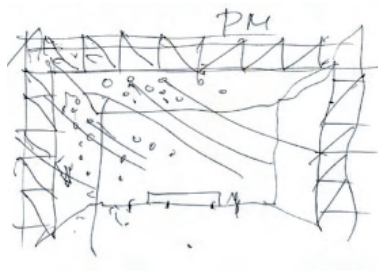
F.74



F.75



F.76



F.77



F.78



F.79

F.69. Alberto Campo Baeza. *Gimnasio Leonardo Da Vinci*, Majadahonda (1997): Maqueta interior. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 142

F.70-71. Alberto Campo Baeza. *Gimnasio Leonardo Da Vinci*, Majadahonda (1997): Alzado y planta. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 143

F.72. Alberto Campo Baeza. *Gimnasio Leonardo Da Vinci*, Majadahonda (1997): Estructura en construcción. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 143

F.73. Alberto Campo Baeza. *Oficinas Universidad Pompeu Fabra*, Barcelona (1996): Maqueta. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 136

F.74-75. Alberto Campo Baeza. *Biblioteca pública en Orihuela*, Alicante (1992): Imágenes del espacio interior, cubierto por una ligera estructura de acero y cristal protegida por toldos retráctiles. CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, pp. 112, 114

F.76. Alberto Campo Baeza. *Biblioteca pública en Orihuela*, Alicante (1992): Vista aérea de la cubrición del patio. www.bingmaps.com

F.77. Alberto Campo Baeza. *Aeropuerto Porta Milano*, Italia (2009): Boceto en sección de la estructura y la luz. www.campobaeza.com

F.78. Alberto Campo Baeza. *Aeropuerto Porta Milano*, Italia (2009): Render del espacio interior cualificado por una luz difusa y tensado por la luz sólida. Estudio Campo Baeza.

F.79. Alberto Campo Baeza. *Aeropuerto Porta Milano*, Italia (2009): Boceto del interior. www.campobaeza.com

47. "La base material de la arquitectura nos lleva de nuevo a Newton. Recientemente me refiero mucho a él porque los dos temas que estudió fueron las leyes de la luz y la gravedad, son los dos temas en los que los arquitectos basamos nuestro trabajo". CAMPO BAEZA, Alberto: Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity. Tokyo: Toto, 2009, p. 238

"La g, el 9,8 que estudiara Isaac Newton con tanto ahínco, esa fuerza imposible de evitar, es una de las cuestiones clave de la Arquitectura". CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 63. (Cabe aclarar aquí que, a pesar de su interés por la gravedad, Isaac Newton no se preocupó por indagar en el valor de su aceleración. Esta labor corrió a cargo de Christiaan Huygens. Para más información ver el apartado II-3.4.2. La gravedad "descartada").

"Sí es la LUZ, con o sin teoría corpuscular [aquí se refiere Campo Baeza a la disputa entre la teoría corpuscular de Newton y la ondulatoria de Descartes-Huygens: ver apartados II-3.4.1. La luz como onda etérea y II-3.5.2. La luz corpuscular], algo concreto, preciso, continuo, matérico. Materia medible y cuantificable donde las haya, como muy bien saben los físicos y parecen ignorar los arquitectos". CAMPO BAEZA, Alberto: La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, p. 57

"La LUZ, cuantificable y cualificable como toda materia que se precie, puede ser controlada científicamente". CAMPO BAEZA, Alberto: La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, p. 59



F.80. Principia Architectonica de Campo Baeza, en alusión a los "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" (Principios matemáticos de la filosofía natural), donde Newton expone su teoría de la gravedad.

I.2.2.4. Arquitectura, física y Newton

En algunos de sus textos Alberto Campo Baeza alude a la física de Isaac Newton⁴⁷, célebre científico del siglo XVII especialmente interesado en el estudio de la naturaleza de la gravedad y de la luz, y autor de la famosa ley de gravitación universal y de la conocida teoría corpuscular de la luz⁴⁸. La alusión a la comprensión científica de la gravedad y de la luz por parte de un arquitecto especialmente interesado en ambos fenómenos resulta sin duda sugerente aunque, sin embargo, parece revelarse insuficiente. Por un lado, se echa de menos una mayor profundidad en la exposición de los conceptos físicos de Newton, en absoluto fáciles de comprender. Por otro lado, sorprende la alusión a unas teorías físicas elaboradas hace trescientos años, especialmente cuando la física del último siglo ha sido capaz de desarrollar teorías sobre la gravedad (la relatividad general) y sobre la luz (física cuántica) que han superado en claridad y precisión a las de Newton⁴⁹. Sin embargo, resulta especialmente interesante para el presente trabajo de investigación descubrir que, desde el ámbito de la arquitectura, existe un expreso interés en el conocimiento científico de la gravedad y de la luz.

I.2.3. NAVARRO BALDEWEG Y CAMPO BAEZA: LUZ Y GRAVEDAD

Las investigaciones teóricas y proyectuales sobre la luz y la gravedad desarrolladas por Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza durante las últimas décadas comparten determinados intereses y puntos de vista y, al mismo tiempo, difieren en algunas cuestiones.

Ambos arquitectos demuestran en sus investigaciones que *la gravedad* y *la luz*, lejos de ser realidades físicas autónomas e independientes, *son cuestiones sobre las que se debe reflexionar de manera conjunta*. Entre ambos fenómenos es posible establecer, desde un punto de vista arquitectónico, ciertas relaciones de contraposición ontológica que tienen consecuencias espaciales y estructurales: la estructura se convierte en un elemento arquitectónico fundamental en la concepción del espacio a través de la gravedad y de la luz.

Tanto Frampton como Campo Baeza no sólo reconocen a la estructura la ineludible función de transmitir y encauzar la gravedad, sino le exigen una cierta expresividad estático-resistente basada en una correcta relación visual y mecánica entre la carga y el soporte. Por su parte, Navarro Baldeweg mantiene que la contemplación de los fenómenos gravitatorios a través de la estructura debe causar una cierta emoción en el espectador y, para ello, potenciarla sensación de peso o de flotación en determinados elementos estructurales con la finalidad de despertar en el espectador la consciencia de pertenencia al hecho gravitatorio.

No obstante, a pesar de que generalmente se asocia a la estructura con la gravedad, debe tenerse en cuenta que, tal como advierte Louis I. Kahn, la luz no puede concebirse al margen de la estructura. Como que durante toda la historia de la arquitectura los materiales con que se han construido las estructuras han sido opacos, la luz sólo ha podido manifestarse en el interior del objeto arquitectónico ingresando a través de sus intersticios. Ello significa que en aquellas partes del objeto arquitectónico donde se manifiesta la gravedad no lo hace la luz, y viceversa. Así, si la razón de ser de la gravedad es la estructura, la de luz, en tanto que fenómeno opuesto a la gravedad, parece que deba ser su negativo, es decir, el espacio. De esta manera, y de acuerdo con arquitectos como Louis I. Kahn o Alberto Campo Baeza, espacio y estructura, luz y gravedad, se constituyen como una unidad indisoluble del hecho arquitectónico.

Siguiendo la estela de la filosofía de Schopenhauer y Goethe, y gracias a la tutoría de Gyorgy Kepes -artista enormemente interesado en aunar la ciencia y el arte-, Navarro Baldeweg concibe su obra como manera de aproximarse a la esencia de las leyes naturales estudiadas por la ciencia. Así, toda su producción artística y arquitectónica se basa en la voluntad de ahondar en la naturaleza física de la gravedad y de la luz, no a través de las explicaciones propias del método científico, sino a través de la manifestación artística de sus fenómenos. Por su parte, Campo Baeza también expresa, mediante algunas alusiones a las teorías de Newton sobre la gravedad y sobre la luz, un cierto interés por el conocimiento

48. Ver apartado II-3.5. Isaac Newton: éter, gravedad y luz.

49. Ver apartado II-4. La física moderna de los siglos XIX-XX

científico de ambas realidades físicas. Sin embargo, mientras que las investigaciones de Navarro Baldeweg se basan en la indagación fenomenológica de la naturaleza de la gravedad y de la luz a través de la pintura, la escultura y la arquitectura, las reflexiones de Campo Baeza se fundamentan en la tectónica y la estereotomía, nociones teóricas exclusivas del ámbito de la arquitectura.

La exploración proyectual de las implicaciones arquitectónicas de la luz y de la gravedad se produce a través de distintas estrategias formales en la obra de ambos arquitectos. Juan Navarro Baldeweg explora cuestiones tales como la ingravidez estructural de la luz mediante sus cúpulas flotantes, la capacidad de la estructura gravitatoria de modificar las cualidades lumínico-espaciales a través de sus lucernarios estructurales, o la contraposición entre las propiedades de lo gravitatorio y lo lumínico mediante la construcción de pesados y opacos núcleos estructurales envueltos por ligeras y translúcidas pieles de cerramiento. Por su parte, en algunos proyectos Alberto Campo Baeza explora las cualidades asociadas a la luz -como la ligereza y la translucidez- mediante el uso de la trama estructural, mientras que, en otros proyectos, ahonda en las cualidades vinculadas a la gravedad -como la pesadez y la opacidad- a través de la masa estructural. Así pues, ambos arquitectos se esfuerzan por manifestar arquitectónicamente, de una manera u otra, la contraposición lo lumínico y lo gravitatorio, coincidiendo ambos arquitectos en la expresión de estas diferencias a través del esquema bipartito del podio y el belvedere en varias de sus obras.

No obstante, a pesar de la profundidad conceptual, la proliferación proyectual y la dilatación temporal de las investigaciones desarrolladas por ambos arquitectos durante las últimas décadas, sorprende que, en ningún caso, se haya intentado ahondar en los orígenes históricos del interés arquitectónico por las cuestiones relativas a la gravedad y a la luz, más allá de hacer referencia, en sus textos, a sus precedentes inmediatos. A esta tarea se dedica el siguiente capítulo, con la idea de que estas indagaciones conduzcan hacia una nueva manera de enfocar la comprensión de la importancia de la gravedad y de la luz en la arquitectura.

I.3. ORÍGENES DEL INTERÉS ARQUITECTÓNICO POR LA GRAVEDAD Y LA LUZ

Intentar rastrear la aparición y el desarrollo de las referencias a la luz y a la gravedad en los tratados de arquitectura a lo largo de toda la historia sería una labor de una complejidad tal que podría dar lugar, por sí misma, a la realización de toda una tesis doctoral. Advertida la imposibilidad de abarcar esta tarea, en este breve capítulo se ha querido centrar la atención en tres autores especialmente relevantes por su original y originaria aportación a la conceptualización de la luz y de la gravedad en la teoría arquitectónica, como son Marco Vitruvio, Christopher Wren y Arthur Schopenhauer⁰¹.

El análisis de los textos de estos autores permite recuperar algunas cuestiones obviadas u olvidadas en las investigaciones más recientes y que, sin embargo, parecen fundamentales e ineludibles para una profunda comprensión de los fenómenos de la luz y de la gravedad en relación a la arquitectura.

I.3.1. MARCO VITRUVIO: GNOMÓNICA Y MECÁNICA

El tratado más antiguo conservado sobre arquitectura, “De Architectura, Libri Decem” (*Los diez libros de arquitectura*⁰²) obra del romano Marco Vitruvio, contiene ya los primeros indicios de la importancia arquitectónica de la gravedad y de la luz.

Vitruvio empieza su tratado asegurando que “*la arquitectura es una ciencia adornada de otras muchas disciplinas y conocimientos*”⁰³. El hecho de que la antigua acepción del concepto de “ciencia” difiera de manera notable de su significado moderno, no resta importancia al hecho de que el tratadista romano prefiera referirse a la arquitectura como una ciencia y no como un arte. Entre las diversas disciplinas y conocimientos que, según Vitruvio, “adornan” a esta ciencia que es la arquitectura, interesa aquí destacar tres: la Filosofía, la Óptica y la Astrología⁰⁴.

01. Aunque es un tanto aventurado y a sabiendas de que con ello se adelantan los contenidos del presente capítulo, es posible esbozar en esta nota una cierta genealogía del interés arquitectónico por la gravedad y la luz a lo largo de la historia. En su tratado, Vitruvio vincula la arquitectura a la gnómica y la mecánica, disciplinas relacionadas con el conocimiento de la luz y de la gravedad respectivamente. En base a los postulados vitruvianos, Christopher Wren, científico y arquitecto, relaciona la arquitectura con la óptica y la mecánica, dos ámbitos del conocimiento científico directamente relacionados con el estudio de la luz y de la gravedad. Tras Wren aparecen las revolucionarias teorías sobre la luz y la gravedad de Isaac Newton que, a pesar de su indiscutible éxito práctico, se demuestran totalmente incapaces de explicar su naturaleza. Ante esta situación, la filosofía alemana de la segunda mitad del siglo XVIII y la primera del siglo XIX se presenta, de la mano de pensadores como Immanuel Kant o Johann Wolfgang von Goethe, como el único instrumento capaz de ahondar en la naturaleza de las leyes naturales.

Arthur Schopenhauer, seguidor de la filosofía kantiana, relaciona de una manera explícita y definitiva la gravedad y la luz con la arquitectura. A través de Christian Weisse llegan las ideas de Schopenhauer a Karl Bötticher y a Gottfried Semper, ambos interesados en la tectónica. Ya en el siglo XX, Kenneth Frampton recupera las nociones de tectónica y estereotomía formuladas por Semper y Bötticher, y las vincula a la luz y a la gravedad. Alberto Campo Baeza formula su propia visión de la arquitectura en base a las reflexiones de Frampton.

Goethe, por su parte, tuvo una enorme influencia sobre las teorías artísticas que se formularon con posterioridad, especialmente en aquellos ámbitos del arte altamente sensibles a la luz. László Moholy-Nagy recibió las influencias de Goethe y las trasladó a Gyorgy Kepes. Éste a su vez, inculcó en Juan Navarro Baldeweg el interés por el arte de la fenomenología. Gracias a ello, Baldeweg incorpora las reflexiones sobre la luz y la gravedad a su quehacer artístico y arquitectónico.

02. Vitruvio vivió en el siglo I a.C., y se estima que el tratado fue terminado entre los años 20 y 10 a.C.

03. "Architecti est scientia pluribus disciplinis et variis eruditionibus ornata". De Architectura, Libri Decem, *Liber Primus, Capítulo I (De la esencia de la Arquitectura e instituciones de los Arquitectos)*, núm. 1. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ROSE, Valentinus: Vitruvii de Architectura, Libri Decem. Lipsiae (Leipzig): in aedibus B.G. Teubner, 1867, p. 2

04. "[El Arquitecto] deberá, pues, ser (...) inteligente en la Óptica, (...), Filósofo (...) y Astrólogo". De Architectura, Libri Decem, *Libro I, Capítulo I (De la esencia de la Arquitectura e instituciones de los Arquitectos)*, núm. 2. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p. 3.

05. "La Filosofía (...) trata también de la naturaleza de las cosas, que en Griego se llama Fisiología, la cual debe saberse con mayor cuidado, por contener muchas y varias cuestiones naturales". De Architectura, Libri Decem, *Libro I, Capítulo I (De la esencia de la Arquitectura e instituciones de los Arquitectos)*, núm. 5. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p. 4

06. De Architectura, Libri Decem, *Libro I, Capítulo I, núm. 12*. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p. 7

07. "Con la Óptica se toman en los edificios las mejores luces y de mejor parte". De Architectura, Libri Decem, *Libro I, Capítulo I, núm. 3*. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p. 4. En los capítulos VII (núm. 27-29) y IX (núm. 40) del Libro VI, Vitruvio describe las condiciones de luz que requieren distintos espacios de los edificios.

08. "Por la Astrología, finalmente, se conoce el oriente, occidente, mediodía, y septentrión: como también la constitución celeste, a saber, los equinoccios, solsticios, y curso de los astros; y de cuya noticia quien careciere, de ningún modo entenderá la Gnomónica". De Architectura, Libri Decem, *Libro I, Capítulo I, núm. 9*. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, pp. 5-6

Entre los motivos que expone el tratadista romano para explicar la importancia que la filosofía adquiere para el arquitecto está el hecho de que en ésta se incluye la *fisiología*, es decir, el estudio de la *naturaleza de las cosas*⁰⁵. Aunque en la actualidad se defina la "fisiología" como la ciencia que estudia las funciones de los seres orgánicos, debe tenerse en cuenta que en el contexto vitruviano la "física" aristotélica, cuya comprensión del cosmos se concebía a partir de la analogía con los seres vivos, estaba ampliamente extendida. Es lícito identificar, pues, la "fisiología" vitruviana con lo que más tarde recibirá el nombre de "filosofía natural", o "física", cuya máxima aspiración es, precisamente, el descubrimiento de la naturaleza de los fenómenos naturales.

Vitruvio considera importante también el conocimiento de la óptica por parte del arquitecto. La óptica es la parte de la física que estudia las leyes y los fenómenos de la luz y su nombre, tan directamente vinculado al fenómeno de la visión, se debe a que el interés de los filósofos griegos por los fenómenos de la luz tuvo como verdadera finalidad la explicación del fenómeno de la percepción visiva. De hecho, Vitruvio se refiere a estos estudiosos griegos como "*geómetras de la visión*" o "*logos ópticos*"⁰⁶. Así pues, Vitruvio considera de importancia para la arquitectura el conocimiento de la naturaleza y de los efectos de la luz⁰⁷.

Afirma el romano, además, que el correcto uso de la luz del sol en la arquitectura viene determinado, también, por los conocimientos sobre astrología que posea el arquitecto. Debe entenderse que, al referirse a la astrología, Vitruvio no alude a las predicciones o pronósticos realizados en base a los movimientos astrales, sino a una incipiente idea de la astronomía, gracias a la cual es posible comprender la mecánica celeste y, por tanto, la incidencia de la luz del sol sobre la tierra, hecho especialmente relevante para la vida y la arquitectura⁰⁸.

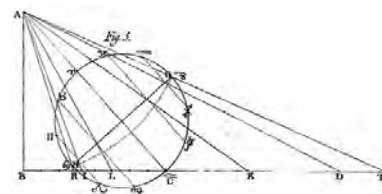
Sin embargo, debe reconocerse que, a pesar de incidir en la importancia de la filosofía, la óptica o la astrología, para Vitruvio éstos son ámbitos del conocimiento que, aunque importantes para el arquitecto, no forman parte de la *ciencia arquitectónica* como tal.

I.3.1.1. Las tres partes de la arquitectura

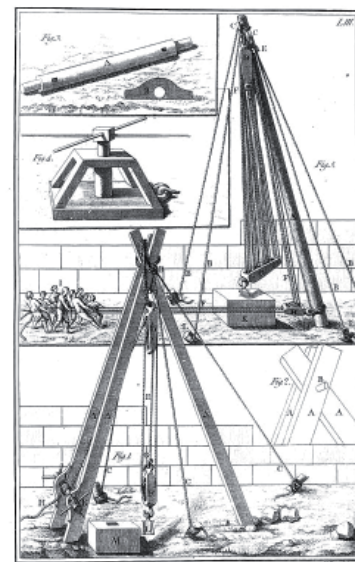
Con meridiana claridad, Vitruvio distingue en su tratado tres partes en la arquitectura: la Construcción, la Gnomónica y la Maquinaria (o Mecánica, según la traducción) ⁰⁹. Sin embargo, en su lectura del tratado romano, los arquitectos del Renacimiento y del Barroco no centraron su atención en este esquema tripartito de la arquitectura, sino en las tres propiedades que Vitruvio considera que deben exigirse a toda Construcción: la solidez o firmeza (*firmitas*), la utilidad o comodidad (*utilitas*), y la belleza o hermosura (*venustas*). Este hecho relegó a un segundo plano a la Gnomónica y a la Mecánica, dos cuestiones que, en el marco de la investigación aquí planteada, cobran un especial interés.

Vitruvio dedica el Libro IX a la Gnomónica, la “*ciencia que enseña el modo de hacer relojes solares*” ¹⁰, también llamados *gnomon*. Sin embargo, el interés del tratadista romano por esta ciencia no se debe a la construcción de estos relojes, sino a los conocimientos sobre astrología y óptica que se pueden obtener a través de la interpretación de la sombra proyectada por los gnomon. Mediante el estudio del movimiento de esta sombra es posible conocer el recorrido del Sol y el movimiento de la Luna y los planetas, así como la inclinación y orientación de los rayos solares sobre los distintos lugares de la tierra a lo largo del año con una gran exactitud. Con ello se consigue un enorme control de la luz solar, un conocimiento fundamental para la arquitectura ¹¹.

El Libro X del tratado está dedicado a la *Maquinaria (o Mecánica)*. Aunque trata también otros tipos de máquinas, Vitruvio se centra especialmente en la descripción y explicación de las máquinas *tractorias*, tanto civiles como bélicas, cuyo principal fin es mover, disparar, levantar o arrastrar grandes cuerpos pesados o *graves*. Aunque es fácil imaginar la importancia del uso de este tipo de máquinas en los edificios públicos, la construcción, la guerra o las infraestructuras romanas, nuestro interés por la mecánica vitruviana no radica tanto en estos usos prácticos, sino en su origen conceptual. Afirma Vitruvio que “*toda la Mecánica se funda en la naturaleza,*



F01. Delineación de las sombras proyectadas por un gnomon a lo largo del año según describe Vitruvio. VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987. (Facsimil de la edición original en Madrid: Imprenta Real, 1787). Lámina LII, figura 5.



F02. Máquinas tractorias descritas por Viruvio. VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987. (Facsimil de la edición original en Madrid: Imprenta Real, 1787). LIII, figuras 1 y 2.

⁰⁹. “Las partes de la arquitectura son tres: Construcción, Gnomónica y Maquinaria. La Construcción se divide en otras dos; una es la edificación de las murallas y obras públicas; y la otra la de las particulares. Los edificios públicos se dividen en tres clases: una pertenece a la defensa, otra a la religión, y otra a la comodidad. (...) Estos edificios deben construirse con atención a la firmeza, comodidad y belleza”. De Architectura, Libri Decem, Libro I, Capítulo III, núm. 22. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p. 14

“Partes ipsius architecturae sunt tres, aedificatio, gnomonice, machinatio. aedificatio autem divisa est bipertito, e quibus una est moenium et communium operum in publicis locis conlocatio, altera est privatorum aedificiorum explicatio. publicorum autem distributiones sunt tres, e quibus est una defensionis, altera religionis, tertia opportunitatis.(...) Haec autem ita fieri debent ut habeatur ratio firmitatis, utilitatis, venustatis”. VITRUVIO POLIÓN, Marco; ROSE, Valentinus: Vitruvii de Architectura, Libri Decem. Lipsiae (Lepzig): in aedibus B.G. Teubner, 1867, p. 15

¹⁰. Definición según la R.A.E.

11. En el Capítulo III, Vitruvio escribe: "En este libro explicaré la Gnomónica, cómo se halló ésta por medio de la sombra de un palo a los rayos del sol, y de qué modo crece y se contrae esta sombra". En el Capítulo IV (De la esfera y los planetas), afirma Vitruvio que: "Cosa es de la mente divina, y causa la mayor admiración a los que la consideran, el que la sombra equinoccial de un gnomon sea de una longitud en Atenas, de otra en Alejandría, de otra en Roma, diferente en Placencia y demás parajes del mundo: motivo por el cual son muy diversas las descripciones de los relojes en parajes diferentes, pues por la longitud de la sombra equinoccial se forman los analemas, de los cuales se toma delineación de las horas, con arreglo a la situación de los pueblos y sombra de su gnomon. El analema es una averiguación buscada por el curso del sol, y hallada por el aumento de la sombra desde el solsticio invernal; con la cual por razones arquitectónicas, y descripción de círculos, se vino a hallar el sistema del mundo. Llamo mundo al complejo de todas las cosas naturales, y de todas las esferas celestes con sus astros." Y luego explica el movimiento del cielo, los cinco planetas, el Sol y la Luna alrededor de la Tierra. En el Capítulo V, (Del curso del sol por los doce signos) Vitruvio expone el recorrido del Sol y sus efectos: "Diré ahora el modo con que el sol corriendo cada mes su signo, aumenta y disminuye los días y las horas". De Architectura, Libro Decem, Libro IX, Capítulo III núm. XIII y Capítulo IV núm. 1 y 21. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, pp. 214 y 221

12. De Architectura, Libro Decem, Libro X, Capítulo I, núm. 2. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p.238

13. De Architectura, Libro Decem, Libro IX, Capítulo IV, núm. 4. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p.216

tomando su origen del continuo giro del cielo que la amaestra y dirige. Reparemos y advertamos primeramente la esfera del sol y de la luna, y la naturaleza de los otros cinco planetas, los cuales si no girasen a manera de máquina, ni tendríamos luz en la tierra, ni la sazón de sus frutos. Habiendo pues nuestros mayores advertido la verdad de estas cosas, tomaron ejemplo de la naturaleza, e imitándola inducidos de estas cosas divinas, hallaron otras cómodas a la vida humana"¹². Es evidente que para Vitruvio la comprensión de la mecánica es fundamental, en tanto que ciencia que trata del equilibrio y del movimiento de los cuerpos. ¿Acaso no consiste la arquitectura en la disposición en equilibrio estático de las masas construidas sometidas a la acción gravitatoria? Cuando, refiriéndose a los planetas y las estrellas, Vitruvio afirma que "una misma fuerza les obliga a nacer y a ponerse continuamente"¹³ parece estar aludiendo, sin saberlo, a la gravedad.

Es evidente, pues, que en el tratado de arquitectura más antiguo conservado ya se intuyó la importancia fundamental de la luz y de la gravedad en la arquitectura. Y es importante advertir que esta percatación se produjo desde una consideración científica de la arquitectura, a través de la filosofía natural, la óptica, la gnomónica, la astronomía y la mecánica, es decir, a través de lo que actualmente recibe el nombre de conocimiento científico. Así pues, no debe extrañar que la comprensión de la importancia de la gravedad y de la luz en relación a la arquitectura surgiera, justamente, cuando a la teoría vitruviana se le adhirió una nueva manera de comprender la naturaleza de la gravedad y de la luz derivada de la revolución científica del siglo XVII.

I.3.2. CHRISTOPHER WREN: ÓPTICA Y ESTÁTICA

A principios del siglo XV, y tras no haber tenido noticia de la obra durante catorce siglos, Poggio Bracciolini (1380-1459) dio con el tratado de Vitruvio, el único texto sobre arquitectura escrito en la antigüedad que ha llegado a nuestros días. A partir de ese momento, "De Architectura" se convirtió en un referente de gran importancia

para la teoría arquitectónica, pues los autores renacentistas y barrocos basaron sus tratados en los postulados vitruvianos, ya fuera para darles continuidad o para cuestionar su validez. Sin embargo, tal y como se ha apuntado anteriormente, los tratadistas de entonces no centraron su atención en las tres partes que Vitruvio distinguió en la arquitectura *-aedificatio, gnomonice, machinatio-*, sino en su esquema tripartito de la construcción *-firmitas, utilitas, venustas-*. Hubo que esperar hasta el siglo XVII para que un hombre con vastos conocimientos en el campo de la física y con amplia experiencia en el terreno de la arquitectura, Sir. Christopher Wren, recuperara el interés de Vitruvio por la gravedad y por la luz.

El extraordinario talento del joven Wren se hace evidente en 1651 cuando, al graduarse en el Wadham College (Oxford), deja tras de sí medio centenar de “*nuevas teorías, invenciones, experimentos y mejoras mecánicas*”¹⁴ sobre astronomía, mecánica, estática, geometría, y también arquitectura y construcción, entre otras materias. Tales capacidades no escapan al profesor William Oughtred (1574-1660), que en el prefacio de la edición latina de su “*Clavis mathematicae*”, se refiere a Wren como “*un joven admirado por su talento que, cuando aún no tenía 16 años, enriqueció la astronomía, la gnomónica, la estática y la mecánica con brillantes invenciones*”¹⁵, conocimientos fundamentales, como apuntaba Vitruvio en su tratado, para la formación del arquitecto.

Aunque la temática de las investigaciones científicas que lleva a cabo durante los años siguientes es de carácter muy diverso, Wren centra la mayor parte de sus esfuerzos en el ámbito de la *astronomía*, especialmente en el estudio de Saturno y la libración lunar. Pronto advierte Wren que, para una profunda investigación en el ámbito de la astronomía, es necesario también el estudio de la *geometría*, la *mecánica* y la *óptica*. Realiza también en estos ámbitos importantes hallazgos como, por ejemplo, el descubrimiento de ciertas propiedades de algunas curvas geométricas, la formulación de las leyes del choque elástico, el estudio del fenómeno de la refracción de la luz para la mejora de la geometría lenticular de los telescopios, o el desarrollo de la teoría del fenómeno de la



F.03. Christopher Wren (1632-1723)

14. Para una lista completa del catálogo de Wren, ver WREN, Christopher: *Parentalia; or, Memoirs of the family of the Wrens (...)* chiefly of Sir Christopher Wren ... compiled by his son Christopher, now published by his grandson, Stephen Wren, with the care of Joseph Ames. London: T. Osborn, 1750, p. 198-199 o CROWTHER, James Gerald: *Founders of British science: John Wilkins, Robert Boyle, John Ray, Christopher Wren, Robert Hooke, Isaac Newton*. London: The Cresset Press, 1960, pp. 143-144

15. “A youth generally admired for his talents, when not yet sixteen years old, enriched astronomy, gnomics, statics and mechanics, with brilliant inventions.” Citado en BENNETT, J. A.: *The mathematical science of Christopher Wren*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982, p. 18

16. Sobre la gravedad Newtoniana, ver apartado II-3.5.1. La gravedad, una fuerza universal. Para más información sobre el interés de Wren por la astrofísica, ver los capítulos Astronomy and Cosmology, en Bennett, J. A.: *The mathematical science of Christopher Wren*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982, pp. 26-43 y 55-70

17. “La arquitectura, entendida como ciencia matemática, no es el proceso de construcción en ladrillo y piedra, sino la razón demostrativa y la causa del trabajo de los mecanicistas”. Prefacio de John Dee a la traducción de Henry Billingsley del tratado *Elementos de Euclides* de 1570. Citado en BENNETT, J. A.: *The mathematical science of Christopher Wren*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982, p. 11

En los manuscritos originales leídos ante la Royal Society se evidencia que habitual era “mezclar” cuestiones que hoy en día pertenecen al ámbito de la física, con temas relativos a la arquitectura. Ver por ejemplo, “A Discourse of Gravity and Gravitation, grounded on experimental observations” presentado por John Wallis ante la Royal Society el 12 de Noviembre de 1674 (Ref. No. RBO.4.203), donde las cuestiones relativas a la naturaleza de la gravedad se mezclan entre otras, con observaciones sobre la obra de fábrica y las estructuras porticadas.

18. "En sus primeros años, la Royal Society, antes de la tendencia a separar las ciencias puras de la tecnología que la había desarrollado, consideraba la arquitectura como una de sus preocupaciones. La Royal se ocupaba de cuestiones que hoy conciernen a la arquitectura". CROWTHER, James Gerald: Founders of British science: John Wilkins, Robert Boyle, John Ray, Christopher Wren, Robert Hooke, Isaac Newton. London: The Cresset Press, 1960, p. 133

19. "Sprat describe en su Historia de la Royal Society (...) cómo estos dos desastres (la Gran Plaga de 1665 y el Gran Fuego de 1666) estimularon el interés de la Society por la arquitectura: "Una nueva ciudad se va a construir (...). Por lo tanto, este es el momento apto para que los hombres apliquen sus ideas a la mejora de los modelos de casas, tejados, chimeneas, conductos, muelles y las calles: todos los cuales han sido ya sometidos a la consideración de la Society Real". CROWTHER, James Gerald: Founders of British science: John Wilkins, Robert Boyle, John Ray, Christopher Wren, Robert Hooke, Isaac Newton. London: The Cresset Press, 1960, p. 163. Ver también BENNETT, J. A.: The mathematical science of Christopher Wren. Cambridge: Cambridge University Press, 1982, p. 88

20. Los cinco tratados sobre arquitectura de Christopher Wren se presentan como un anexo (folios 351 a 361) en WREN, Christopher: Parentalia; or, Memoirs of the family of the Wrens (...). London: T. Osborn, 1750, un libro biográfico compendiado por el hijo de Christopher Wren y publicado por su nieto. Dado que los manuscritos originales de los tratados se perdieron, se desconoce si Wren tuvo intención de escribir un conjunto de tratados de arquitectura más ambicioso o completo que el que nos ha llegado. De hecho, en el citado anexo se presentan como un borrador inacabado. Tampoco se sabe a ciencia cierta cuándo fueron escritos, pues algunos autores creen que se redactaron en la década de 1670 (SOO, Lydia M: Wren's "tracts" on architecture and other writings. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, pp. 119 y 153), mientras que otros defienden que fue en la década del año 1700 (CROWTHER, James Gerald: Founders of British science: John Wilkins, Robert Boyle, John Ray, Christopher Wren, Robert Hooke, Isaac Newton. London: The Cresset Press, 1960, p. 175).

visión, del que depende de manera crucial cualquier observación astronómica. También se interesa Wren por el estudio de ciertos fenómenos relacionados con la gravedad, como la medición pendular de la variación de su intensidad en distintos puntos del planeta o la posibilidad de que la gravedad, concebida como una fuerza centrípeta cuya intensidad depende de la ley del cuadrado inverso, sea la causa del movimiento de los planetas. Durante los años que preside la Royal Society (1680-1682) Wren incentiva la investigación de la causa eficiente del movimiento planetario bajo esta hipótesis y, pocos años más tarde, Isaac Newton (1642-1727) publica la famosa Ley de Gravitación Universal en los "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" (1685-87) ¹⁶.

I.3.2.1. Wren, arquitecto: la belleza de la luz y la estética estructural

A pesar de la importancia de su contribución al desarrollo de la ciencia del siglo XVII en Inglaterra, Wren no ha pasado a la historia únicamente por sus trabajos científicos sino, más bien, por su legado arquitectónico. No obstante, debe tenerse presente que en el siglo XVII no existía la actual escisión entre ambas disciplinas, pues la arquitectura era considerada como una parte de las *ciencias matemáticas* ¹⁷. De hecho, las discusiones sobre arquitectura y construcción fueron habituales en la Royal Society ¹⁸, especialmente desde 1666, cuando el *Gran Incendio* que arrasó Londres obligó a su completa reconstrucción, algo que la Royal Society vio como una oportunidad para aumentar su relevancia social ¹⁹.

El primer contacto de Wren con el mundo de la construcción se produce en 1661 -el mismo año en que consigue la plaza de *Savilian Professor of Astronomy* en Oxford-, cuando es designado asistente de John Denham, Inspector General de las obras Rey, para la supervisión de la construcción de un puerto fortificado en Tánger. Durante los años siguientes, Wren manifiesta un creciente interés por la arquitectura y, en 1663, construye su primer edificio, la Capilla del Pembroke College en Cambridge. Ese mismo año entra a formar parte de la comisión para la reparación de la Catedral de

Saint Paul, empezando así una brillante carrera como arquitecto que se salda con la reconstrucción integral de esta importante catedral y la construcción de más de medio centenar de iglesias, palacios y mercados.

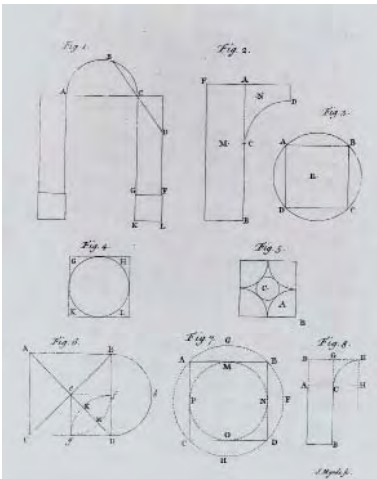
A pesar de su enorme actividad, Wren publicó pocas de sus investigaciones científicas y, aunque con su teoría arquitectónica ocurrió lo mismo, han podido conservarse sus cinco pequeños tratados sobre arquitectura, publicados póstumamente en 1750²⁰. A diferencia del resto de arquitectos y tratadistas del momento, cuyas reflexiones arquitectónicas se basan únicamente en los contenidos del tratado de Vitruvio, la doble condición de Wren como arquitecto y científico hace posible una nueva comprensión del hecho arquitectónico, basada tanto en los postulados vitruvianos como en los intereses científicos del momento. Siguiendo la práctica habitual de sus contemporáneos, Wren obvia el esquema tripartito vitruviano de las tres partes de la arquitectura *-construcción, gnomónica y mecánica-*, en las que podía intuirse el interés de Vitruvio por la importancia de la astronomía, la gravedad terrestre y la luz solar para la arquitectura, para formular su teoría en base a la tríada vitruviana de la construcción *-firmeza, utilidad y belleza-*, aunque convenientemente reinterpretada.

Así pues, Wren afirma que *“la Belleza, la Firmeza y la Conveniencia son los Principios”* de la arquitectura, y que *“los dos primeros dependen de las Razones geométricas de la Óptica y la Estática, el tercero sólo de la Variedad”*²¹. De esta manera, al relacionar la firmeza y la belleza arquitectónico-vitruvianas con las razones geométricas de la estática y la óptica científico-físicas, Wren introduce en la teoría arquitectónica la epistemología científica propia de la primera mitad del siglo XVII, especialmente interesada en el estudio de los fenómenos de la gravedad -y su posible relación con la causa eficiente del movimiento planetario- y la investigación de la naturaleza de la luz. Así es como Wren, un arquitecto especialmente versado en la astronomía, la geometría, la mecánica o la óptica, recupera la gnomónica y la mecánica vitruvianas a través de la óptica y la estática modernas. A partir de Wren la comprensión de la arquitectura no puede desvincularse ya de la comprensión científica de la gravedad y de la luz²².

21. “Beauty, Firmness, and Convenience, are the Principles; the two first depend upon the geometrical Reasons of Opticks and Staticks; the third only makes the Variety”. WREN, Christopher: *Parentalia; or, Memoirs of the family of the Wrens (...)*. London: T. Osborn, 1750, folio 351, *Tratado I. Ver SOO, Lydia M: Wren's “tracts” on architecture and other writings*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, p. 154.

Parece conveniente apuntar que, en su catálogo de juventud de “nuevas teorías, invenciones, experimentos y mejoras mecánicas” de 1651, Wren ya escribió un texto sobre “New Designs tending to Strenght, Convenience, and Beauty in Buildings” de marcado carácter vitruviano. Ver CROWTHER, James Gerald: Founders of British science: John Wilkins, Robert Boyle, John Ray, Christopher Wren, Robert Hooke, Isaac Newton. London: The Cresset Press, 1960, p. 143

22. *En su discurso sobre los cometas (“A Discourse of the Nature of Comets. Read at the Meetings of the Royal Society, soon after Michaelmas 1682”, en HOOKE, Robert: WALLER, Richard (ed): The posthumous works of Robert HOOKE... containing his Cutlerian lectures, and other discourses read at the meetings of the... Royal Society... to these discourses is prefixt the author's life. London: Sam. Smith & Benj. Walford, 1705, p. 149 y ss.) Hooke concibe la realidad como regida por dos poderes: el cuerpo -en cuanto a extensión- y el movimiento -en cuanto a alteración- (pp. 171-172). Afirma, además, que las dos grandes leyes del movimiento son la luz y la gravedad (p. 175). En este texto expone su concepción de la luz, desarrollada previamente en sus Lectures of Light que, divididas en siete secciones, fueron expuestas ante la Royal Society desde principios de 1680 hasta mediados del 1682 (pp. 71-148) y formula también una teoría sobre la gravedad. Es notorio que Hooke, una persona tan cercana a Wren, otorgase a la luz y a la gravedad tal importancia dentro de su física y que, al mismo tiempo, Wren concibiera su arquitectura a partir de la óptica y la estática. No obstante, es imposible averiguar quién influyó a quién, pues a pesar de que se sabe a ciencia cierta la fecha del texto de Hooke, se desconoce cuándo Wren escribió sus tratados sobre arquitectura: algunos autores afirman que fueron redactados hacia el 1670, y otros dicen que debió ser hacia el 1710.*



F.04. Diagramas estructurales de Christopher Wren. WREN, Christopher: *Parentalia; or, Memoirs of the family of the Wrens (...)*. London: T. Osborn, 1750, lámina entre folios 354 y 355, Tratado II. Fotografía del autor.

23. "Me parece muy irresponsable que la mayoría de nuestros arquitectos se deleiten únicamente en lo ornamental [se refiere a la parte ornamental de los órdenes descritos por Vitruvio], y pasen con tanta ligereza por encima de la geometría [se refiere aquí a la estática, la razón geométrica de la firmeza], que es la Parte más esencial de la Arquitectura". WREN, Christopher: *Parentalia; or, Memoirs of the family of the Wrens (...)*. London: T. Osborn, 1750, folio 356, Tratado II. Ver SOO, Lydia M: Wren's "tracts" on architecture and other writings. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, p. 159

24. "Los arquitectos de las épocas posteriores, teniendo la ambición de construir con piedra y cargando los arquivadros también con pesadas cornisas de piedra, se vieron necesitados de pilares más juntos; de aquí las distintas (...) disposiciones de las columnas, por las cuales Vitruvio y sus seguidores hicieron de su Arte una Ciencia sistemática, creando reglas positivas de acuerdo con los diámetros de sus columnas, los intercolumnios, y las proporciones del arquivadro, la cornisa, y todos los miembros de que son compuestos". WREN, Christopher: *Parentalia; or, Memoirs of the family of the Wrens (...)*. London: T. Osborn, 1750, folio 355, Tratado II. Ver SOO, Lydia M: Wren's "tracts" on architecture and other writings. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, p. 159

En tanto que la arquitectura tiene en la razón geométrica de la estática su principio más esencial²³, no debe sorprender la importancia central que Wren otorga a la estructura arquitectónica en su segundo tratado. En él critica a aquellos arquitectos únicamente interesados por la ornamentación de los órdenes clásicos descritos por Vitruvio, pues opina que la importancia de la descripción vitruviana no estriba en su ornamentación sino en sus proporciones, establecidas en base a unos incipientes e intuitivos criterios estáticos²⁴.

En su primer tratado Wren distingue dos tipos de belleza: la "natural", definida por la geometría, y la "habitual", definida por la familiaridad con unas determinadas formas. Según Wren, la verdadera belleza arquitectónica es la que reside en la geometría de la *belleza natural*. Así, afirma Wren que las formas geométricas regulares y simples de la naturaleza son más bellas que las irregulares y complejas. Con este discurso asegura Wren que, de entre todas las líneas, la recta es la más bella y añade que, tal como demuestra la naturaleza, solamente existen dos posiciones bellas para las líneas rectas, la perpendicular y la horizontal, pues ninguna otra que la vertical puede ser *firme*²⁵, en clara alusión a la verticalidad inherente a la gravedad. Quedan así establecidas la geometría como causa de la belleza y la posición geométrica de los elementos como principios estáticos fundamentales para la arquitectura.

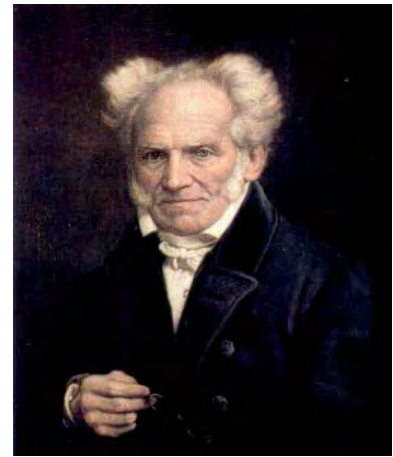
En el segundo tratado expone Wren su propio método de cálculo estructural para soportes y cubriciones, desarrollado junto con Robert Hooke (1635-1703) en la Royal Society²⁶, basado en el análisis geométrico y matemático de las fuerzas y el equilibrio estático. Según Wren, los elementos que constituyen la estructura deben disponerse en equilibrio equiponderado -lo que induce a la simetría-, de tal manera que el cálculo geométrico de los centros de gravedad de los elementos que conforman el diseño proyectado²⁷ permanezca en equilibrio. Éste constituye el primer intento, anterior al desarrollo del análisis estructural del siglo XVIII, de analizar los problemas estructurales desde la perspectiva de la "filosofía natural". Es evidente que la gran contribución de Wren consiste en la inclusión de la epistemología científica del siglo XVII en la teoría clásica de

la arquitectura, vinculando indisolublemente la arquitectura con la gravedad y la luz. No obstante, a pesar de la claridad con que Wren expone en sus tratados la importancia de la estática gravitatoria y la óptica lumínica en la teoría arquitectónica, hay que reconocer que es altamente improbable que sus reflexiones llegaran a tener trascendencia alguna, pues sus tratados se dieron a conocer de manera póstuma a mediados del siglo XVIII como anexo a un compendio biográfico sobre la familia Wren de carácter no erudito.

No obstante, con independencia de la escasa repercusión que pudiera tener la teoría de Wren, debe reconocerse que en sus tratados pueden observarse los primeros indicios de un creciente interés por el conocimiento de la naturaleza de la gravedad y de la luz que, dada su doble condición como científico y arquitecto, le lleva a relacionar la epistemología científica de la Nueva Ciencia con la reflexión teórica clásica sobre la arquitectura.

I.3.3. ARTHUR SCHOPENHAUER: LUZ Y GRAVEDAD

La publicación de los *Principios matemáticos de filosofía Natural* (1687) y la *Óptica, o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz* (1704) de Isaac Newton es, en cierto modo, la culminación de un siglo de intensas y revolucionarias investigaciones científicas. No obstante, tras su enorme éxito inicial, ninguna de las dos teorías se encuentra exenta de polémicas. En muchos aspectos la teoría corpuscular de la luz se muestra incompleta y no presenta mejores resultados que la teoría ondulatoria rival, así que tras la muerte de su autor empiezan a hacerse oír las voces críticas y, en el siglo XIX, acaba por ser definitivamente desbancada²⁸. Por otro lado, a pesar de su innegable éxito práctico a nadie escapa la principal limitación de la ley de la gravedad de Newton pues, a diferencia de la reemplazada teoría sobre la gravitación del científico y filósofo René Descartes (1596-1650), la teoría newtoniana se muestra incapaz de encontrar explicación alguna de la causa última de la gravedad sin atentar contra los presupuestos fundamentales de su propia teoría²⁹. No obstante, la inexistencia de una teoría alternativa con entidad



F.05. Arthur Schopenhauer (1787-1860)

25. "Hay dos causas de la Belleza, la natural y la habitual. La natural viene definida por la geometría, consistente en la uniformidad (que es igualdad) y la proporción. La belleza habitual es otorgada por el uso de nuestros sentidos hacia los objetos que normalmente nos agradan por otros motivos, como la familiaridad o una particular inclinación (...). Siempre la verdadera prueba de la belleza es la belleza natural o geométrica. Las figuras geométricas son naturalmente más bellas que otras irregulares; en esto consiste la Ley de la Naturaleza. De las formas geométricas, el cuadrado y el círculo son las más bellas, seguidas del paralelogramo y el óvalo. Las líneas rectas son más bellas que las curvas. (...) La posición es necesaria para una belleza perfecta. Sólo hay dos posiciones bellas para las líneas rectas, perpendicular y horizontal: esto proviene de la naturaleza, y por consiguiente de la Necesidad; ninguna otra que la vertical puede ser firme". WREN, Christopher: Parentalia; or, Memoirs of the family of the Wrens (...). London: T. Osborn, 1750, folios 351-352, *Tratado I. Ver SOO, Lydia M: Wren's "tracts" on architecture and other writings. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, p. 154*

26. El título del anagrama encriptado en latín publicado por Hooke en 1675 (y luego publicado póstumamente en 1705 sin codificar) expresa con claridad la situación del cálculo estructural a finales del siglo XVII: "The true Mathematical and Mechanical Form of all manner of Arches for building with the true butment necessary to each of them, a problem which no Architectonick Writer hath ever yet attempted, much less perform'd". Hooke descubre que la mejor forma de trazar el arco es la que resultaría de invertir la catenaria de un hilo flexible: "Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum, (...) Linea Catenaria". Este criterio es utilizado en el trazado de la cúpula de la catedral Sant Paul de Londres proyectada por Christopher Wren.

Sobre las aportaciones de Hooke a la estática estructural ver: SOO, Lydia M: Wren's "tracts" on architecture and other writings. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, pp. 150-151; y BRUFAU NIUBÓ, Robert. "Robert Hooke, ¿el primer consultor estructural?, en *Quaderns d'estructures*, nº 41, setiembre 2011, pp. 49-57.

Sobre los documentos originales de Hooke aludidos arriba, ver: HOOKE, Robert: *Lectiones Cutlerianae; or, A collection of lectures, physical, mechanical, geographical & astronomical, made before the Royal Society on several occasions at Gresham Colledge; to which are added divers miscellaneous discourses*. London: John Martyn, 1679: "A description of Helioscopes and some other Instruments", folio 31; y HOOKE, Robert: WALLER, Richard (ed): *The posthumous works of Robert HOOKE... containing his Cutlerian lectures, and other discourses read at the meetings of the... Royal Society... to these discourses is prefixt the author's life*. London: Sam. Smith & Benj. Walford, 1705: "The Life of Robert Hooke", folio XXI.

27. "Parece que el diseño, allí donde hay arcadas, debe ser regulado por el Arte de la Estática, o la Invención de los Centros de Gravedad, equilibrando todas las Partes equiponderadamente, sin lo cual, un buen diseño caerá y resultará fallido". ("It appears that the Design, where there are Arcades, must be regulated by Art of Staticks, or Invention of the Centers of Gravity, and the duly poising all Parts to equiponderate; without wich, a fine Design will fail and prove abortive"). WREN, Christopher: *Parentalia; or, Memoirs of the family of the Wrens* (...). London: T. Osborn, 1750, folio 356, *Tratado II*. Ver SOO, Lydia M: Wren's "tracts" on architecture and other writings. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, p. 162

suficiente como para reemplazar a la gravitación newtoniana induce a la aceptación de la consideración de la gravedad (y por extensión a todas las leyes fundamentales de la naturaleza) como una *cualidad oculta* de la materia que, como tal, escapa a toda explicación racional.

Las dificultades fundamentales con que tropieza la Ley de Gravitación Universal obligan a una honda reflexión sobre la finalidad y los límites del conocimiento científico, que acaba derivando en una reflexión más amplia sobre la naturaleza del conocimiento, a través de la gnoseología, la metafísica y, en último término, la estética. Aunque durante la segunda mitad del siglo XVIII y la primera mitad del siglo XIX, los más ilustres pensadores alemanes se entregan a esta reflexión con vehemencia y rigor, los más aventajados son aquellos que, como Immanuel Kant³⁰, combinan su interés por la filosofía con el estudio de la ciencia, también llamada *filosofía natural*. De esta singular combinación nace una filosofía estrechamente entrelazada con la ciencia cuya reflexión estética se muestra especialmente atenta a la relación entre las bellas artes –llamadas por algunos, como G. F. Meier o A. Eschemburg, "*bellas ciencias*" - y las leyes de la naturaleza. No es de extrañar, pues, que Arthur Schopenhauer, uno de los filósofos alemanes más importantes del periodo anteriormente citado, conciba ya de una manera explícita y unívoca la manifestación de la gravedad y la luz como la razón de ser de la arquitectura.

Con esto no se quiere afirmar aquí que, en efecto, Schopenhauer fuese el primero en relacionar la arquitectura con la gravedad y la luz pues, para poder hacerlo, sería necesario un análisis de la evolución de la enormemente prolífica estética alemana³¹, empresa que sobrepasaría con mucho la finalidad de este apartado. No obstante, es digno de consideración advertir la importancia, para ulteriores investigaciones, de la posibilidad de poder encuadrar la aparición explícita de la gravedad y de la luz en la reflexión estética alemana sobre el hecho arquitectónico entre el año 1735, cuando Alexander Gottlieb Baumgarten (1714-1762) propone por vez primera la estética como el estudio científico de la belleza en su "De Nonnullis ad poema pertinentibus", y los años 1819, 1844 y 1859, correspondientes a las sucesivas y ampliadas ediciones

de “Die Welt als Wille und Vorstellung” (*El mundo como voluntad y representación*), donde Arthur Schopenhauer (1787-1860) expone la manifestación de la gravedad y de la luz como la única finalidad estética de la arquitectura.

1.3.3.1. La arquitectura como manifestación de la luz y de la gravedad

En 1809 Schopenhauer se matricula como estudiante de medicina en la Universidad de Göttingen. Sin embargo, al año siguiente empieza a estudiar la filosofía de Kant y la de Platón. En 1813 obtiene el grado de doctor en filosofía con su tesis “Über die vierfache Wurzel des Satzes vom zureichenden Grunde” (*Sobre la cuádruple raíz del principio de razón suficiente*), donde establece ya las bases de su propia filosofía. Ese mismo año conoce a Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832), autor de “Farbenlehre” (*Teoría de los colores*, 1810³²), una crítica de la teoría de los colores de Newton, cuya tesis corpuscular empieza a ser seriamente cuestionada desde el ámbito científico³³. Fruto de sus conversaciones con Goethe y de su interés general por la filosofía natural, Schopenhauer se inicia en el estudio de la óptica y, al poco tiempo, publica “Über das Sehn und die Farben” (*Sobre la visión y los colores*, 1816³⁴).

Entre 1814 y 1818 Schopenhauer escribe “Die Welt als Wille und Vorstellung” (*El mundo como voluntad y representación*, 1819) pero, a pesar de las enormes expectativas que el filósofo deposita en lo que considera su obra maestra, ésta resulta ser un completo desastre editorial. Durante las décadas siguientes la producción filosófica de Schopenhauer es prácticamente inexistente y, a pesar de re-editar algunas de sus obras, éstas no tienen la repercusión esperada por su autor. No obstante, con la publicación de “Parerga und Paralipomena. Kleine philosophische Schriften” (*Parerga y Paralipómena. Escritos filosóficos menores*, 1851), una recopilación ordenada de textos secundarios sobre diversos temas, el filósofo consigue una inesperada fama, gracias a la cual su bibliografía anterior, prácticamente desatendida hasta entonces, recibe por fin la atención merecida.

28. Ver el apartado II-4.1.1. El siglo XIX: de la luz corpuscular a la onda electromagnética.

29. Sobre la teoría gravitatoria de Descartes y Newton ver los apartados II-3.3.1. La gravedad terrestre como repulsión desigual de la materia y II-3.5.1. La gravedad, una fuerza universal respectivamente.

30. Las reflexiones de Kant sobre la gnoseología, la metafísica y la estética le han valido, con razón, un lugar importante en la historia de la filosofía que, sin embargo, han eclipsado el enorme interés que demostró durante toda su vida por el estudio de la filosofía natural. Aunque no olvidó nunca la importancia de la física de la naturaleza en toda su obra filosófica, las obras publicadas en su etapa pre-crítica demuestran de manera inequívoca su interés específico por la física, la astronomía, la mecánica y la óptica: “Meditaciones sobre la verdadera estimación de las fuerzas vivas” (1749); “Historia general de la naturaleza y teoría del cielo” (1755); “Nuevo concepto del movimiento y el reposo” (1758); “Sobre el fundamento primero de la diferencia entre las regiones del espacio” (1766); “Opúsculos de filosofía natural” (1768). No obstante, en su reflexión sobre la estética, Kant dedica al arte de la arquitectura muy pocas líneas (únicamente en el Libro II, sección 51 de la Crítica del Juicio, 1790) y, a pesar de su bagaje científico, en ningún momento la vincula a la gravedad o a la luz.

31. El extenso listado de obras publicadas en Alemania sobre estética y filosofía del arte de mediados del siglo XVIII y mediados del XIX que aparece en el prólogo de Ch. Bénard en HEGEL, Georg Wilhelm Friederich; GINER DE LOS RÍOS, Hermenegildo (trad): *Estética*, Vol.1. Barcelona: Alta Fulla, 1988, da una idea de la vasta producción de la estética alemana.

32. Aunque los estudios de Goethe sobre el fenómeno del color parten de una curiosidad artística, acaban encaminándose hacia la observación naturalista y la experimentación científica. Sus estudios cromáticos empiezan en 1790 y se prolongan durante dos décadas, hasta que finalmente publica “Farbenlehre” (*Teoría de los colores*) en 1810.

33. Para ahondar en la crítica científica a la óptica newtoniana a principios del siglo XIX, ver el apartado II-4.1.1.1. Young y Fresnel: de vuelta a la teoría ondulatoria de la luz.

34. Años más tarde, Schopenhauer re-edita su teoría del color en latín con importantes modificaciones: “Theoria colorum Physiologica, eademque primaria” (*Teoría psicológica fundamental el color*, 1830). La segunda edición alemana data de 1854.

35. "Etiología propiamente dicha son todas las ramas de la ciencia natural que hacen su principal objeto del conocimiento de la causa y el efecto. (...) Este procedimiento es el que siguen principalmente la mecánica, la física, la química y la fisiología. (...) La etiología (...) nos enseña que según la ley de causa y efecto un determinado estado de la materia acarrea necesariamente otro y de este modo lo explica, con lo cual ha realizado su misión. Pero en el fondo no hace otra cosa sino indicar el orden regular en que aparecen los estados en el tiempo y en el espacio (...). Pero sobre la esencia interior del fenómeno no nos dan estas ciencias la menor noticia. Esta esencia interior es denominada fuerza natural y está completamente fuera de la explicación etiológica. La inmutable constancia con que se manifiestan los efectos de tal fuerza, siempre que se den las condiciones a que obedecen, se denomina ley natural. (...) La fuerza misma que se manifiesta, la esencia interior de los fenómenos sujetos a dicha ley es para la ciencia un misterio, una cosa extraña y desconocida, tanto en los casos más sencillos como en los más complicados". SCHOPENHAUER, Arthur: *El Mundo como voluntad y representación* (4a Ed). México: Porrúa, 1997, pp. 88-89 (Libro II, sección XVII).

36. "La mecánica, la física (...), nos enseñan las leyes y reglas según las cuales obran las fuerzas de la impenetrabilidad, gravedad, inercia, fluidez, cohesión, elasticidad, calor, luz, afinidad, magnetismo, electricidad, etc., es decir, las leyes y reglas que rigen estas fuerzas en lo tocante a su aparición eventual en el tiempo y en el espacio; pero las fuerzas mismas, cualquiera que sea la actitud que adoptemos, siguen siendo para nosotros *qualitates occultae*. (...) Se conviene en tomar como puntos de partida ciertas *qualitates occultae*, de cuya explicación se prescinde, pues se trata de edificar sobre ellas y no de ahondar debajo para conocer su esencia". SCHOPENHAUER, Arthur: *El Mundo como voluntad y representación* (4a Ed). México: Porrúa, 1997, pp. 106 y 108 (Libro II, sección XXIV). Para una contextualización de la consideración de las leyes naturales (como la gravedad) como cualidades ocultas en el siglo XVIII, ver la introducción del apartado II-4.2. Albert Einstein: gravedad, geometría y espacio.

El interés de Schopenhauer por la filosofía natural, heredado de la filosofía alemana del siglo XVIII, vertebró el contenido del segundo libro de *El mundo como voluntad y representación*. Explica Schopenhauer que la etiología, en la que incluye a las ciencias naturales como la física o la mecánica, se encarga de estudiar y describir las causas y los efectos de los fenómenos naturales que afectan a la materia y que se suceden en el espacio y en el tiempo, sin ahondar en su esencia interior, debiendo aceptar entonces la existencia de una serie de *leyes naturales*, inmutables, que escapan a toda explicación científica o causal³⁵ y que, por tanto, deben ser consideradas como "cualidades ocultas" de la naturaleza³⁶. Sin embargo, afirma Schopenhauer que la filosofía no se contenta con esta forma de conocimiento relativo, sino que aspira a un conocimiento absoluto de la esencia del mundo. Es entonces cuando la etiología física debe dejar paso a la filosofía metafísica³⁷.

En su sistema filosófico, Schopenhauer identifica la *ley natural* con la *Idea eterna*, es decir, con el grado inferior de la objetivación de lo que él denominó la *voluntad*, que no es ni causa, ni efecto, ni fenómeno, sino la "*cosa-en-sí*". Sin embargo, al conocimiento de la voluntad, es decir, de lo que *las cosas son*, no puede llegarse mediante el uso de la razón, sino solamente a través de la pura contemplación³⁸. Aunque todo ser humano posee la facultad de conocer las Ideas mediante la pura contemplación de la naturaleza, solamente algunos individuos poseen la capacidad de reproducir el objeto contemplado, es decir, de transmitir el conocimiento objetivo de la Idea. Y, la reproducción de esta Idea sólo es posible a través del arte: "*¿Cuál será aquel género de conocimiento que considere la verdadera esencia del mundo? (...) Es el arte. (...) El arte reproduce las Ideas eternas concebidas en la pura contemplación, lo esencial y permanente en todos los fenómenos de este mundo (...). Su origen único es el conocimiento de las Ideas, su única finalidad la comunicación de este conocimiento*"³⁹.

Afirma Schopenhauer que el fin estético de la arquitectura, en tanto que arte bello abstraído de su función utilitaria, no es otro que la expresión de las Ideas eternas correspondientes a los grados de objetivación más bajos de la voluntad, como la pesantez (es decir, la gravedad en su acepción terrestre) y la luz: "*Cada cualidad de la materia es siempre*

*manifestación de una Idea, y como tal susceptible de consideración estética, es decir, del conocimiento que en ella se manifiesta. Y esto puede decirse de las cualidades más generales de la materia, sin las cuales nunca podría existir y cuyas Ideas ocupan el grado más bajo de la objetivación de la voluntad. Tales son la pesantez, la cohesión, la solidez, la fluidez, la reacción contra la luz, etc. Si consideramos ahora la arquitectura como arte bello, abstracción hecha de sus fines utilitarios, en los cuales sirve a la voluntad y no al puro conocimiento y, por tanto, no es arte en el sentido propio de la palabra, no podremos ver en ella otro fin que el de hacer intuitivas algunas de aquellas Ideas que constituyen los grados más ínfimos de la objetivación de la voluntad, a saber: la pesantez, la cohesión, la solidez, la dureza, esas propiedades generales de la piedra, esas primeras y más sencillas y apagadas manifestaciones visibles de la voluntad, bajo fundamental de la naturaleza, y junto a ellas la luz, que en muchas partes es lo contrario a aquéllas”*⁴⁰. El interés de Schopenhauer por la arquitectura no se vincula, pues, a la teoría arquitectónica clásica vitruviana, ocupada y preocupada por cuestiones relativas a la ornamentación o a los órdenes clásicos, sino en cómo la arquitectura, en tanto que arte bello, contribuye al conocimiento profundo de las fuerzas de la naturaleza sin poder recurrir, a diferencia de las otras artes, a la mimesis⁴¹. La finalidad estética de la arquitectura es, según Schopenhauer, la construcción de una obra capaz de mostrar en sí misma los grados más bajos de la voluntad -es decir la gravedad y la luz-, no a través de su copia o su representación, sino a través de su pura manifestación.

En toda obra de arquitectura debe disponerse la masa construida que la constituye de tal manera que se evite la manifestación más evidente de la Idea de la gravedad sobre la materia: el fenómeno de la *caída libre*. Si la masa construida se abandonase a su voluntad, toda la materia caería hasta amontonarse inevitablemente sobre la tierra y la obra arquitectónica no existiría. El objeto arquitectónico sólo puede existir si se plantea una cierta oposición a esa primaria manifestación de la voluntad gravitatoria a través de la idea de la *solidez* de la materia. Fruto de esta pugna entre la solidez y la gravedad sobre una misma materia arquitectónica el fenómeno gravitatorio de la caída libre es substituido por el de la *pesantez*. La expresión de la lucha entre la

37. “Lo general, la esencia común a todos los fenómenos de una misma especie, aquello son cuya presuposición la explicación por la causa no tiene sentido ni significación, es la fuerza natural en general, que en la física debe permanecer como *qualitas occulta*, precisamente porque al llegar a ella la explicación etiológica termina y la metafísica empieza. (...) La etiología y la filosofía de la naturaleza, nunca están divorciadas, sino que caminan paralelas, considerando un mismo objeto desde diferentes puntos de vista. (...) La etiología da cuenta de las causas que ocasionan los fenómenos aislados que se trata de explicar y muestra como fundamento de todas sus explicaciones las fuerzas elementales que obran en todas estas causas y efectos. (...) La filosofía, en cambio, considera exclusivamente en todas partes, por tanto también en la naturaleza, lo general; las fuerzas elementales son su objeto y reconoce en ellas los diferentes grados de objetivación de la voluntad, el en sí de este mundo”. SCHOPENHAUER, Arthur: *El Mundo como voluntad y representación* (4a Ed). México: Porrúa, 1997, p. 120 (Libro II, sección XXVII).

38. “La grandeza de la ciencia es que puede comprender sin necesidad de intuir. La grandeza del arte es que puede intuir sin necesidad de comprender”. WAGENSBERG, Jorge: *Si la naturaleza es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?*, y otros quinientos pensamientos sobre la incertidumbre (5a Ed). Barcelona: Tusquets, 2003, p. 86, aforismos 350 y 351.

39. SCHOPENHAUER, Arthur: *El Mundo como voluntad y representación* (4a Ed). México: Porrúa, 1997, p. 152 (Libro III, sección XXXVI).

40. SCHOPENHAUER, Arthur: *El Mundo como voluntad y representación* (4a Ed). México: Porrúa, 1997, pp. 172-173 (Libro III, sección XLIII).

41. “El arte arquitectónico se diferencia de las artes plásticas y de la poesía en que no es una copia, sino que nos da la cosa misma; no reproduce como aquéllas la Idea conocida, para lo cual el artista presta sus ojos al espectador, sino que en ella el artista coloca el objeto ante el espectador, le facilita la comprensión de la Idea, haciendo que el objeto real individual exprese su propia esencia de una manera distinta y acabada”. SCHOPENHAUER, Arthur: *El Mundo como voluntad y representación* (4a Ed). México: Porrúa, 1997, p. 175 (Libro III, sección XLIII).

42. Sobre la idea de la contemplación de los fenómenos gravitatorios en la arquitectura por parte de Juan Navarro Baldeweg, ver el apartado II-2.1.3. La estructura arquitectónica: gravedad y luz: "Un techo o las figuras estructurales concretas canalizan el flujo energético de la gravedad, y hasta los mismos propioceptores del cuerpo resuenan y se estremecen durante la contemplación". NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): La habitación vacante, (2ª Ed). Pre-textos de arquitectura, Girona, 2001, pp. 37-38. Movimiento ante el ojo, movimiento del ojo, 1981.

43. "Lo mismo que la arquitectura realiza en lo que se refiere a la Idea de la pesantez cuando esta aparece ligada a la solidez, realiza aquél [el arte de la conducción del agua] para la misma Idea allí donde se une a la fluidez, es decir, a la falta de forma, a la fácil conductibilidad, a la transparencia, etc. Cascadas hirvientes y espumosas que se precipitan sobre las rocas, majestuosas cataratas, surtidores semejantes a altas columnas de agua y lagos claros como espejos, expresan la Idea de la materia fluida, pero sometida a las leyes de la gravedad, del mismo modo que las obras de arquitectura desarrollan la Idea de la materia sólida". SCHOPENHAUER, Arthur: El Mundo como voluntad y representación (4a Ed). México: Porrúa, 1997, p. 175 (Libro III, sección XLIII).

La vinculación que el filósofo alemán establece entre el arte de la conducción del agua y la arquitectura en relación a la Idea de la gravedad se debe a que la imagen que Arthur Schopenhauer posía de la arquitectura estaba fundamentada en el orden clásico greco-romano. Precisamente, fueron los romanos excelentes constructores de canalizaciones de agua, al mismo tiempo que hábiles constructores de estructuras de cubrición espacial (ver apartado III-3.4. El espacio estructurado por la curvatura de la gravedad).

A tal efecto, no debe sorprender que el interés del Juan Navarro Baldeweg por los efectos de la gravedad en la arquitectura se formalice, en sus primeras etapas como arquitecto, en la manera de conducir el agua y, al mismo tiempo, en la cubrición del espacio mediante estructuras cupuladas (ver apartado I-2.1.2. Arquitectura, luz y gravedad).

fuerza natural de la gravedad y la cualidad material de la solidez es, según Schopenhauer, la principal finalidad estética de la arquitectura⁴².

Los elementos arquitectónicos encargados de manifestar esta pugna son, según expone Schopenhauer, los entablamentos, las bóvedas, las columnas y los pilares, es decir, la estructura arquitectónica. Es ésta la que, mediante la adecuada disposición de las masas construidas, debe expresar la pesantez de la materia y su solidez. Así, del mismo modo en que el arte de la conducción del agua tiene como principal finalidad dar cauce a la fuerza de la gravedad mediante la fluidez, la estructura arquitectónica debe dar cauce a esa misma fuerza mediante la solidez⁴³. Ésto debe hacerlo la estructura de las maneras más variadas, ofreciendo unas veces el camino más corto para su inmediata satisfacción, ofreciendo en otras rodeos que, alargando la pugna entre la pesantez y la solidez de la materia, ayuden a expresar su naturaleza⁴⁴. En cuanto al material de la estructura, Schopenhauer expone que, para la manifestación arquitectónica de la pesantez y la solidez, es más conveniente el uso de la piedra que el de la madera por el simple hecho de que, al ser el primer material más pesado y sólido que el segundo, le resulta más fácil expresar ambas ideas⁴⁵.

Excelente conocedor de las teorías ópticas de su tiempo⁴⁶, Schopenhauer no duda en afirmar que, junto a la gravedad y a la solidez, la arquitectura debe expresar también la Idea de la luz pues, si la principal finalidad estética de la arquitectura es la expresión del conocimiento intuitivo de las leyes fundamentales de la naturaleza, es la luz la que expresa, en esencia, la posibilidad de este conocimiento de la forma más perfecta⁴⁷. Schopenhauer la concibe como una Idea completamente contraria a la solidez y la gravedad pues, en tanto que opacos, los materiales con que se construye la arquitectura expresan esa otra cualidad general de la materia que es la *reacción contra la luz*. Así pues, la obra arquitectónica debe disponer las masas con que variadamente se compone de tal manera que, trabajando con los efectos de la luz, se haga evidente la manifestación de su naturaleza y de sus cualidades en el interior del espacio construido. Y, por ello, Schopenhauer advierte que toda obra arquitectónica debe ser especialmente sensible tanto a las propiedades generales de la luz (es

decir, a la óptica), como a las especificidades lumínicas de cada lugar de la tierra (que no es otra cosa que la gnomónica) ⁴⁸.

En la filosofía de Arthur Schopenhauer la arquitectura debe expresar la idea de la gravedad y de la luz. No cabe duda de que, aunque sus ideas sobre la arquitectura no ocupan un lugar especialmente importante dentro de su filosofía, con toda seguridad los teóricos de la arquitectura de la segunda mitad del siglo XIX debieron ser sensibles a su filosofía en general y a sus ideas sobre la estética de la arquitectura en particular, iniciándose así un velado interés por la relación estructural entre la arquitectura, la gravedad y la luz. No obstante, no es objeto de esta introducción seguir el rastro del interés arquitectónico teórico por la gravedad y por la luz desde la mitad del siglo XIX hasta hoy, sino advertir que este interés nace, precisamente, del estudio interdisciplinar de la esencia de las leyes de la naturaleza, en combinación con un creciente interés por la relevancia de la estructura en la obra arquitectónica.

I.3.4. LUZ Y GRAVEDAD EN LA ARQUITECTURA MODERNA: ENTRE LA FÍSICA RELATIVISTA Y EL ARTE DE VANGUARDIA

La crisis decimonónica de la noción de *estilo* en la que se había basado la práctica del proyecto arquitectónico y su comprensión histórica, induce a determinados autores a ahondar en los fundamentos de la arquitectura. Autores como Alois Riegl (1858-1905), Heinrich Wölfflin (1864-1946) o August Schmarsow (1853-1936) coinciden en señalar la naturaleza espacial de la arquitectura como su rasgo distintivo con respecto al resto de las artes. Aunque en el ámbito proyectual la arquitectura se había ocupado siempre de la construcción del espacio, es a partir de este momento que se reconoce de un modo explícito y preciso la naturaleza espacial del hecho arquitectónico.

La repercusión mediática de la publicación de la teoría de la relatividad general de Albert Einstein en 1916 y su posterior constatación observacional en 1919 consigue despertar el interés de artistas de vanguardia europeos por la física. En tanto que arte espacial, la

44. "Propiamente la lucha entre la pesantez y la solidez es el único problema estético de la arquitectura como arte bello; su misión es hacer patente esa lucha de la manera más distinta. Este problema lo resuelve dando cauce a dichas fuerzas intangibles para que hallen su satisfacción por el camino más corto y conteniéndolas por medio de rodeos, alargando así su lucha y haciendo visible por varias maneras el impulso inagotable que las anima. Abandonada a su propia inclinación, toda la masa del edificio no representaría más que un mero amontonamiento, ligada tan fijamente como le fuera posible a la superficie de la tierra, a la cual la pesantez, que es como aquí aparece la voluntad, la sujeta incesantemente, mientras que resiste por la solidez, que es también objetivación de la voluntad. Pero precisamente la inmediata satisfacción de esta inclinación, de esta tendencia, es lo que impide el arte arquitectónico, permitiéndole sólo una satisfacción mediata por medio de rodeos. Así, el entablamento puede apoyarse en tierra por medio de columnas. La bóveda también tiene que ser sostenida y sólo por medio de los pilares puede satisfacer su impulso de gravedad, etc. Pero precisamente por esos rodeos obligados por estas dificultades, despléganse de la manera más visible y variada las fuerzas ocultas en la materia bruta de la piedra; y los fines estéticos de la arquitectura no pueden ir más lejos. Por eso la belleza de un edificio estriba en la visible adecuación de sus partes no en los fines exteriores de la voluntad del hombre (en este respecto la obra pertenecería a la arquitectura utilitaria), sino directamente a la estabilidad del conjunto, con el cual la posición, el tamaño y la forma deben guardar una proporción tan exacta en lo posible, que si una parte faltase el edificio se desplomaría. Pues solo cuando cada parte soporta lo que es capaz de soportar y cada sostén está donde debe estar, se desarrolla aquel contrajuego, aquella lucha entre la solidez y la gravedad que constituye la vida de la piedra, la manifestación de su voluntad y da expresión visible a estos grados inferiores de la objetividad de la voluntad". SCHOPENHAUER, Arthur: El Mundo como voluntad y representación (4a Ed). México: Porrúa, 1997, p. 173 (Libro III, sección XLIII).

45. SCHOPENHAUER, Arthur: El Mundo como voluntad y representación (4a Ed). México: Porrúa, 1997, p. 174 (Libro III, sección XLIII). Esta apreciación sobre la conveniencia del material, basada en la dicotomía de la madera o la piedra, podría causarnos una gran extrañeza al tener en cuenta que, para cuando Schopenhauer escribe El mundo como voluntad y representación, la estructura metálica irrumpe con fuerza en el ámbito de la construcción, primero en Inglaterra y luego en Francia y Alemania. Aunque es cierto que cuando el filósofo alemán publica la primera edición de su obra en 1819 la cuestión de la arquitectura en hierro se encuentra aún en un momento incipiente, la tercera edición, de 1859, es ocho años posterior a la construcción del famoso Crystal Palace de Paxton en Londres, edificio donde predominan el hierro y el cristal. Sin embargo, es necesario advertir que, en tanto que Schopenhauer distingue la arquitectura como arte bello de la arquitectura utilitaria, (es decir, aquella destinada a expresar las ideas de la naturaleza de aquella a destinada simplemente satisfacer un determinado uso), es comprensible no contemplara las construcciones metálicas de su época, tales como invernaderos, estaciones o pabellones para exposiciones, como obras de arte bellas sino como construcciones simplemente utilitarias. En tal caso, podría comprenderse, según el razonamiento de Schopenhauer, que las estructuras metálicas no tuvieran cabida en la concepción artística de la arquitectura. De hecho, el Crystal Palace no fue considerado arquitectura por sus contemporáneos, y a los arquitectos decimonónicos les costó más de un siglo aceptar que los ingenieriles edificios de hierro y cristal fueran, en realidad, obras arquitectónicas.

46. "Según esto, la luz sería la vibración mecánica u ondulación de un éter imaginario postulado a este fin, que al llegar a la retina golpearía en ella (...) Semejantes teorías beocías, mecánicas, democriticas, torpes y groseras son dignas de esas gentes que a los cincuenta años de haber publicado Goethe su teoría de los colores, creen aún en la luz homogénea de Newton y no se avergüenzan de confesarlo". SCHOPENHAUER, Arthur: El Mundo como voluntad y representación (4a Ed). México: Porrúa, 1997, p. 107 (Libro II, sección XXIV). Es preciso recordar que el propio Schopenhauer, animado por la Teoría de los Colores de Goethe, publica su propia teoría sobre los colores en 1816.

influencia de la física teórica en la teoría moderna de la arquitectura se centra necesariamente en aquellas cuestiones relativas al espacio. La noción de "espacio-tiempo" formulada por Minkowski en 1907, en la que a las tres dimensiones del espacio se añade una cuarta dimensión temporal, deviene así en el catalizador de una nueva manera de entender el arte en general y la arquitectura en particular. Sobre la idea del espacio-tiempo Einstein construye su teoría de la relatividad general, en la que se establece que las propiedades físicas y geométricas del espacio-tiempo se ven alteradas por los fenómenos de la gravedad y de la luz. Artistas como Theo Van Doesburg (1883-1931), Gino Severini (1883-1966), Enrico Prampolini (1894-1956), El Lissitzky (1890-1941), Vicenzio Fani (1888-1927) o László Moholy-Nagy (1895-1946) -por citar sólo a los más importantes-, encuentran en estas teorías sobre la luz, la gravedad y el espacio, la fuente de inspiración necesaria para desarrollar una nueva manera de entender la pintura, la escultura y, también, la arquitectura.

Según expone Sigfried Giedion en su célebre obra "Space, Time and Architecture" en 1941, cuyo título alude explícitamente al espacio-tiempo de la física moderna, la vanguardia artística europea se propone la tarea de implementar este concepto a sus reflexiones sobre el espacio arquitectónico de un modo consciente, intentando incorporar de algún modo la coordenada temporal al diseño y la representación del espacio tridimensional. Como resultado de estas reflexiones, por lo general más exitosas en el plano teórico que en el práctico, a partir del primer cuarto de siglo la labor proyectual de los que habrán de ser los arquitectos más destacados del siglo XX se ve influenciada por los conceptos relativistas sobre el espacio, la gravedad y la luz. Así lo evidencian las reflexiones escritas de Le Corbusier y Mies van der Rohe, los dos grandes maestros de la arquitectura moderna.

A pesar de que la gravedad y la luz han sido temas presentes en la teoría arquitectónica desde que ésta existe, el interés moderno por ambas cuestiones tiene su origen en las inquietudes artísticas y teóricas de las vanguardias modernas de principios de siglo. Durante el último cuarto del siglo XX, la recuperación o la pervivencia de esas inquietudes vanguardistas reactiva el interés por estas cuestiones

desde el ámbito de la arquitectura. Es en este contexto donde hay que buscar la motivación de la obra teórica y proyectual de Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza, los dos arquitectos que han liderado en nuestro país la reflexión en torno al espacio, la estructura, la gravedad y la luz.

Juan Navarro se interesa por estos fenómenos físicos durante su estancia en el MIT. Bajo la tutoría del artista y profesor Gyorgy Kepes experimenta con la luz, la gravedad o el electromagnetismo. El interés artístico de Kepes por estas realidades físicas proviene de su maestro László Moholy-Nagy, un importante artista de vanguardia y profesor que, como otros tantos contemporáneos, incorpora conscientemente en sus creaciones artísticas la nueva concepción física del mundo elaborada por Einstein y sus predecesores⁴⁹.

El origen del interés de Alberto Campo por la gravedad y la luz hay que encontrarlo en el teórico Kenneth Frampton, a quien conoció personalmente durante su estancia como profesor invitado en la E.T.H. de Zúrich. A finales de los años ochenta Frampton se inicia en el estudio de la tectónica alemana del siglo XIX, lo que sin duda le pone en contacto con la estética alemana en la que cabe encuadrar las ideas sobre la arquitectura, la luz y la gravedad de Schopenhauer. Por otro lado, el hondo conocimiento de Frampton de la obra de Le Corbusier lo hace conocedor de su interés por la ciencia, que vehicula a través de *L'Esprit Nouveau*, una revista de carácter pluridisciplinar en la que con frecuencia se publicaban artículos sobre la nueva ciencia relativista⁵⁰. Frampton se interesa también por las reflexiones de Sigfried Giedion en relación a la influencia de la física moderna en el desarrollo de las vanguardias europeas⁵¹. Se entiende así que, en su interpretación de las nociones de tectónica y estereotomía realizadas a partir de la obra de Semper, Frampton introduzca intereses y matices más próximos a las vanguardias modernas que a la estética decimonónica. La vinculación de la luz con lo tectónico y la gravedad con lo estereotómico, así como la idea de que la gravedad construye el espacio y la luz construye el tiempo, ideas en las que Campo Baeza insiste en la mayor parte de sus escritos, son sin duda deudoras de la heterogénea interpretación de Frampton.

47. "De las cosas creadas, la más hermosa de todas es la luz: es el símbolo de todo lo bueno y de todo lo saludable. (...) La ausencia de la luz nos pone tristes, su retorno nos devuelve la alegría; los colores excitan en nosotros un vivo gozo, que alcanza su más alto grado cuando se hacen transparentes. Todo ello proviene de que la luz es el correlato y la condición del más perfecto conocimiento intuitivo". SCHOPENHAUER, Arthur: *El Mundo como voluntad y representación (4a Ed)*. México: Porrúa, 1997, pp. 162-163 (Libro III, sección XXXVIII).

48. "Las obras de arquitectura presentan al mismo tiempo una cierta relación con la luz; adquieren doble belleza a la plena luz del sol, con el cielo azul como fondo, y adquieren también otros aspecto completamente distinto a la luz de la luna. De aquí que al plantear una obra de arte arquitectónica deba hacerse especial aprecio de los efectos de la luz y del carácter del cielo bajo el cual se ha de construir. Y esto tiene su principal razón en que una clara y viva luz es lo que puede dar completa plasticidad a cada una de las partes y sus relaciones; pero, además yo soy de opinión de que la arquitectura está destinada a expresar, junto a la solidez y la gravedad, la esencia de la luz, completamente contraria a éstas. En efecto, como la luz está como aprisionada, cohibida, rechazada por las impenetrables masas variamente configuradas, desarrolla su naturaleza y sus cualidades de la manera más pura y distinta con gran placer del espectador, puesto que la luz es la más deliciosa de las cosas, como la condición y el correlato objetivo del perfecto conocimiento intuitivo". SCHOPENHAUER, Arthur: *El Mundo como voluntad y representación (4a Ed)*. México: Porrúa, 1997, p. 174 (Libro III, sección XLIII).

49. *Sobre el papel que jugó Moholy-Nagy en el desarrollo de las vanguardias artísticas europeas*, ver GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: *Después de Einstein: una arquitectura para una teoría*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 141 y ss.

50. *Sobre la presencia de artículos científicos en la revista editada por Le Corbusier*, ver GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: *Después de Einstein: una arquitectura para una teoría*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 168.

I.4. LA REFLEXIÓN ARQUITECTÓNICA

SOBRE LA GRAVEDAD Y LA LUZ

La identificación e interrelación de las reflexiones sobre la importancia arquitectónica de la luz y de la gravedad por parte de Vitruvio, Wren y Schopenhauer a fin de dar con el origen del actual interés arquitectónico por la gravedad y la luz, se constituye en la principal aportación de esta primera etapa de la investigación. Se consigue, además, acotar el contexto histórico y cultural en el que las nociones de gravedad y luz aparecen por vez primera de manera explícita en la reflexión teórica sobre la arquitectura: esto se produce entre la publicación de “De Nonnullis ad poema pertinentibus” de Baumgarten, en 1775 y las sucesivas ediciones de 1819, 1844 y 1859 de “Die Welt als Wille und Vorstellung” de Schopenhauer. Se señala también la aproximación de las vanguardias artísticas europeas de principios del siglo XX a la física einsteiniana, pues esa inquietud artística deviene en punto de partida del interés contemporáneo de la arquitectura en torno a la gravedad y la luz.

Por otra parte, al margen de estas contribuciones de carácter específicamente histórico, se descubre que los autores analizados coinciden en señalar la necesidad de atender a la gravedad y a la luz de manera conjunta en el plano teórico, identificando a la estructura como el elemento construido a través del cual interactúan ambas realidades físicas en la arquitectura.

En efecto, esta primera etapa de la investigación permite constatar que, aunque de modos distintos, desde antiguo la arquitectura se ha interesado por la gravedad y la luz. Aunque no lo expresen de manera explícita, todos los autores evidencian a través de sus textos que, lejos de ser realidades físicas independientes, la gravedad y la luz son cuestiones sobre las que se debe reflexionar de manera conjunta, al unísono, poniendo el acento no en su naturaleza particular, sino en las consecuencias de su mutua interrelación. El interés de la reflexión sobre la gravedad y la luz no estriba, pues, en su naturaleza autónoma, sino en las consecuencias conceptuales, formales y sensoriales de su mutua interrelación.

51. Ver FRAMPTON, Kenneth: Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal, 1999, p.12

Se constata también que cualquier reflexión arquitectónica que contemple la importancia de la gravedad acaba por reconocer, ineludiblemente, el papel central de la estructura en el hecho arquitectónico; no en vano la principal misión de la estructura es encauzar los efectos de la gravedad sobre la materia.

En su tratado Vitruvio otorga una importancia fundamental al soporte. Tanto es así que el carácter de la obra de arquitectura depende de las proporciones que se establezcan entre las distintas partes de la propia columna y entre las distintas columnas que conforman el conjunto de la obra. La prescripción exacta y precisa de estas proporciones responde a la voluntad de garantizar la consistencia estática y visual del conjunto de la obra. En tanto que la firmeza y la durabilidad de la arquitectura vienen determinadas por las leyes geométrico-físicas de la estática, Wren advierte también la importancia central de la estructura en su particular interpretación de la obra de Vitruvio. Por su parte, en tanto que Schopenhauer reconoce en la manifestación de la Idea de la gravedad la principal finalidad estética de la arquitectura, la estructura deviene un elemento fundamental, pues precisamente su principal función es encauzar los efectos de esa fuerza universal⁵². No obstante, la estructura no sólo se encarga de ordenar la gravedad sino que, por medio de la opacidad de la materia que la constituye, ordena también los efectos de la luz. La voluntad de interrelacionar a la gravedad con la luz en el ámbito teórico encuentra su correspondencia física real en la estructura, que se convierte en el elemento encargado de encauzar y ordenar conjuntamente ambas realidades físicas.

Se descubre también que, a pesar de la potencia y la importancia de los textos analizados, en ninguno de ellos se plantea la necesidad de conceptualizar la gravedad y la luz como paso previo al desarrollo de cualquier reflexión, probablemente por la enorme dificultad de definir su naturaleza. En determinadas ocasiones esta circunstancia ha intentado ser soslayada o disimulada por medio del uso de un lenguaje poético y trascendente que, a pesar de su alta capacidad de sugestión, da lugar a ideas tan fundamentales como poco fundamentadas.

52. Navarro Baldeweg mantiene una postura muy cercana a la de Schopenhauer al afirmar que la contemplación de los fenómenos gravitatorios a través de la estructura debe causar una cierta emoción en el espectador. Sin embargo, mientras que para el filósofo alemán esto se consigue mostrando la manera en que la estructura encauza correctamente la gravedad, el arquitecto español opta por potenciar la sensación de peso o de flotación en determinados elementos estructurales con la finalidad de despertar la consciencia de pertenencia al hecho gravitatorio. Ver apartado I-2.1. Juan Navarro Baldeweg.

El presente trabajo de investigación pretende encontrar la manera de dotar a la reflexión arquitectónica teórica sobre la gravedad y la luz de un fundamento sólido, más allá de las posibilidades de la poética del discurso trascendente. Para ello, antes de embarcarse en reflexiones más complejas, parece conveniente centrar la atención en la propia conceptualización de la gravedad y de la luz con la finalidad de intentar comprender de qué nos referimos cuando nos referimos a ellas. A tal fin parece imprescindible tratar de responder a dos preguntas en apariencia sencillas, como *¿qué es la gravedad y qué es la luz?*. La teoría arquitectónica se demuestra incapaz de dar respuesta a estas preguntas porque ni siquiera ha llegado a plantearse.

Frente a la dificultad que plantean preguntas de esta naturaleza el ser humano ha desarrollado dos formas de conocimiento bien distintas: la *intuición artística* y la *comprensión científica*⁵³. El conocimiento artístico se basa en la posibilidad de *expresar intuitivamente* una determinada complejidad. La intuición es una revelación de la propia mente que surge de una percepción íntima de una determinada realidad⁵⁴ y, para que esta intuición pueda ser considerada como *conocimiento*, debe poder expresarse de algún modo⁵⁵. De acuerdo con Arthur Schopenhauer, la intuición basada en la percepción y la aprehensión de la naturaleza solamente puede expresarse a través del arte⁵⁶.

En las últimas décadas ha habido algunos artistas, como Eduardo Chillida (1924-2002), Christopher Wilmarth (1943-1987), James Turrell (1943-) o el propio Juan Navarro Baldeweg (1939) -por citar solamente a algunos-, especialmente interesados en la reflexión sobre la gravedad y la luz. No obstante, a pesar de que la reflexión artística permite una cierta aproximación intuitiva a la naturaleza de ambas realidades, en ningún caso permite conceptualizarlas desde un punto de vista teórico: *“he aquí la grandeza del arte, se intuye sin necesidad de comprender”*⁵⁷.

En cambio, el fin de la ciencia es *comprender* el mundo que nos rodea, y comprender significa relacionar una realidad compleja con una de sus posibles representaciones mentales⁵⁸. Esta representación mental de carácter científico, basada en la comprensión y no en

53. El doctor en física, divulgador y profesor Jorge Wagensberg Lubinski (1948-) ha reflexionado ampliamente sobre las tres formas de conocimiento del ser humano: la intuición artística, la revelación religiosa y la comprensión científica. Aquí nos interesa solamente la relación que puede establecerse entre el arte y la ciencia y, aunque se ha escrito mucho sobre ello, no es éste el lugar para exponer los distintos puntos de vista que existen sobre esta relación. Las reflexiones desarrolladas en este apartado se basan en las consideraciones expuestas por Wagensberg en su extensa bibliografía.

54. “Intuir es relacionar, quizá sólo rozar, una realidad con otra realidad que, comprendida o no, ha sido largamente percibida. (...) La intuición es una revelación de la propia mente, una mente que se nutre con cada nueva percepción”. WAGENSBERG, Jorge: La rebelión de las formas, o, cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta (2a Ed). Barcelona: Tusquets, 2004, p. 294

55. “Una intuición que se puede expresar ya es conocimiento”. WAGENSBERG, Jorge: A más cómo menos por qué. 747 reflexiones con la intención de comprender lo fundamental, lo natural y lo cultural. Barcelona: Tusquets, 2006, p. 33, aforismo 95.

56. Ver apartado I-3.3.1 La arquitectura como manifestación de la luz y de la gravedad.

la intuición ⁵⁹, debe traducir de la manera más objetiva, inteligible y dialéctica posible la complejidad de la realidad en formas de conocimiento más compactas, las leyes físicas ⁶⁰.

Precisamente se descubre que entre los más importantes retos de la física se encuentra el intentar comprender la naturaleza y la causa eficiente de la gravedad y de la luz. Durante siglos, los físicos más importantes de toda la historia se han esforzado en formular leyes y teorías coherentes entre sí y con la realidad, mediante las cuales han intentado descubrir y describir los fenómenos y la naturaleza de la gravedad y la luz. Este conocimiento físico en torno a la gravedad y la luz, construido durante tanto tiempo y con tanto rigor, no debe quedar al margen de la reflexión teórica en el ámbito de la arquitectura. Si lo que se quiere es minimizar las dificultades que entraña la reflexión poética de carácter intuitivo-artístico sobre la gravedad y la luz desde el ámbito de la teoría arquitectónica. Por su cantidad (hace más de dos mil años que la física se ocupa de estas cuestiones), su calidad (las mentes más brillantes de la física de todos los tiempos han intentado comprender la naturaleza de ambos fenómenos) y su cualidad (el método científico induce a la conceptualización de las cuestiones estudiadas), el conocimiento físico de las dos realidades físicas que aquí nos ocupan debe incorporarse necesariamente a cualquier reflexión teórica realizada en el ámbito de la arquitectura ⁶¹.

Así lo indica el hecho de que tanto Vitruvio, Wren y Schopenhauer, como las vanguardias artísticas europeas de principios del siglo XX, expresen de un modo más o menos explícito un manifiesto interés por la ciencia en general y la física en particular. Ya en el tratado sobre arquitectura más antiguo conservado, Vitruvio incorpora las reflexiones de sus predecesores griegos, especialmente interesados en el conocimiento de la naturaleza del universo. Así, concibe la arquitectura como algo intrínsecamente vinculado a la gnomónica y a la mecánica, es decir, a la investigación de la variable incidencia de los rayos de luz solar sobre la tierra y al estudio del constante movimiento de los cuerpos dotados de masa.

Tras un larguísimo periodo de inactividad, el estudio científico de la

57. "He aquí la grandeza del arte: se intuye sin necesidad de comprender". WAGENSBERG, Jorge: *La rebelión de las formas, o, cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta (2a Ed)*. Barcelona: Tusquets, 2004, p. 296

58. "Los conceptos y las leyes fundamentales son invenciones libres del intelecto humano que no pueden ser comprobadas a priori ni por la naturaleza del intelecto humano ni de cualquier otro modo. Los conceptos y leyes fundamentales ya no reducibles configuran la parte inevitable de teoría que la razón no puede comprender. El objeto principal de toda teoría es simplificar y reducir al máximo esos elementos fundamentales e irreducibles sin tener que desprenderse de la demostración correspondiente a cualquier contenido experimental". EINSTEIN, Albert: *Mi visión del mundo (6a Ed)*. Barcelona: Tusquets, 2006, p.138

59. "He aquí el gran mérito de la ciencia: se comprende sin necesidad de intuir". WAGENSBERG, Jorge: *La rebelión de las formas, o, cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta (2a Ed)*. Barcelona: Tusquets, 2004, p. 296

60. "Comprender es relacionar una realidad con algo más compacto que ella misma y, en el límite, con su propia esencia. (...) En tal comprensión está su comprensión (curiosamente, lo que ya no se comprende son las leyes fundamentales, por eso: por ser fundamentales, por ser incompresibles). Descubrir una nueva esencia significa ganar conocimiento. Y cada nueva esencia adquirida multiplica nuestra capacidad para comprender el mundo que nos rodea. O sea, la capacidad para comprender el mundo depende del conocimiento acumulado". WAGENSBERG, Jorge: *La rebelión de las formas, o, cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta (2a Ed)*. Barcelona: Tusquets, 2004, p. 294

"Comprender una realidad es comprimirla dentro de una ley. Comprender una ley es comprimirla dentro de otra ley. Una ley fundamental es la que no se comprime en ninguna otra. Una ley fundamental es incompresible. Una ley fundamental es incomprensible". WAGENSBERG, Jorge: *A más cómo menos por qué. 747 reflexiones con la intención de comprender lo fundamental, lo natural y lo cultural*. Barcelona: Tusquets, 2006, p. 39

gravedad y de la luz recibe un renovado impulso a finales del siglo XVI que se extiende hasta la primera mitad del siglo XVIII. Éste es, sin duda, un periodo de gran actividad científica en el que se suceden numerosas teorías sobre la naturaleza de ambos fenómenos. El parejo interés de Sir Christopher Wren por la ciencia y la arquitectura es lo que hace posible la comprensión de la importancia capital de la estática y a la óptica, es decir, al estudio geométrico-físico de las leyes de la gravedad terrestre y de los fenómenos de la luz solar, para la arquitectura.

Sin embargo, fruto de las manifiestas limitaciones del conocimiento científico de la naturaleza a partir de la segunda mitad del siglo XVIII hasta la primera mitad del siglo XIX, la filosofía alemana se lanza a una vehemente y amplia reflexión sobre las distintas formas del conocimiento humano que no sólo incluye la ciencia, sino también el arte como manera de aprehensión de la naturaleza del mundo. Es gracias a este interés conjunto por la filosofía natural -ciencia- y la filosofía del arte -estética- que Arthur Schopenhauer concibe como objetivo primordial de la obra de arte la expresión de las leyes generales de la naturaleza a través de la manifestación de sus fenómenos concretos. En base a esto, afirma Schopenhauer que la principal finalidad estética de la arquitectura es, pues, la expresión de la naturaleza de la gravedad y de la luz.

61. Cabe señalar que durante la primera fase de búsqueda bibliográfica de la presente investigación el autor advierte que, al explorar en los catálogos de las bibliotecas utilizando como palabras clave "luz", "gravedad", "espacio" o "estructura", existen muchas más referencias bibliográficas propias del ámbito de la física que de la arquitectura o el arte, lo que induce a considerar la conveniencia de incorporar esta bibliografía a la investigación antes incluso de constatar el interés de Vitruvio, Wren, Schopenhauer y las vanguardias modernas por el conocimiento físico de estas cuestiones. Sin embargo, lo que de verdad induce al autor a tal planteamiento es que una parte muy importante de esa primera bibliografía científica estaba centrada en las teorías desarrolladas por Albert Einstein, siempre tan atentas a la luz y la gravedad, el espacio y el tiempo, la geometría y la materia, conceptos todos ellos muy arquitectónicos.

Las vanguardias artísticas europeas de principios del siglo XX, en parte heredadas de la estética alemana decimonónica, incorporan de manera consciente los nuevos postulados de la física moderna sobre la naturaleza de la gravedad y la luz. Aunque estas ideas devienen en la base conceptual de la arquitectura moderna en sus inicios, a partir de la década de los años treinta estas cuestiones se ven relegadas a un segundo plano. La revalorización del legado teórico de artistas de vanguardia tan destacados como Theo Van Doesburg o Laszlo Moholy-Nagy durante la década de los años sesenta del siglo XX por parte de Gyorgy Kepes y Kenneth Frampton respectivamente vuelve a poner a la gravedad y a la luz en el centro de la reflexión arquitectónica. Estas reflexiones sientan las bases conceptuales de la obra de Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza respectivamente.

Se descubre así que el interés arquitectónico por la gravedad y por la luz ha estado siempre íntimamente vinculado al conocimiento científico de la naturaleza y los fenómenos de ambas realidades físicas. No es de extrañar, pues, que la teoría arquitectónica incorpore la gravedad y la luz en sus postulados precisamente en aquellos momentos de la historia en que el ser humano ha mostrado un especial interés por el conocimiento científico de ambas realidades físicas.

Es por ello que, lejos de resultar sorprendente o de parecer forzada, la incorporación del conocimiento científico en general y de la física en particular a la teoría de la arquitectura debe entenderse como algo tan natural como conveniente. Es por ello que la segunda parte de la presente tesis doctoral se dedica al estudio de la naturaleza de la gravedad de la luz, buscando en la física teórica la respuesta a las preguntas que la teoría de la arquitectura ni siquiera se ha planteado:

¿qué es la gravedad?

¿qué es la luz

II. LA GRAVEDAD Y LA LUZ COMO FENÓMENOS FÍSICOS

II.1. Introducción.....	123
II.1.1. Los tres grandes periodos en la física de la luz y la gravedad.....	124
II.1.2. Consideraciones de carácter metodológico.....	126
II.2. Los primeros postulados de la antigüedad clásica.....	129
II.2.1. Aristóteles: gravedad telúrica y luz etérea.....	129
II.2.1.1. La “gravedad” como tendencia natural de los cuerpos pesados.....	129
II.2.1.2. La luz como cualidad del medio diáfano.....	131
II.2.2. Euclides y Arquímedes: geometría, luz y gravedad.....	132
II.2.2.1. La luz geométrica de Euclides.....	133
II.2.2.2. La “gravedad” geométrica de Arquímedes.....	134
II.2.3. Plutarco: la gravitas romana.....	135
II.3. La revolución científica del siglo XVII.....	137
II.3.1. Galileo Galilei: crítica a la física aristotélica.....	138
II.3.1.1. El principio del fin de la gravedad aristotélica.....	138
II.3.1.2. La indefinición material de la luz.....	142
II.3.2. Johannes Kepler: la luz y la gravedad, como virtudes.....	143
II.3.2.1. La luz, materia inmaterial.....	143
II.3.2.2. La gravedad terrestre y el movimiento celeste.....	146
II.3.3. René Descartes: vórtices, gravedad y luz.....	149
II.3.3.1. La gravedad terrestre como repulsión desigual de la materia.....	150
II.3.3.2. La luz como acción de la materia sutil.....	151
II.3.4. Christiaan Huygens: una nueva luz sin gravedad.....	153
II.3.4.1. La luz como onda etérea.....	153
II.3.4.2. La gravedad “descartada”.....	155
II.3.5. Isaac Newton: éter, gravedad y luz.....	157
II.3.5.1. La gravedad, una fuerza universal.....	159
II.3.5.2. La luz corpuscular.....	165
II.3.6. La interacción luz-gravedad después de Newton.....	169
II.4. La física moderna de los siglos XIX-XX.....	171
II.4.1. Hacia una nueva luz.....	172
II.4.1.1. El siglo XIX: de la luz corpuscular a la onda electromagnética.....	173
II.4.1.1.1. <i>Young y Fresnel: de vuelta a la teoría ondulatoria de la luz.....</i>	173
II.4.1.1.2. <i>Faraday y Maxwell: la luz como onda electromagnética.....</i>	175
II.4.1.2. Albert Einstein: la nueva luz del siglo XX.....	177
II.4.1.2.1. <i>La naturaleza cuántica de la luz.....</i>	178
II.4.1.2.2. <i>La velocidad de la luz como constante universal.....</i>	180
II.4.2. Albert Einstein: gravedad, geometría y espacio.....	182
II.4.2.1. Los dos principios fundamentales de la relatividad general.....	184
II.4.2.1.1. <i>La curvatura del espacio-tiempo por acción de la masa.....</i>	184
II.4.2.1.2. <i>La flotación libre de la materia en el espacio-tiempo curvo.....</i>	186
II.4.2.2. La gravitación de la luz en la relatividad general.....	189
II.4.3. Hacia una teoría unificada de la luz y la gravedad.....	190
II.5. Conclusiones.....	193
II.5.1. Sobre las grandes teorías de la gravedad.....	193
II.5.2. Sobre las sucesivas teorías en torno a la luz.....	195
II.5.3. Las teorías unificadas sobre la gravedad y la luz.....	198
II.5.4. La relación física entre la gravedad y la luz.....	200

II.1. INTRODUCCIÓN

*“No podemos explicar bien la naturaleza de las cosas por los preceptos de los Físicos si no se demuestran con sutileza su razón y causas, de qué modo y por qué fueron creadas.”*⁰¹

Marco Vitruvio

A lo largo del tiempo el ser humano ha intentado aproximarse, a través de la ciencia, al conocimiento objetivo de la *naturaleza* de la luz y de la gravedad. Las mentes más brillantes de la historia de la física han intentado elaborar hipótesis teóricas con las que descubrir su naturaleza y describir sus fenómenos. Sin embargo, sistemáticamente se han realizado nuevas observaciones que han puesto en entredicho las teorías ya existentes y que, a su vez, han inducido a la formulación de otras nuevas hipótesis. Éste ha sido el sino del trabajo científico sobre la luz y la gravedad durante más de dos mil años y, en la actualidad, nada hace presagiar ningún cambio en este sentido.

En ausencia de una teoría definitiva, es preciso centrar el interés en el estudio de la evolución histórica de las sucesivas teorías sobre la naturaleza de la gravedad y de la luz. Todas las investigaciones que se han realizado en esta dirección se han restringido al estudio de la evolución de las teorías sobre la gravedad o sobre la luz de manera independiente, es decir, centrándose únicamente en el análisis de uno de los dos fenómenos, normalmente de la luz. Este hecho resulta verdaderamente sorprendente si se tiene en cuenta que todos los grandes físicos de la historia han dedicado enormes esfuerzos a la reflexión, más o menos conjunta, sobre la luz y la gravedad.

Es por ello que este capítulo se ha planteado como un análisis unificado de la evolución de las teorías sobre la naturaleza de la gravedad y de la luz formuladas por los físicos más importantes de todos los tiempos. Solamente por esta razón, el trabajo aquí desarrollado posee ya valor

01. De Architectura, Libri Decem, *Libro II, Capítulo I (Del principio de los edificios)*, núm. 8. Ver VITRUVIO POLIÓ, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p. 31

en sí mismo. La descripción evolutiva realizada en este capítulo puede entenderse, pues, como la primera piedra de una inexistente historia científica unificada de la gravedad y la luz.

Con todo, no debe olvidarse la finalidad concreta que le corresponde a este capítulo en el marco de la investigación de la presente tesis doctoral: dotar de un conocimiento sobre la luz y la gravedad basado en la física, a través del cual se pueda reflexionar sobre la relación estructural entre la gravedad y la luz en la arquitectura.

II.1.1. Los tres grandes periodos en la física de la luz y la gravedad

En aras de una mayor claridad expositiva, se ha procedido a dividir el análisis de la evolución histórica de las teorías físicas sobre la naturaleza de la gravedad y de la luz en tres periodos, cada uno de los cuales se corresponde con los momentos de mayor producción científica de nuestra historia: el nacimiento de la ciencia en la antigüedad clásica, la revolución científica del siglo XVII y la física moderna de los siglos XIX-XX.

1) *Primer periodo: la antigüedad clásica.* La física nació en la Grecia clásica pues, con sus teorías, los grandes filósofos griegos sentaron las bases de las investigaciones científicas de los siglos venideros. Aunque fue ésta una etapa muy prolífica, el análisis aquí realizado se ha centrado en la descripción de la física aristotélica. Aristóteles basó sus teorías sobre la luz y la gravedad en una concepción cosmológica propia e introdujo, también, la dicotomía entre *lo pesado* y *lo ligero* como base fundamental para comprender la naturaleza de ambos fenómenos y su relación recíproca. Inestimable fue también la aportación del gran geómetra Euclides que, con la introducción de la geometría en el estudio de la luz, inauguró una nueva manera de aproximarse a su conocimiento. Siguiendo su estela, Arquímedes fue el primero en utilizar la geometría para aproximarse al estudio de la gravedad en los cuerpos flotantes y en las figuras planas. Sin embargo, fue Plutarco quien, con su nueva idea sobre la gravedad, intuyó que era posible extender el fenómeno de la gravitación terrestre a todo el conjunto del universo.

2) *Segundo periodo: la revolución científica del siglo XVII.* Con la decadencia del imperio romano de occidente se inició un largo periodo de letargo, durante el cual no se realizó ninguna investigación científica sobre la gravedad ni la luz. Sin embargo, en el siglo XIII la física aristotélica recobró un renovado brío. Los postulados aristotélicos fueron aceptados dogmáticamente durante los tres siglos siguientes, hasta que a finales del siglo XVI se inició una revolución científica sin precedentes. La crisis de la física aristotélica la inició Galilei por medio de inequívocas observaciones que pusieron de manifiesto las inconsistencias de los postulados de Aristóteles. Sin embargo, Galilei fue incapaz de formular una nueva teoría, alternativa a la del filósofo griego, sobre la naturaleza de la gravedad y de la luz. Esta tarea recayó en Kepler, astrónomo contemporáneo a Galilei. Él fue el primero en proponer una explicación de los fenómenos de la gravedad y de la luz basada en unos mismos principios físicos y geométricos. En base a las nuevas ideas de Galilei y Kepler, Descartes actualizó la cosmología aristotélica con la finalidad de construir una cosmología propia, a través de la cual intentó vehicular una nueva explicación conjunta y unificada de los fenómenos de la gravedad y de la luz basada en la existencia de vórtices etéreos. Aunque no fueron pocas, las aportaciones de Huygens en el conocimiento de la gravedad no implicaron ningún cambio sustancial en la concepción cartesiana de la misma. Sin embargo, sí trascendió la teoría de la luz de Descartes al plantear una nueva concepción ondulatoria de la luz. La revolución científica del siglo XVII terminó con la física de Isaac Newton quien, mediante la noción de fuerza a distancia, formuló las dos grandes teorías de la física clásica: la teoría corpuscular de la luz y la ley de gravitación universal.

3) *Tercer periodo: la física moderna de los siglos XIX-XX.* Aunque durante el siglo XVIII las teorías de Newton gozaron de una amplia aceptación, a lo largo del siglo XIX se sucedieron una serie de observaciones que socavaron, de raíz, la credibilidad de sus presupuestos fundamentales. Como consecuencia, sus teorías sobre la luz y la gravedad fueron seriamente cuestionadas. A mediados del siglo XIX la newtoniana teoría corpuscular fue reemplazada por una nueva concepción ondulatoria de la luz, basada en el electromagnetismo de Faraday

y Maxwell. Sin embargo, a principios del siglo XX Albert Einstein propuso una nueva descripción de la naturaleza de la luz basada en el cuanto de energía. A partir de una amplia reflexión sobre la luz Einstein formuló la teoría de la relatividad que, convenientemente ampliada, brindó una nueva manera de comprender la naturaleza de la gravitación, basada en la deformación de la geometría del espacio por acción de la masa.

El reto que dejó Einstein a los físicos de la segunda mitad del siglo XX fue la unificación de las teorías sobre la luz y la gravedad, una tarea que aún hoy no ha podido ser completada.

II.1.2. Consideraciones de carácter metodológico

Al estudio realizado en este capítulo sobre la evolución histórica de las principales teorías sobre la naturaleza de la gravedad y de la luz se le ha exigido la mayor brevedad y concisión posible. Para ello, ha sido imprescindible realizar una acotación previa de los casos de estudio. A tal fin, se han seleccionado los físicos más relevantes en el estudio de ambos fenómenos, cuyas reflexiones se han contextualizado o complementado, en algunas ocasiones, con teorías y observaciones de segundo orden realizadas por otros investigadores contemporáneos.

A fin de facilitar la comprensión de las ideas que cada físico ha concebido sobre ambos fenómenos de manera conjunta, la exposición ha sido organizada por orden cronológico y por autor. Aunque para una correcta comprensión de las teorías ha sido necesario describir las reflexiones de cada científico sobre la luz y la gravedad por separado, en todo momento se han señalado los puntos de contacto y las similitudes entre ambas teorías.

En aras de la brevedad antes mencionada, se ha renunciado conscientemente tanto a la explicación general del pensamiento de cada autor, como a la descripción detallada de aquellos aspectos concretos de algunas teorías relacionados con la reflexión sobre la

gravedad y la luz de un modo demasiado indirecto. Einstein ofrece un ejemplo ilustrativo pues, a pesar del enorme interés de su concepción del campo gravitatorio, se ha renunciado a la explicación global de la teoría de la relatividad general y a la descripción detallada de ciertos aspectos concretos de la misma, como por ejemplo la noción de espacio-tiempo. Lo importante aquí es, pues, la exposición de aquellos aspectos más directamente relacionados con sus ideas acerca de la gravedad y de la luz.

Se ha renunciado, también, al estudio concreto de ciertas etapas de la historia. El hecho de que el conocimiento anterior al periodo helénico estuviera basado principalmente en la mitología y no en el método científico ha hecho innecesario su estudio. Por otro lado, la congelación del conocimiento científico desde la decadencia del imperio romano hasta el renacimiento impidió la formulación de nuevas teorías sobre la gravedad y a luz, de modo que tampoco se ha realizado ningún análisis concreto de este periodo. Además, las aportaciones más importantes de los pensadores de los siglos XV y XVI se han incorporado en la descripción de las primeras reflexiones del siglo XVII por la influencia directa que ejercieron sobre éstas. Cabe advertir, también, que se han obviado todas las consideraciones de carácter teológico que han acompañado al trabajo científico durante los periodos de mayor fervor religioso. Finalmente, no se han expuesto las líneas de investigación iniciadas a mediados del siglo XX, tanto por su falta de verificación experimental como por la extrema dificultad que presenta su comprensión, muy alejada de cualquier idea intuitiva que pueda asociar un profano de la física a los fenómenos de la gravedad y de la luz.

Para la elaboración de este capítulo se han consultado varias decenas de referencias bibliográficas, dentro de las cuales cabe distinguir dos grandes grupos: la bibliografía de carácter general y divulgativo, y la bibliografía específica. Dentro del primer grupo se encuentran todas aquellas obras de divulgación cuya principal finalidad es acercar al profano de la ciencia al conocimiento de la física, ya sea en temas concretos o de carácter más general. Cabe decir que el carácter divulgativo de esta bibliografía no tiene porqué

estar reñido, necesariamente, con el rigor. El segundo grupo lo forma la bibliografía específica en física teórica e historia de la física. En la mayor parte de los casos se trata de traducciones comentadas de las obras originales de los físicos objeto de estudio. Tanto las propias obras traducidas de los originales, como los comentarios que éstas suscitan por parte de los traductores resultan, en demasiadas ocasiones, enormemente voluminosas y de difícil acceso y comprensión para un lector no versado en física. A esto se añade el hecho de que no todas las obras que ha sido preciso consultar han sido traducidas al castellano o al inglés, hecho que ha dificultado aún más el proceso de asimilación de su contenido. Evidentemente, también se ha obviado todo el aparato matemático sobre el que se fundamentan estas teorías.

A tal efecto, cabe mencionar que gracias a la estancia como *visiting teacher and researcher* en la London Metropolitan University, se ha podido tener acceso directo a los archivos de la Royal Society. Ello ha hecho posible la consulta de ediciones originales e incluso manuscritas de sus científicos más importantes, como Sir Christopher Wren, Robert Hooke o Isaac Newton.

Superadas las dificultades que planteaba esta fase de la investigación, se ha intentado exponer y sintetizar el contenido de las teorías científicas analizadas en este capítulo con la mayor claridad que ha sido posible, a fin de que, con independencia de su grado de conocimiento de la física teórica, cualquier persona interesada en la investigación aquí planteada pueda entender lo aquí expuesto.

Para terminar, es preciso advertir también de la desproporción que se da en este capítulo entre la gran cantidad de notas al margen y el reducido número de imágenes e ilustraciones. Probablemente esta desproporción ha sido contagiada por la bibliografía específica consultada anteriormente mencionada pero, además, en ningún momento se ha pretendido escatimar en referencias y citas, para así dejar constancia del origen de la información utilizada y dar voz a los principales protagonistas de esta historia.

II.2. LOS PRIMEROS POSTULADOS DE LA ANTIGÜEDAD CLÁSICA

La invención de la física en tanto que ciencia que intenta explicar la naturaleza y las causas de los fenómenos del universo corresponde a los filósofos griegos. El más influyente de todos ellos es Aristóteles, quien basa su física en la contraposición entre lo pesado y lo ligero, la gravedad y la luz. Inestimable es también la contribución de Euclides y de Arquímedes al introducir la geometría en el estudio de la gravedad y la luz. Por último, es remarcable también la aportación del filósofo greco-romano Mestrio Plutarco, que con sus reflexiones inaugura una nueva manera de entender la gravedad.

II.2.1. ARISTÓTELES: GRAVEDAD TELÚRICA Y LUZ ETÉREA

Los pensadores de la antigüedad clásica se aproximaron desde distintos puntos de vista a la naturaleza de los fenómenos asociados a la gravedad y la luz. De entre todas esas teorías fueron las de Aristóteles de Estagira (386-322 a.C.) las que perduraron a lo largo del tiempo. Muchas de las obras escritas por los filósofos griegos no sobrevivieron al fanatismo cristiano una vez que ésta se convirtió en la religión oficial del Imperio romano, pero algunos tratados cruciales del estagirita sí lo hicieron. Siglos más tarde la Iglesia no solo aceptó sus enseñanzas sobre filosofía natural, sino que lo convirtió en toda una autoridad del conocimiento. Durante centurias cualquier alternativa científica a los postulados aristotélicos fue tildada de hereje y, por tanto, contundentemente silenciada. La comprensión aristotélica de la naturaleza de la gravedad y de la luz perduró durante aproximadamente dos milenios.

II.2.1.1. La “gravedad” como tendencia natural de los cuerpos pesados

Su tratado sobre *Física* está basado en la idea de que todo fenómeno físico -como la gravedad o la luz- debe poder ser

01. En griego, el término “fysis” (de donde viene el vocablo “física”, significa “naturaleza”. Afirma Aristóteles que “puesto que la naturaleza es un principio del movimiento y del cambio, y nuestro estudio versa sobre la naturaleza, no podemos dejar de investigar qué es el movimiento.” *Aristóteles* (“Física”, Libro III, 200b15). ARISTÓTELES; ECHANDÍA, Guillermo R. (ed): Física/Aristóteles. Madrid: Gredos, 1995, p. 176

02. “Puesto que distinguimos en cada género lo actual y lo potencial, el movimiento es la actualidad de lo potencial en cuanto que tal.” *Aristóteles* (“Física”, Libro III: 201a10). ARISTÓTELES; ECHANDÍA, Guillermo R. (ed): Física/Aristóteles. Madrid: Gredos, 1995, p. 178

03. "Así, puesto que no hay movimiento de una sustancia ni de una relación, ni tampoco de un agente ni de un paciente, sólo queda la posibilidad de que haya movimiento según la cualidad, la cantidad o el lugar, ya que en cada uno de éstos hay contrarios. Al movimiento cualitativo lo llamamos alteración, pues éste es el nombre común que se le da. Por «cualidad» no entiendo aquí aquello que está en la sustancia (ya que también de una diferencia específica se dice que es una cualidad), sino esa afección según la cual decimos de una cosa que está afectada o no está. Para el movimiento cuantitativo no tenemos un nombre común, y según sea el caso llamamos «aumento» o «disminución»: un aumento es un movimiento hacia una magnitud completa, y una disminución es desde esa magnitud completa. En cuanto al movimiento local no tenemos un nombre común ni tampoco particular para designarlo; llamaremos en general «desplazamiento», aunque propiamente, este término se aplique (en griego) sólo a las cosas que no tienen capacidad de detenerse cuando cambian de lugar y a las cosas que no se mueven localmente por sí mismas." *Aristóteles* ("Física", Libro V: 226a25). *ARISTÓTELES; ECHANDÍA, Guillermo R. (ed): Física/Aristóteles. Madrid: Gredos, 1995, pp. 307-308.*

04. "El lugar de los primeros [fuego, tierra] está claramente determinado, mientras que los segundos [agua, aire] oscilan entre el arriba y el abajo." *Aristóteles* ("Física", Libro III: 205a25).

"Los desplazamientos de los cuerpos naturales simples, como el fuego, la tierra y otros semejantes, no sólo nos muestran que el lugar es algo, sino también que ejerce un cierto poder. Porque cada uno de estos cuerpos, si nada lo impide, es llevado hacia su lugar propio, unos hacia arriba y otros hacia abajo." *Aristóteles* ("Física", Libro IV: 208b10).

ARISTÓTELES; ECHANDÍA, Guillermo R. (ed): Física/Aristóteles. Madrid: Gredos, 1995, pp. 200 y 222 respectivamente.

explicado a partir del movimiento⁰¹, definido como el paso de la potencia al acto⁰². Cuando el paso de la potencia al acto modifica algún atributo de la sustancia movida -sin que ésta deje de ser la misma- pueden distinguirse tres clases de movimientos⁰³, de los cuales aquí sólo nos interesan dos: el movimiento de *alteración* y el movimiento de *desplazamiento*. El primero se produce cuando lo modificado es la cualidad de la sustancia movida; tal es el caso de la luz. En cambio, cuando lo que se modifica es el lugar, se produce un *desplazamiento*; es el caso de lo que hoy comprendemos comúnmente por gravedad.

Aristóteles complementa estas nociones sobre el movimiento con una particular visión del cosmos. Concibe un universo esférico en cuyo centro se encuentra la Tierra, compuesta por una combinación de cuatro *elementos*: la tierra, el agua, el aire y el fuego. A cada uno de estos elementos le corresponde un *lugar propio*, una posición natural en el universo hacia la cual tiende a moverse. El elemento tierra se sitúa en el centro del universo, de manera que el elemento agua forma una capa que la cubre; el elemento aire se dispone por encima del agua y, en lo más alto se encuentra el elemento fuego.

Si nada lo impide, cada uno de estos cuatro elementos se inclina a ocupar el lugar que le corresponde por su propia naturaleza. Los cuerpos pesados, constituidos principalmente por el elemento tierra, tienden a moverse hacia abajo, donde se encuentra el centro del universo. El fuego, considerado como el elemento material más ligero, tiende siempre a desplazarse hacia arriba. El agua y el aire son considerados elementos intermedios y, por tanto, oscilan entre el arriba y el abajo. A estos movimientos Aristóteles los llama *movimientos naturales*, movimientos con velocidad constante que, dada la distribución concéntrica de los cuatro elementos, sólo pueden producirse hacia abajo o hacia arriba en línea recta⁰⁴. Siguiendo el esquema aristotélico, la *actualidad* de lo *pesado* está abajo, mientras que cuando se impide de algún modo su movimiento natural hacia abajo el cuerpo permanece *en potencia* (lo mismo ocurre con los cuerpos ligeros, pero hacia arriba).

Esta explicación elemental del mundo le sirve a Aristóteles de base para una incipiente comprensión del fenómeno que, siglos más tarde, se conocería como *gravedad*⁰⁵ aunque con una diferencia fundamental: mientras que en épocas posteriores la gravedad afectaría a toda clase de cuerpos materiales, el estagirita presenta el *peso* como una propiedad privativa de los cuerpos formados principalmente por el elemento tierra (como una piedra, un madero o un trozo de metal, por ejemplo). La velocidad con la que se mueven estos cuerpos es, según Aristóteles, constante y proporcional a su peso, de modo que los cuerpos más pesados se mueven a mayor velocidad que los menos pesados.

II.2.1.2. La luz como cualidad del medio diáfano

No fueron pocos los filósofos griegos que, antes que Aristóteles, intentaron explicar el fenómeno de la visión y la naturaleza de la luz: Heráclito y Anaxágoras concibieron la luz como una rara emanación sustancial (*la luz como sustancia*); Demócrito fundó la teoría atomista, según la cual toda la materia, incluida la luz, estaba formada por minúsculos átomos indivisibles (*la luz como cuerpo*); Platón, que identificaba la luz como una suerte de fuego corpuscular (*la luz como fuego*), entendía que la visión se daba por contacto del fuego interior con el fuego exterior, es decir, de los rayos visuales que emanaban de los ojos con los propios objetos visibles. Aristóteles se apartó de estas teorías y dio con una nueva visión de la luz: la luz como “accidente” del medio diáfano.

Siguiendo con la cosmología aristotélica encontramos que más allá de la Tierra se encuentran los planetas y los astros. A diferencia de la imperfección matérica de la Tierra, en esta región del Cosmos no hay ninguno de los cuatro elementos terrenales antes descritos, pero tampoco hay vacío⁰⁶; un quinto elemento llamado éter se extiende por el universo. Ésta materia etérea es la responsable de la diafanidad⁰⁷, una propiedad compartida por todos aquellos cuerpos que contengan en su naturaleza el elemento etéreo.

05. Aunque en su tratado sobre “Física” Aristóteles se ocupa de lo pesado y lo ligero, no emplea en ningún momento el término “gravedad”.

06. Tal como expresa en el Libro IV de su “Física”, Aristóteles no comparte la idea del vacío defendida por Demócrito (460-370 a.C.). La controversia entre la existencia del éter y la existencia del vacío duró más de dos mil años, hasta que en 1887 Michelson y Morley demostraron empíricamente la inexistencia del éter (ver apartado II-4.1.1.2. Faraday y Maxwell: la luz como onda electromagnética)

07. Según el Diccionario de la Real Academia Española, la *Diafanidad* es “la cualidad de diáfano”; *Diáfano* es, “dicho de un cuerpo, que deja pasar a su través la luz casi en su totalidad”.

08. “La luz es el acto de esta sustancia [el éter], de lo diáfano en tanto que diáfano, y allí donde lo diáfano está presente sólo en potencia, ahí también existe la oscuridad”. Aristóteles, “Sobre el Alma”, libro II, 418 b. ARISTÓTELES; LLANOS, Alfredo (ed): Sobre el alma. Buenos Aires: Juárez, 1969, p. 74.

09. *Entelequia* es “en la filosofía de Aristóteles, fin u objeto de una actividad que la completa y perfecciona” (Diccionario de la Real Academia Española). “La entelequia del diáfano es la luz”, Aristóteles, “Sobre el Alma”, 419 a. ARISTÓTELES; LLANOS, Alfredo (ed): Sobre el alma. Buenos Aires: Juárez, 1969, p. 76.

10. Antonio Ferraz expone las ideas que Platón, maestro de Aristóteles, desarrolla en el *Timeo*. Afirma que para Platón "la luz es fuego" y aclara que "Esta determinación se presta a equívocos si no se hacen precisiones. En primer lugar, lo denotado por 'fuego' (...) es una realidad más amplia que aquélla a la cual nos referimos nosotros cuando usamos semejante término. Fuego no es, necesariamente, la llama que arde y ardiendo quema, sino algo más primario, más difuso; quemar, iluminar, calentar son notas, acciones del fuego, pero que no se dan siempre juntamente. Hay, por tanto, diversas clases de fuego. Y quizá no sea muy arriesgado suponer que 'fuego' ha sido el primer nombre de esa realidad llamada actualmente por los físicos 'energía', entendida, además, en su forma original y originaria." FERRAZ FAYOS, Antonio: *Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton*. Madrid: Dossat, 1974, p. 10.

11. "Sobre el Alma", libro II, 418 b. ARISTÓTELES; LLANOS, Alfredo (ed): *Sobre el alma*. Buenos Aires: Juárez, 1969, p. 74.

12. Citado en FERRAZ FAYOS, Antonio: *Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton*. Madrid: Dossat, 1974, p. 20.

13. Etimológicamente la palabra "luz" viene del latín *lux*, voz emparentada con el griego *λευκός* "leukós". A lo largo de la historia se atribuido a la luz -especialmente en la arquitectura- un cierto carácter liviano, ligero, opuesto a la pesadez gravitatoria. El término "ligero" proviene del francés "léger", que a su vez procede del latín "levis" que, efectivamente, es la cualidad contraria de "gravis". De hecho, afirma Joan Corominas que en algunas lenguas se generalizó la forma "grevis" y no "gravis", en imitación del contrapuesto "levis" (COROMINAS, Joan. *Diccionario crítico etimológico de la lengua castellana*. Madrid: Gredos, 1954). La vinculación de la luz a la noción de ligereza es evidente en la lengua inglesa, pues el término anglosajón "light" significa al mismo "luz, claridad" y "ligereza, livianidad". No sorprende tampoco la similitud entre "light" (luz, ligero, liviano) y "flight" (volar, levitar), que entronca con la idea aristotélica de que los cuerpos ligeros/livianos se mueven "hacia arriba" (levitan), en contraposición a la tendencia a moverse "hacia abajo" de los cuerpos graves.

Aristóteles explica el fenómeno de la luz en el libro segundo de su tratado *Sobre el alma*, escrito mientras preparaba su *Física*. El estagirita explica la luz a partir del movimiento cualitativo, esto es, a partir de la noción de *alteración*. Para el filósofo, "la luz es el acto del diáfano en tanto que diáfano" ⁰⁸. Cuando el diáfano está en acto -en entelequia ⁰⁹-, hay luz; cuando el diáfano está en potencia hay oscuridad. Así, un cuerpo -por ejemplo el aire- es diáfano, pero sólo cuando está en acto como tal hay luz. Luz y oscuridad son entonces dos estados del diáfano contrapuestos. El agente capaz de alterar el diáfano de tal manera que en éste se produzca el estado llamado luz "es el fuego ¹⁰, o algo que se asemeja al cuerpo situado en la región superior" ¹¹. Aristóteles niega todo componente cinético asociado a una comprensión de la luz como emanación corpórea al afirmar que "la alteración no debe confundirse en general con el movimiento de traslación, porque no es semejante" ¹².

En el sistema aristotélico, la luz está vinculada a los dos elementos más ligeros: el éter (constitutivo del diáfano en el que se da la luz) y el fuego (agente capaz de modificar el estado del diáfano). En cambio, el peso es una propiedad privativa de los cuerpos formados por los elementos pesados -principalmente el elemento tierra-. Puede observarse ya en Aristóteles una contraposición ontológica entre lo pesado y lo ligero ¹³ que ha llegado hasta nuestros días: mientras que la luz se concibe como algo ligero que tiende a ascender y que se asocia con un cierto movimiento, el peso se relaciona con la oscuridad reposada de lo telúrico ¹⁴.

II.2.2. EUCLIDES Y ARQUÍMEDES: GEOMETRÍA, LUZ Y GRAVEDAD

Aristóteles intentó explicar la naturaleza de la gravedad y de la luz escudriñando las causas de ambos fenómenos. Otros pensadores griegos, en cambio, vieron en la geometría una herramienta capaz de facilitar su comprensión. El estudio del comportamiento geométrico de la luz por parte de Euclides y de la gravedad

por parte de Arquímedes -ambos pertenecientes a la Escuela de Alejandría- inauguró una nueva manera de aproximarse al entendimiento de la naturaleza de los dos fenómenos que nos ocupan. Desde entonces toda tentativa sería de aproximación científica a la gravitación y a la luz ha buscado una sólida base geométrica, como así lo entendieron los grandes científicos del siglo XVII y del siglo XIX.

II.2.2.1. La luz geométrica de Euclides

En torno al año 300 a.C. a Euclides (325-265 a.C.) se le asigna la labor de refundar los tratados de geometría existentes en la gran biblioteca de Alejandría, que dio lugar a un tratado llamado *Elementos*, en el que se establecen las bases de la geometría plana vigentes hasta mediados del siglo XIX¹⁵. La geometría se convierte para Euclides en una herramienta de excepcional valía, y no duda en utilizarla al estudiar la luz.

Como la mayoría de los filósofos griegos, Euclides no se interesa por la propia naturaleza de la luz sino por su vinculación con el fenómeno de la visión. Aborda la cuestión en un tratado sobre *Óptica*¹⁶, cuyos primeros postulados suponen el nacimiento de la representación geométrica de la luz. En plena continuidad pitagórico-platónica considera la existencia de dos tipos de luces, una exterior y otra interior¹⁷. La primera es generada por los cuerpos ígneos, mientras que la segunda debe entenderse como “una potencia visiva corporalizada y asimilada a la luz emitida por focos luminosos”¹⁸. Euclides se aparta así de la concepción aristotélica de la luz como alteración del diáfano, a favor de una comprensión cinética y corpórea de la luz.

Euclides atribuye a ambos tipos de luz las mismas propiedades geométricas. Los rayos de luz, tanto si nacen del ojo como si se originan en cuerpos incandescentes, nacen en un punto y avanzan en línea recta¹⁹ de tal forma que configuran un haz cónico. En el caso de la luz exterior, lo que queda fuera de este cono luminoso

14. Ver apartado II-3.2.1 La luz, materia inmaterial: *La Chambre, físico francés del siglo XVII da continuidad a esta contraposición ontológica entre la luz y la gravedad que se desprende de la cosmología Aristotélica.*

15. *Sobre el nacimiento de la geometría no euclídea, base de la nueva teoría geométrica de la gravedad de Einstein, ver apartado II-4.2.1.1. La curvatura del espacio-tiempo por acción de la masa.*

16. Se atribuyen a Euclides, no sin algunas dudas, dos tratados sobre la luz. Mientras que la “Óptica” (el tratado sobre los fenómenos de la visión directa) sí se le atribuye a Euclides, la “Catóptrica” (el tratado sobre los fenómenos de la visión indirecta) podría haber sido escrita por Teón de Alejandría (ver FERRAZ FAYOS, Antonio: *Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 31*). En cualquier caso este detalle no es importante, pues lo que aquí nos interesa sobre la luz está expuesto en la “Óptica”.

17. La creencia clásica de que la visión se da por el contacto de la luz interior con la luz exterior se mantiene hasta bien entrado el siglo XVI. Tal como expone Arthur Zajonc (ZAJONC, Arthur: *Atrapando la luz. Historia de la luz y de la mente (3a Ed). Barcelona: Andrés Bello, 1996*) Goethe recoge esta tradición siglos más tarde en su *Teoría del Color de 1810*: “Si el ojo no perteneciera al sol, ¿cómo contemplaríamos la luz?” (Zajonc, p. 22). Más adelante, en pleno siglo XX, el arquitecto Louis Kahn o el poeta Richard Wilbur insisten en esta idea (Zajonc, pp. 268-269).

18. FERRAZ FAYOS, Antonio: *Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 32*

19. *Teón de Alejandría (335-405) demuestra por primera vez la rectitud de los rayos lumínicos; lo hace a través de sencillas observaciones en el prólogo de su edición del tratado de Euclides (gracias a la cual la Óptica ha llegado hasta nosotros). Ver FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 32*

20. Arquímedes, “Sobre los cuerpos flotantes”, *Libro I, Proposición 2. ARQUÍMEDES; ORTIZ GARCÍA, Paloma (ed): Tratados II. Madrid: Gredos, 2009, p. 192.*

21. Explica Paloma Ortiz que “la ausencia de definiciones ha servido de argumento para afirmar que el Libro I del *Equilibrio de las figuras planas* puede ser una forma abreviada de alguna otra de las obras no conservadas de Arquímedes sobre estas mismas cuestiones, pues él mismo menciona repetidamente títulos de trabajos no conservados –*Elementos de Mecánica y Equilibrio*”. ARQUÍMEDES; ORTIZ GARCÍA, Paloma (ed): *Tratados II. Madrid: Gredos, 2009, p. 76.*

22. Paloma Ortiz revela que Eutocio traduce el término al latín como “centro de peso o de gravedad” a principios del siglo VI d.C. Según la misma autora, la expresión utilizada por Arquímedes es “kéntron báreos” que traducido literalmente significa “centro de peso”. Ver ARQUÍMEDES; ORTIZ GARCÍA, Paloma (ed): *Tratados II. Madrid: Gredos, 2009, p. 76.* El vocablo “gravedad” proviene del latín *gravitas*, formado a partir del adjetivo *gravis* (‘pesado’, ‘importante’). Ambos términos proceden de *gru-* (‘pesado’), raíz de procedencia prehistórica indoeuropea.

23. El *Diccionario de la Real Academia Española* expone las distintas acepciones del adjetivo “grave” (*gravis* en latín): 1) “Dicho de una cosa: Que pesa”, 2) “Grande, de mucha entidad o importancia” y 3) “Circunspecto, serio, que causa respeto y veneración”. Así, algo grave puede ser algo pesado, o algo importante o algo circunspecto. Esta última acepción nos lleva hasta la Roma republicana, en la que se forjaron las virtudes romanas, propias de todo ciudadano de bien. De entre las virtudes personales destaca la *Gravitas* -la gravedad-, que se refiere al aplomo, la seriedad, el sentido del deber y la congruencia entre las palabras y los hechos. El hombre grave era aquel que tomaba en serio las cosas de la vida, que no vivía “a la ligera”. Valga como ejemplo el comentario de Marco Vitruvio: “[El arquitecto] procura mantener su reputación con gravedad y buena fama” (*sed eum gravitate suam tueatur dignitatem bonam famam habendo*); en VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): *Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p. 4*

queda a oscuras; en el caso de la luz interior, lo que queda fuera de este cono visual queda fuera del ámbito de la visión. Siglos más tarde, el autor árabe Alhazen (965-1039) construirá su teoría de la luz a partir de esta representación geométrica cónica que, a través de Witelo (1230-1275) y con las aportaciones de Scaligero (1484-1558), servirán de base para la teoría de la luz de Kepler.

II.2.2.2. La “gravedad” geométrica de Arquímedes

Arquímedes de Siracusa (287-212 a.C.), por su parte, utiliza también la geometría para aproximarse a la comprensión de los hechos físicos. En su tratado *Sobre los cuerpos flotantes*, Arquímedes afirma en la segunda proposición que “la superficie de todo líquido en estado de inmovilidad tendrá la figura de una esfera que tendrá el mismo centro que la tierra”²⁰. Si bien es cierto que con esta afirmación Arquímedes demuestra una primigenia intuición de la relación causal entre la forma esférica y la acción gravitatoria, también es cierto que su idea geocéntrica del universo le lleva a imaginar un cosmos con un solo *centro de gravedad*, el centro de la Tierra.

El concepto de *centro de gravedad* lo desarrolla Arquímedes en su tratado *Sobre el equilibrio de las figuras planas*. La ausencia de definiciones²¹ contrasta con la exhaustividad de los cálculos geométricos de los centros de gravedad del triángulo, el paralelogramo, el trapecio y el segmento parabólico. Más que el desarrollo geométrico desplegado por Arquímedes, interesa aquí señalar una cuestión relativa a la terminología empleada por el filósofo. De la obra original, los traductores latinos transcribieron el concepto que nos ocupa como *centro de gravedad*, pero Arquímedes -igual que Aristóteles- no utilizó nunca esa expresión: en realidad empleó la expresión literal *centro de peso*²². Y es que los filósofos griegos anteriores a la hegemonía de Roma, como Aristóteles y Arquímedes, nunca tuvieron conciencia del concepto de “gravedad” tal como y como fue concebida en época romana.

II.2.3. PLUTARCO: LA GRAVITAS²³ ROMANA

Arquímedes murió a manos de las tropas romanas que tomaron Siracusa durante la segunda guerra púnica en el 146 a.C. y, en cierto modo, con él murió la contraposición griega entre lo pesado y lo ligero. Herederos de la cultura griega, los filósofos romanos se despreocuparon durante siglos de las cuestiones relacionadas con la física, pero durante la última etapa de la república y la primera época imperial se produjo un auge de los temas físicos gracias a Cicerón (106-43 a.C.), Lucrecio (99-55 a.C.), Séneca (4 a.C. - 65 d.C.) y Plinio el Viejo (23-79 d.C.)²⁴.

En el marco de este renovado interés deben encuadrarse las reflexiones del filósofo greco-romano Mestrio Plutarco (50-120 d.C.), compendiadas en el siglo XIII bajo el nombre de "Moralia" (*Obras Morales y de Costumbres*). Aunque la mayoría de ellas no tratan sobre temas relacionados con la física, cabe destacar el texto titulado "De faciem in orbis lunae" (*Sobre el rostro de la luna*), escrito en torno al año 100 d.C., en el que Plutarco ahonda sobre la naturaleza física del satélite terrestre. Lo que podría haber sido una obra menor, se descubre una obra de primera magnitud²⁵ que, contraviniendo los fundamentos de la física aristotélica, sienta las bases del concepto de "gravedad" que se desarrollará más tarde en el siglo XVII.

La idea fundamental sobre la que Plutarco desmonta la cosmología aristotélica (y con ella el principio del movimiento de los cuerpos pesados) es que la Luna no es un cuerpo celeste perfecto e inmutable compuesto por fuego o éter, como afirma el estagirita, sino que es un cuerpo térreo, semejante a la Tierra. Según Plutarco las manchas observadas en la superficie del satélite demuestran que la Luna no es una esfera perfecta sino que contiene irregularidades superficiales a modo de valles y simas, semejantes a las del globo terráqueo. El comportamiento lumínico de la Luna apoya también la tesis del satélite térreo, pues Plutarco mantiene que la Luna no reflejaría la luz del Sol del modo difuso en que lo hace y no impediría el paso de la luz a través de ella cuando se dispone entre el Sol y la Tierra si estuviera constituida por fuego o éter²⁶.

Pero si tal como afirma el filósofo greco-romano la Luna es un cuerpo

24. "En la primera época imperial (...) asistimos a un auge de los temas físicos, a los que hasta ahora se había prestado poca atención por parte de los romanos debido a los cambios políticos". RAMOS MALDONADO, Sandra: Plinio El Viejo y Séneca ante la naturaleza. *Excerpta Philologica*, 10-12 (2000-2002), p. 391

25. Según Sambursky "El ensayo de Plutarco emplea argumentos notables por su progresiva intuición de la gravitación, y por suponer la transición de la óptica geométrica a la física." SAMBURSKY, Samuel: El mundo físico de los griegos. Madrid: Alianza, 1999, p. 235.

26. "No hay reflexión procedente de un cuerpo rarificado y fino. De modo similar, difícilmente puede suponerse que la luz vaya a ser reflejada por la luz, o el fuego por el fuego, porque el cuerpo reflectante ha de ser masivo y denso de modo que los rayos puedan golpearlo y ser así reflejados por él. El aire, por ejemplo, transmite los mismos rayos del Sol sin capturarlos o resistirse a ellos, mientras que los árboles, las piedras y tejidos, cuando se sitúan en la trayectoria de la luz, ocasionan su reflexión y dispersión en una gran medida. Vemos que también la Tierra es iluminada por el Sol, pues no deja pasar sus rayos hasta su fondo, como el agua, ni a través de toda su sustancia, como el aire, sino que así como un círculo cruza la Luna y corta una parte de ella, así también la superficie de la Tierra es cortada en dos de manera que una mitad está iluminada mientras la otra permanece oscura... Permítaseme hablar geoméricamente y en términos de proporción: si vemos que de tres cosas (Tierra, Luna y aire) que la luz del Sol golpea, la Luna es iluminada, no en el modo en que lo es el aire, sino en el mismo en que lo es la Tierra, necesariamente se sigue que esos dos objetos que son afectados por la misma cosa del mismo modo, deben ser de tipo similar" Plut., de lac. in orb. lun., 931C. Citado en SAMBURSKY, Samuel: El mundo físico de los griegos. Madrid: Alianza, 1999, pp. 244-245.

27. "La Luna tiene en su movimiento y el giro de su revolución su seguro contra la caída, del mismo modo que los objetos colocados en una onda ven impedida su caída por la rotación circular; porque todo prosigue el movimiento que le es natural si nada lo desvía de él. Así, la Luna no es arrastrada hacia abajo por su peso porque su tendencia natural se ve frustrada por su revolución. Al contrario, habría quizá más razón para sorprenderse si estuviera a un tiempo inmóvil y en reposo, como la Tierra" *Plut., de lac. in orb. lun., 923D. Citado en SAMBURSKY, Samuel: El mundo físico de los griegos. Madrid: Alianza, 1999, pp. 240-241.27.*

28. *Plut., de lac. in orb. lun., 927C. Citado en SAMBURSKY, Samuel: El mundo físico de los griegos. Madrid: Alianza, 1999, p. 242.*

29. "Si todos los graves convergen hacia uno y el mismo punto, al tiempo que cada uno presiona desde sus partes hacia su propio centro, no será entonces tanto que el centro del universo, sino que todo, por lo que la Tierra se apropiará de los pesos, que son partes de sí misma; y la tendencia de los cuerpos será testimonio, no de que la Tierra sea el centro del universo, sino de que las cosas hayan sido expulsadas de la Tierra y regresen a ella, o de que tengan una cierta comunidad y semejanza natural con la Tierra. Así el Sol atrae todas las partes de que está compuesto y asimismo la Tierra tirará hacia sí de la piedra y la hará parte de sí... Pero, si algún cuerpo no ha sido asignado desde el comienzo a la Tierra y no le ha sido tomado prestado a ésta, sino que de algún modo tiene una constitución y naturaleza propias, como ellos mantendrían es el caso de la Luna, ¿qué habría de impedir su existencia separada y su permanecer autocontenido, apelmazado y atado por sus propias partes? Pues no sólo no se ha probado que la Tierra sea un centro, sino que el modo en que presionan aquí las cosas y se dirigen juntas hacia la Tierra, sugiere el modo en que es probable que hayan caído las cosas sobre la Luna, estando donde están y permaneciendo ahí". *Plut., de lac. in orb. lun., 924E. Citado en SAMBURSKY, Samuel: El mundo físico de los griegos. Madrid: Alianza, 1999, pp. 236-237*

térreo, ¿por qué no cae sobre la Tierra? Plutarco se adelanta a los postulados keplerianos del siglo XVII cuando afirma que es el movimiento de revolución de la Luna lo que impide que ésta caiga hacia el centro de la Tierra²⁷, del mismo modo en que una piedra no cae al suelo mientras se hace girar en una onda. El hecho de que un cuerpo térreo no siga la tendencia natural descrita por Aristóteles de moverse hacia su lugar propio (en este caso, el centro de la Tierra), induce a Plutarco a dudar del acierto de las explicaciones aristotélicas del movimiento natural: *"Si todos los cuerpos estuvieran constreñidos por sus movimientos naturales, entonces el Sol no se movería en un círculo, ni lo haría Venus, ni ninguna de las demás estrellas, pues, por su naturaleza, los cuerpos ligeros e ígneos deberían moverse hacia arriba y no en círculo. Pero si la naturaleza permite tales diferencias en los cambios de lugar (que en la Tierra el fuego sea transportado hacia arriba, mientras que al alcanzar el firmamento rote en un círculo), no es sorprendente que los cuerpos pesados terrosos, al alcanzar el cielo, hubiesen de ser también compelidos a cambiar su forma de movimiento"*²⁸.

Plutarco, conocedor de la teoría heliocéntrica de Aristarco, se niega a pensar que el centro de la Tierra sea también el centro del universo. La conjugación de esta idea con la constatación de que, efectivamente, los cuerpos graves tienden a moverse hacia el centro de la Tierra, le estimula a imaginar un universo sin centro. Por contra, Plutarco imagina un cosmos con tantos *centros de gravedad* como cuerpos celestes²⁹. Esta idea comporta un nuevo modelo cosmológico que, además, se constituye en la primera tentativa teórica de ampliar el fenómeno de la gravedad, concebido como fenómeno exclusivamente terrestre, a todo el universo.

A pesar de su carácter revolucionario, las ideas de Plutarco no tuvieron la trascendencia que cabría esperar. El éxito de la teoría geocéntrica de Claudio Ptolomeo (100-170 d.C.) décadas más tarde desbancó durante siglos al resto de teorías sobre el cosmos. No obstante, las ideas de Plutarco se pueden considerar como el prelude de las críticas a la física aristotélica por parte de Galileo Galilei y Johannes Kepler a principios del siglo XVII, que darán lugar a nuevas y revolucionarias teorías sobre la gravedad y la luz.

II.3. LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA DEL SIGLO XVII

En el siglo III d.C. un conjunto de factores políticos, demográficos, económicos y religiosos sumergen a la ciencia helenística en un largo periodo de letargo durante el cual muchas obras se pierden para siempre. La obra de Aristóteles resurge en el siglo XIII, cuando la escolástica introduce en la fe cristiana las enseñanzas aristotélicas sobre filosofía natural que, respaldada por la Iglesia, se afianza entre los pensadores medievales y ve prolongada su validez durante el Renacimiento⁰⁰. Pero el avance que inicialmente supone la recuperación de un conocimiento casi olvidado durante mil años se convierte más tarde en obstáculo para el progreso de la ciencia: la teoría se convierte en doctrina y con ella se enquistaba el avance científico. Instaurada la indiscutible autoridad de “El filósofo”, los pensadores se enfrascan en infructuosas disquisiciones terminológicas y en fútiles refinamientos teóricos de los conceptos aristotélicos que poco aportan a la comprensión de la naturaleza de la gravedad y de la luz.

Este aparente letargo llega a su fin a principios del siglo XVII cuando, con el objetivo de defender el sistema heliocéntrico de Copérnico -postulado medio siglo antes-, Galileo Galilei y Johannes Kepler realizan duras y certeras críticas a la física aristotélica. Con sus trabajos, sientan las bases de la investigación científica del siglo XVII. No obstante, a pesar de ser contemporáneos y de compartir afinidades copernicanas, sus investigaciones sobre la naturaleza de la gravedad y de la luz discurren en paralelo y sin interacción mutua.

René Descartes intenta actualizar o enriquecer la cosmología aristotélica mediante las aportaciones de Galilei y Kepler con la finalidad de construir una cosmología propia capaz de dar una explicación conjunta de los fenómenos de la gravedad y de la luz. Huygens, en línea con los postulados cartesianos, acepta como válida su explicación sobre la gravedad y se construye su propia teoría ondulatoria de la luz a partir de los postulados de Grimaldi y el propio Descartes.

00. Las reflexiones de Leonardo Da Vinci -probablemente el pensador más destacado del Renacimiento- sobre la mecánica en general y el peso y la gravedad en particular se sustentan en los postulados aristotélicos de los movimientos naturales de los cuatro elementos que constituyen el mundo. Por otro lado, Leonardo Da Vinci no dedica ninguna reflexión a la luz como entidad física; sólo se ocupa de su valor artístico. Ver RICHTER, Irma A.; WELLS, Thereza; KEMP, Martin: Leonardo da Vinci Notebooks. Oxford: Oxford University Press, 2008, pp. 14-83

Por último, Newton construye sus nuevas teorías sobre la gravedad y la luz en base a una nueva noción física, la *fuerza a distancia*. A través de ésta intenta encontrar una explicación unificada de las causas de ambos fenómenos. Con su *Ley de Gravitación Universal* y su *Teoría corpuscular de la luz* Newton consigue al mismo tiempo desbancar a la física cartesiana y clausurar un siglo de revoluciones científicas.

II.3.1. GALILEO GALILEI: CRÍTICA A LA FÍSICA ARISTOTÉLICA

Galileo Galilei (1564-1642) inicia sus reflexiones sobre la gravedad y la luz entre finales del siglo XVI y principios del XVII. La importancia de su contribución a la comprensión de la naturaleza de ambos fenómenos no se debe a la concepción de nuevas teorías sobre la naturaleza de ambos fenómenos, sino a la definitiva puesta en crisis de los postulados aristotélicos: a partir de Galilei la gravedad deja de ser comprendida como una propiedad exclusiva de los cuerpos graves y la luz deja de ser vista como una cualidad del diáfano.

II.3.1.1. El principio del fin de la gravedad aristotélica

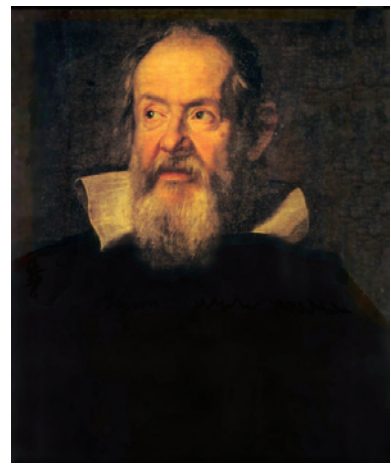
Galileo Galilei reflexiona sobre dos cuestiones prácticas relativas al movimiento de los cuerpos graves que, por aquel entonces, inquietaban a los físicos más críticos con la física aristotélica: la trayectoria de un proyectil y la formulación matemática de la caída de los cuerpos graves.

La trayectoria del movimiento de los proyectiles había sido objeto de estudio desde siglos atrás. Jean Buridan (1295-1358) y Nicole Oresmes (1320-1382) descompusieron el movimiento del proyectil en un movimiento horizontal debido a una *cualidad* imprimida al mismo en el momento de su lanzamiento (llamada *ímpetus*), y un movimiento vertical hacia abajo debido a la acción de la gravedad. Según esta idea, el proyectil describía una trayectoria recta en inclinación ascendente mientras su *ímpetus*, en disminución continua por la resistencia del aire, se iba agotando.

Cuando finalmente el *ímpetus* del proyectil se agotaba, el cuerpo describía un arco de circunferencia hacia abajo y se precipitaba perpendicularmente hacia el suelo por acción de la gravedad. Esta teoría imperó durante más de un siglo, hasta que Niccolo Fontana Tartaglia (1500-1557) postuló que la trayectoria del proyectil era siempre curva, comenzando éste a descender desde el instante mismo en que era lanzado; admite así Tartaglia la influencia de la gravedad a lo largo de todo el recorrido del proyectil y no sólo al final. Galilei encuentra esta explicación acertada pero ve necesario formular matemáticamente esas observaciones. Gracias a los conocimientos geométricos derivados de la lectura de los tratados de Arquímedes, donde las propiedades de la parábola son estudiadas de forma exhaustiva, Galileo descubre que todo proyectil describe en su avance una trayectoria parabólica⁰¹.

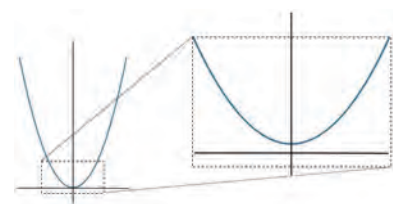
Durante siglos se aceptó el postulado aristotélico según el cual los cuerpos graves caían a velocidad constante y proporcional a su peso. Giambattista Benedetti (1530-1590), discípulo de Tartaglia y maestro de Galilei, puso punto y final a esta idea al afirmar que los cuerpos graves caían siguiendo un movimiento uniformemente acelerado. Además, señaló que los cuerpos de una misma naturaleza caerían siempre con la misma aceleración con independencia de su peso. Galilei dio un paso más al demostrar empíricamente que en el vacío esta aceleración era la misma para todos los cuerpos, con independencia de su naturaleza y peso. Finalmente formular matemáticamente esta aceleración de acuerdo a su ley de proporción cuadrática, en la que establece que el espacio recorrido por un cuerpo en caída libre es proporcional al tiempo al cuadrado.

Es a Galilei a quien hay que atribuir la comprensión geométrico-matemática de la curvatura inherente a la gravedad. Su confianza en la parábola como curva gravitatoria, demostrada en la trayectoria de los proyectiles, le lleva a afirmar que la curva descrita por una cadena sujeta por sus extremos y sometida a la acción de la gravedad es también una parábola. Apoyándose en la obra de Apolonio, investiga también las propiedades de la cicloide (curva generada por un punto



F.01. Galileo Galilei (1564-1642).
www.britannica.com

01. La parábola es la única sección cónica con excentricidad igual a 1, lo que significa que todas las parábolas son semejantes, es decir, tienen la misma forma pero lo que varía es la "escala" a la que las observamos. Esto es importante, pues en realidad de la trayectoria de un proyectil es siempre la misma.



F.02. Semejanza de la parábola

02. En 1640 Galilei escribe: "He estado queriendo describir esa línea curva durante más de cincuenta años, y la admiré por su curvatura, ideal para soportar los arcos de un puente".



F.03. Generación de la cicloide

03. En su "Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze attenenti alla Meccanica e il Movimenti Locali" (Discursos y demostraciones en torno a dos nuevas ciencias en torno a la mecánica y el movimiento local), de 1638, Galileo Galilei dice por voz de Salviati: "No me parece ahora momento oportuno para entrar en la investigación de la causa del aceleramiento del movimiento natural en torno a la cual los filósofos han mantenido varias opiniones, reduciéndola algunos a la aproximación al centro, otros al quedar sucesivamente menos partes del medio por dividir, otros a un cierto desalojamiento del medio ambiente, el cual, al volver a juntarse por detrás del móvil, lo va empujando y repeliendo continuamente. Sería conveniente, aunque poco provechoso, examinar y resolver tales fantasías junto con otras parecidas."

Aclara Carmen Azcarate que "este rechazo de Salviati ha sido interpretado por historiadores positivistas como uno de los méritos de Galileo: excluir la investigación de las causas del ámbito de la ciencia natural. Sin embargo, estudios galileanos modernos han puesto en duda que el rechazo de Galileo provenga de una firme convicción (...). Antes bien, es lícito pensar que su actitud en este pasaje se debe a la imposibilidad de proporcionar una teoría satisfactoria de la causa de la aceleración y a su comprensible reticencia en admitir esta carencia en la obra que contiene la exposición sistemática de su ciencia del movimiento". GALILEI, Galileo; AZCÁRATE, Carmen (ed): La nueva ciencia del movimiento. Selección de los Discorsi. Barcelona: Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 1988, p.56.

04. Galileo Galilei define la gravedad como "la propensión a moverse naturalmente hacia abajo, la cual, en los cuerpos sólidos, se encuentra causada por la mayor o menor abundancia de materia, de la que están constituidos". Citado en GALILEI, Galileo; AZCÁRATE, Carmen (ed): La nueva ciencia del movimiento. Selección de los Discorsi. Barcelona: Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 1988, p.198.

pertenece a una circunferencia generatriz al rodar sobre una línea recta directriz sin deslizarse), entre las que destaca su conveniencia para el trazado de los arcos de los puentes⁰².

No obstante, a pesar de realizar estas importantes contribuciones a la descripción del movimiento de los cuerpos graves, a la formulación matemática de la trayectoria parabólica de los proyectiles y a la curvatura inherente de la acción gravitatoria, la mayor aportación de Galilei hacia la comprensión de la naturaleza de la gravedad es la invalidación de la cosmología aristotélica. Sorprendentemente, Galilei se contentó con la descripción geométrica y matemática de la caída de los cuerpos sin preguntarse por la causa -gravitatoria- de la caída, ni por la naturaleza de la gravedad.

La aparición y desaparición de una estrella en 1604, imposible de explicar dentro del marco de la cosmología aristotélica -que postula la perfección e inmutabilidad de los cuerpos celestes-, despierta en Galilei un renovado interés por la Astronomía. Ya en 1595 se había interesado por el sistema heliocéntrico de Copérnico y en 1597, en sendas cartas a Mazzoni y Kepler, se declaraba copernicano convencido. En 1608 se construye un telescopio, gracias al cual realiza una gran cantidad de observaciones que cuestionan de raíz el sistema cosmológico geocéntrico de Aristóteles y Ptolomeo: las manchas de la superficie del Sol demuestran la falsedad de la idea aristotélica de la perfección de los cuerpos celestes; las irregularidades en la superficie de la Luna en forma de montañas y valles desechan la idea aristotélica de los cuerpos celestes están constituidos por éter y fuego y su capacidad de emitir luz; las fases observadas en Venus sólo pueden explicarse si este planeta gira en torno al Sol; el descubrimiento de cuatro satélites en el planeta Júpiter demuestra que no todos los astros giran en torno a la Tierra o el Sol, sino que hay cuerpos celestes girando alrededor de otros planetas; el movimiento de rotación del Sol, junto con el efecto de las mareas, sirve a Galilei para defender que la Tierra también se mueve.

Con estas observaciones, Galileo destruye la cosmología geocéntrica del sistema aristotélico-ptolemaico. Se ve obligado

entonces a introducir ciertas correcciones en la explicación aristotélica de la gravedad, aunque renuncia explícitamente a la investigación de su causa eficiente⁰³ construyendo su idea sobre su naturaleza a partir de, y en discordancia con, las ideas aristotélicas de su tiempo⁰⁴.

Aristóteles concebía la pesadez y la ligereza como cualidades absolutas y universales que respondían a la disposición concéntrica de los elementos con respecto al centro del universo que, en su cosmología, coincidía con el centro de la Tierra. Pero la distinción absoluta de ambas cualidades queda desfasada en el momento que se acepta el heliocentrismo copernicano⁰⁵, pues los cuerpos graves ya no tienden a moverse hacia el centro del universo, sino que tienden a moverse al centro de la Tierra: la gravedad deja de ser, pues, un fenómeno universal para pasar a ser un fenómeno terrestre, una idea hasta entonces nunca concebida.

Basándose en el concepto de *peso específico* introducido por Arquímedes en su tratado de hidrostática *Sobre los cuerpos flotantes*, Galilei utiliza la noción de *gravedad específica* ("*gravità in specie*": peso por unidad de volumen) para explicar la tendencia al movimiento de los cuerpos: así, según Galilei, cuando el cuerpo tiene una gravedad específica mayor que la del medio, tiende a moverse hacia abajo, mientras que cuando es menor, tiende a moverse hacia arriba. Sustituye con esto la vieja distinción aristotélica de *grave/ligero* por la de *más grave/menos grave que el medio*, hecho que supone un enorme avance conceptual en tanto que todo cuerpo, con independencia de su composición material, es considerado como *grave*.

Pierde sentido entonces la idea aristotélica de los lugares propios de los elementos y su movimiento natural, en la que los cuerpos *graves* se movían naturalmente *hacia abajo* mientras que los cuerpos *ligeros* lo hacían *hacia arriba*. La gravedad deja de ser una cualidad circunscrita sólo a ciertos cuerpos con composiciones materiales específicas para afectar, de un modo u otro, a todos los cuerpos materiales.

05. En el segundo axioma del *Commentariolus*, Copérnico (1473-1543) afirma que el centro de la Tierra no es el centro del universo, sino únicamente el de la gravedad y el de la esfera lunar. Esta afirmación será el germen de la idea, cultivada durante todo el siglo XVII hasta que Newton expone su *Ley de Gravitación Universal*, de que la gravedad es un fenómeno exclusivamente terrestre que nada tiene que ver con el movimiento de los cuerpos celestes. Ver NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 50.

06. Ver apartado II-2.1.2. La luz como cualidad del medio diáfano.

07. Carta de Galilei a Dini del 23 de marzo de 1615. Citado en GÓMEZ, Susana: Galileo y la naturaleza de la luz. En MONTESINOS, José (ed); SOLÍS, Carlos(ed): *Largo campo di filosofare*. Canarias: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 2001, p. 409]

08. Parece ser que cuando Galilei presentó sus descubrimientos astronómicos en Roma en 1611 también mostró un curioso objeto, conocido como piedra de Bolonia. Un aficionado boloñés a la alquimia, Vicente Casciarolo, descubrió en 1602 un mineral que, calcinado, adquiriría una asombrosa propiedad: brillar en la oscuridad si previamente era expuesto a la luz. Se trata de la *baritina*, que por reducción pasa a sulfuro de bario, compuesto luminiscente. Ver FERRAZ FAYOS, Antonio: *Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton*. Madrid: Dossat, 1974, pp. 100-106.

Explica Susana Gómez que con esta piedra Galilei "pretendía demostrar la falsedad de la concepción aristotélica de la luz entendida como cualidad del medio. Si un cuerpo opaco, denso y frío como la piedra podía emitir luz, ello se debía a que la luz era una substancia material y corpórea separable del medio, la cual quedaba aprisionada en el interior de la piedra para luego ir saliendo de ella en forma de corpúsculos luminosos". Ver GÓMEZ, Susana: Galileo y la naturaleza de la luz, en MONTESINOS, José (ed): *Largo campo di filosofare*. Canarias: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 2001, p. 408

II.3.1.2. La indefinición material de la luz

En la cosmología aristotélica se afirmaba que los cuerpos celestes eran esferas perfectas compuestas de éter que emitían luz, pero Galilei, a través de sus observaciones astronómicas, descubre que sólo el Sol tiene la capacidad de emitir luz y que las manchas que presenta en su superficie distan mucho de ser propias de un cuerpo perfecto. De acuerdo con estas cuestiones y recuperando la clásica teoría sustancialista de Heráclito y Anaxágoras ⁰⁶ Galilei describe la luz como *“una sustancia espirituosísima, muy tenue y velocísima, que difundándose por el universo, penetra por todas partes sin oposición, caliente, vivifica y fecunda a todas las criaturas vivientes”*⁰⁷, apartándose definitivamente de la definición aristotélica de la luz como cualidad del diáfano ⁰⁸.

No obstante, su inicial (1611-1615) concepción sustancialista de la luz deriva, con el tiempo, hacia una concepción de marcado carácter atomista, en auge por aquél entonces gracias a la contribución de ciertos autores del siglo XVI. Así, en las últimas páginas del *“Il Saggiatore” (El Ensayador, 1623)* Galilei afirma que la luz está compuesta por una especie de *“átomos realmente indivisibles”* que se constituyen como la *“ultima e altissima risoluzione della materia”*, su extrema rarefacción ⁰⁹. Llegados a este extremo, la luz pierde entonces la primera y principal cualidad que define la materia corpórea, su extensión.

La naturaleza de la luz parece quedar configurada por tanto a medio camino entre la representación sustancialista, pues es considerada como una materia *espirituosísima* (o lo que es lo mismo, *no corpórea*) y la atomista, pues se considera que la materia luminosa está formada por átomos sin extensión. No obstante, hacia el final de su vida Galilei expresa sus dudas sobre la verdadera naturaleza de la luz ¹⁰ y niega rotundamente haber considerado alguna vez la luz como material y corpórea. Galilei no queda pues al margen de la discusión sobre la materialidad y/o la corporeidad de la luz que, a partir de la puesta en cuestión de la teoría aristotélica de la luz a finales del siglo XVI, había cobrado renovado protagonismo.

09. GÓMEZ, Susana: Galileo y la naturaleza de la luz, en MONTESINOS, José (ed): Largo campo di filosofare. Canarias: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 2001, p. 411-41

10. En una carta dirigida a Fortunio Liceti en 1640 (dos años antes de morir) Galilei afirma, refiriéndose a la luz: “Me habría arriesgado a estar en la cárcel a pan y agua durante toda mi vida con tal de haber tenido la certeza de conseguir un conocimiento tan deseado por mí”. Citado en GÓMEZ, Susana: Galileo y la naturaleza de la luz. En MONTESINOS, José (ed); SOLÍS, Carlos(ed): Largo campo di filosofare. Canarias: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 2001, p. 418.

II.3.2. JOHANNES KEPLER: LA LUZ Y LA GRAVEDAD, COMO VIRTUDES

Johannes Kepler (1571-1630), contemporáneo de Galilei, basó sus revolucionarias ideas sobre el movimiento planetario en el exhaustivo estudio de la óptica y la física astronómicas. Por un lado, el estudio de la naturaleza de la luz era de vital importancia, pues su conocimiento y dominio resultaba indispensable para una correcta observación de los cuerpos celestes y, por otro, la investigación de las causas eficientes, formales y materiales del movimiento planetario, le llevaron a concebir una nueva idea de “*gravedad*”.



F.04. Johannes Kepler (1571-1630).
www.physorg.com

La luz y la gravedad habían sido siempre consideradas cuestiones de naturaleza tan distinta que nadie había intentado nunca explicarlas mediante una misma teoría científica. Pero Kepler las consideró, por primera vez en la historia, como realidades físicas de naturaleza semejante, e intentó explicarlas a partir de un mismo esquema teórico. Desde entonces, científicos de la talla de Newton y Einstein, han intentado de un modo u otro explicar la luz y la gravedad dentro de una misma teoría científica. Hay que reconocer a Kepler, pues, su inestimable contribución a la comprensión conjunta de la naturaleza de ambos fenómenos.

II.3.2.1. La luz, materia inmaterial

El estudio de la óptica aplicada a la astronomía es una cuestión de primer orden para Kepler, pues la precisión de toda observación astronómica depende de su conocimiento físico-geométrico. Así lo expresa en la dedicación a su mecenas, Rodolfo II, con que abre su tratado sobre la naturaleza de la luz y la visión, “*Ad Vitellionem Paralipomena*” (*Paralipómenos a Witelo, 1604*). Con este peculiar título Kepler se inserta a sí mismo en la línea originada por los ópticos griegos, continuada por el filósofo árabe Alhazen (965-1039) y difundida por el autor medieval Witelo (1230-1275).

Del extenso tratado de Kepler nos interesa el primer capítulo, *De la naturaleza de la luz*¹¹, en el que expone su teoría sobre la luz a través

11. Edición consultada: KEPLER, Johannes; MALET, Antoni (ed): *Paralipòmens a Vitel·lió: els orígens de l'òptica moderna*. Barcelona: Eumo, 2010.

12. Ver apartado II-2.1.2. La luz como cualidad del medio diáfano.

13. Kepler expone su teoría sobre la intensidad de la luz en la proposición IX del Capítulo I del "Ad Vitellionem Paralipomena" con no demasiada claridad: "La proporción entre dos superficies esféricas, de las cuales ocupa el centro una fuente de luz, la grande a la pequeña, es la misma que la de la fuerza o densidad de los rayos de luz en la pequeña a la grandes, es decir, [superficie y fuerza son en proporción] inversa". (Ver KEPLER, Johannes; MALET, Antoni (ed): *Paralipòmens a Vitel·lió: els orígens de l'òptica moderna*. Barcelona: Eumo, 2010, p. 23). Tal como expresa Malet, "el enunciado de la proposición es innecesariamente retorcido: el resultado enunciado es que las densidades de los rayos en las dos esferas (...) conservan la proporción inversa de sus superficies, es decir, la de los radios al cuadrado".

Lo cierto es, pues, que aunque comúnmente se acuerde que Kepler descubrió la mencionada ley del cuadrado inverso, no la formuló con la claridad necesaria. Esta tarea la abordó décadas más tarde Ismael Boulliau (1605-1694) pues, en la proposición XXVII de su tratado "De natura Lucis" (Sobre la naturaleza de la luz) de 1638, expresa que "las densidades de las superficies de la luz, están en razón inversa a la de los cuadrados de las distancias al cuerpo luminoso de dichas superficies" (citado en FERRAZ FAYOS, Antonio: *Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton*. Madrid: Dossat, 1974, p. 220).

14. Ver apartado II-3.5.1. La gravedad, una fuerza universal.

15. Ver apartado II-2.1.2. La luz como cualidad del medio diáfano.

16. "Los cuerpos mismos, contenidos por los límites de sus propias superficies, no pueden ellos mismos multiplicarse en orbes, y por eso están provistos de diferentes virtudes. Estas virtudes, que indudablemente anidan en los cuerpos, pero que son un poco más libres y que carecen de materia corpórea (si bien constituidas de una materia propia que recibe dimensiones geométricas), pueden emanar y aspirar a llenar el orbe". Johannes Kepler: "Ad Vitellionem Paralipomena", introducción del capítulo I, De la naturaleza de la luz. Ver KEPLER, Johannes; MALET, Antoni (ed): *Paralipòmens a Vitel·lió: els orígens de l'òptica moderna*. Barcelona: Eumo, 2010, p. 20

de argumentos teológicos, geométricos y físicos. La manifiesta ruptura de Kepler con la teoría aristotélica, entendida como cualidad del medio diáfano¹², le permite plantear y desarrollar algunas cuestiones interesantes y hasta el momento originales.

Durante milenios los fenómenos de la luz se habían explicado a partir de la noción de *rayo de luz*, pues se consideraba que desde el cuerpo luminoso los rayos avanzaban en línea recta como un haz sin intersticios, siendo el límite exterior de este haz una superficie esférica sin entidad física. Kepler, en cambio, invierte esta explicación. Considera que la naturaleza de la luz se explica a partir de la noción de *superficie de luz*, pues desde el cuerpo luminoso la luz se expande esféricamente: a los rayos no les corresponde entonces entidad física alguna, pues no son más que la expresión del movimiento rectilíneo de expansión de la luz desde el cuerpo luminoso. Esta original representación geométrica de la luz permite a Kepler explicar varios fenómenos de la luz de manera novedosa.

En las teorías basadas en la noción de *rayo* la debilitación en la intensidad de la luz se explica aduciendo a una cierta atenuación longitudinal del mismo rayo. Evidentemente, en tanto que para Kepler esta noción carece de entidad física, esta explicación no puede ser aceptable. Kepler relaciona la intensidad -o fuerza- lumínica con la superficie de la esfera de luz que, a su vez, depende del cuadrado de su radio o distancia desde dicha superficie lumínica y el centro de la esfera donde se localiza el cuerpo emisor. Así pues, esboza Kepler la que más tarde se conocería como *ley del cuadrado inverso*, según la cual la intensidad de la luz es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia¹³. Veremos más adelante que esta ley físico-geométrica, que sólo debía servir para establecer la intensidad de la luz en relación a su distancia del cuerpo luminoso, fue fundamental para la formulación de la Ley de Gravitación Universal de Newton¹⁴.

A principios del siglo XVII la discusión se centra en si la luz debe ser considerada *accidente*, *sustancia* o *cuerpo*¹⁵. La postura de Kepler se aparta de la corriente general del momento, pues no necesita adscribirse a alguna de las renovadas teorías sustancialistas o

atomistas en auge por entonces para descartar la aristotélica teoría de la luz como accidente. El astrónomo no concibe la luz como una materia propia de los cuerpos, sino como una *virtud* de los mismos que, aún careciendo de materia corpórea, sí está constituida por cierta materia sometida a las mismas leyes geométricas y físicas que los cuerpos ¹⁶. Aunque Kepler considere la luz como formada por cierta materia incorpórea al inicio del capítulo, más adelante también se postula a favor de la no materialidad de la misma. La ambigüedad¹⁷ de Kepler en cuanto a la materialidad de la luz es tan manifiesta como acorde con las dificultades que tal cuestión planteaba a los científicos de principios del siglo XVII ¹⁸.

En tanto que no corpórea, la interacción entre la luz y los cuerpos no puede deberse a razones físicas, sino geométricas: la luz, que es superficie, interactúa sólo con las superficies de los cuerpos. Así, la opacidad o diafanidad de un cuerpo no depende de su solidez, sino de su constitución interna: la diferencia entre los cuerpos diáfanos y los opacos radica entonces en que internamente los primeros son continuos, de modo que no existen superficies en su interior que puedan alterar o impedir el paso de la luz, mientras que la composición interna de los segundos es mucho menos cohesionada, de modo que existe una gran cantidad de superficies interiores que impiden el paso de la luz.

En tanto que *material*, la luz también puede interactuar directamente con la materia. El calor, que siempre acompaña a la luz ¹⁹, actúa sobre la materia debilitándola hasta la inflamación: es así como la materia se convierte en luz ²⁰.

Aunque en el sistema aristotélico la luz y el peso -o la ligereza y la gravedad- se entendían como realidades ontológicamente contrapuestas ²¹, nadie antes se había preguntado sobre la posibilidad de que la luz pudiera pesar o no, pues ésta quedaba indisolublemente vinculada al fuego y al éter, elementos absolutamente ligeros por naturaleza. Pero al abandonar la cosmología aristotélica Kepler debe plantearse tal posibilidad, y lo hace con la misma claridad con que le da respuesta: *“la luz no tiene materia, y por tanto tampoco tiene peso”* ²².

17. La posición de Kepler es un tanto ambigua, pues en ciertas ocasiones afirma que la luz es materia corpórea y en otras dice que la luz no tiene materia. Antonio Ferraz apunta que esta ambigüedad debe entenderse en realidad como que para Kepler la luz carece de materia corpórea, sin negar una cierta materialidad (ver FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 128). No obstante, esta aparente indefinición o ambigüedad de Kepler, según la cual la materialidad o no de la luz depende del fenómeno descrito, recuerda a la dualidad onda-corpúsculo que a principios del siglo XX Einstein atribuye a la luz: ver apartado II-4.1.2.1. La naturaleza cuántica de la luz.

18. Ver apartado II-3.1.2. La luz, materia inmaterial.

19. Parece haber intuido aquí Kepler lo que siglos más tarde se conocerá como radiación infrarroja, una radiación invisible y calórica de menor longitud de onda que la luz visible, e indisolublemente asociada a ésta.

20. Se plantea aquí otra analogía entre las teorías de Kepler y Einstein en relación a la reciprocidad de la luz y la materia, pues mientras el primero afirma, al final de la proposición 36 del primer capítulo de los Paralipómenos de Witelo, que la luz afecta a la materia de tal modo que ésta se convierte en luz, Einstein postula, a través de su famosa ecuación $E=mc^2$ una interrelación directa entre luz (energía) y materia, dos estados de una misma realidad, la masa-energía: ver apartado II-4.1.2.1. La naturaleza cuántica de la luz.

21. Ver apartado II-2.1. Aristóteles: gravedad telúrica y luz etérea.

22. Johannes Kepler: “Ad Vitellionem Paralipomena”, Capítulo I, De la naturaleza de la luz, Proposición V. Ver KEPLER, Johannes; MALET, Antoni (ed): Paralipòmens a Vitel·lió: els orígens de l'òptica moderna. Barcelona: Eumo, 2010, p. 22.

23. Ver apartado II-3.3.2. La luz como acción de la materia sutil.

24. Ver FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, pp. 225-243.

25. Los tres tratados más importantes de Kepler son: "Mysterium Cosmographicum" (El Secreto Cósmico, 1596), "Astronomia Nova" (La Nueva Astronomía, 1609) y "Harmonice Mundi" (La Harmonía del Mundo, 1619).

26. Ver apartado II-3.1.1. El principio del fin de la gravedad aristotélica.

27. Copérnico afirma que los cuerpos celestes se mueven describiendo círculos por el simple hecho de ser esféricos; y son esféricos porque la esfera es la perfección de cualquier forma corpórea. Así pues, para Copérnico esfera y gravedad son lo mismo. Así lo afirma en su *De revolutionibus*: "Yo por lo menos estimo que la gravedad no es sino cierta apetencia natural dada a las partes, por la providencia divina del Arquitecto, en el sentido de recobrarse en su unidad e integridad reuniéndose bajo la forma de un globo. (...) Esta tendencia [a la esfericidad] pertenece igualmente al Sol, a la Luna y a los otros astros errantes". Citado en NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 152

28. "La naturaleza se esfuerza en conseguir la unión de las partes, o su separación. (...) El movimiento que une cosas, como el movimiento de las cosas pesantes hacia el suelo, o del acero hacia el imán, debe producirse necesariamente en línea recta. (...) A la luz no le corresponde la unión, sino algo parecido a una separación, y una especie de proyección violentísima o emanación. Y, por tanto, el movimiento recto. O, si se quiere, se puede hablar de la unión de la luz del cuerpo luminoso con aquello que tiene que ser iluminado. Y la consecuencia es la misma". Johannes Kepler: "Ad Vitellionem Paralipomena", Capítulo I, De la naturaleza de la luz, Proposición IV. Ver KEPLER, Johannes; MALET, Antoni (ed): *Paralipòmens a Vitel·lió: els orígens de l'òptica moderna*. Barcelona: Eumo, 2010, p. 22.

29. "Resulta claro, por tanto, que la doctrina tradicional acerca de la gravedad es errónea... La gravedad es la mutua tendencia corporal entre cuerpos de la misma naturaleza hacia la unidad o el contacto (la fuerza magnética es también de esta clase), de tal modo que la Tierra atrae a una piedra mucho más de lo que la piedra atrae a la Tierra". J. Kepler. Citado en KOESTLER, Arthur: *Kepler*. Barcelona: Salvat, 1985, p. 97.

No son pocos los científicos que posteriormente utilizan, en sus reflexiones, esta idea de la ausencia de peso en la luz. Veremos más adelante a Descartes utilizar este argumento en su "Dioptrique" (*Dióptrica*, 1637)²³. Dos décadas más tarde, Marin Cureau de La Chambre (1594-1669) recoge también el testimonio de Kepler en su tratado "La Lumiere" (*La luz*, 1657)²⁴, introduciendo algún matiz interesante al relacionar la opacidad con la pesadez y la transparencia con la ligereza. Según este científico, las propiedades de los cuerpos dependen de la materia: así, son opacos y pesados los cuerpos con mucha materia concentrada, mientras que son ligeros y transparentes los cuerpos con apenas materia. Y la luz, que en sí misma ya es transparente, es lo opuesto a la materia. La Chambre utiliza estas consideraciones para apoyar la cosmología aristotélica, según la cual el lugar que los cuerpos ocupan en el universo depende de la pesadez de la materia que los compone y, por tanto, depende también de su transparencia: desde la tierra, en tanto que elemento más pesado y opaco, hasta los cielos etéreos, los más transparentes. Al relacionar la luz con el peso, Kepler relaciona, en definitiva, la luz con la gravedad. Veamos, pues, qué entiende el astrónomo por *gravedad*.

II.3.2.2. La gravedad terrestre y el movimiento celeste

En 1609 escribe Kepler su "Astronomía Nova" (*Nueva Astronomía basada en la causalidad o Física Celeste*), tratado en el que expone su original concepción del cosmos y del movimiento planetario²⁵. Ya en el prefacio el astrónomo ataca la cosmología aristotélica y se postula a favor del heliocentrismo copernicano utilizando argumentos muy próximos a los esgrimidos por Galileo Galilei durante aquellos mismos años²⁶.

Siguiendo la tradición arquimedeo-copernicana, Kepler vincula el efecto de la gravedad a la figura esférica, tanto en lo que se refiere a la forma de un cuerpo gravitatorio (como por ejemplo un planeta), como a la expansión espacial de la acción gravitatoria. De este manera la luz y la gravedad comparten, en la física kepleriana, una

esfericidad apriorística enraizada en la idea copernicana de la esfera como forma corpórea perfecta²⁷.

Una de las grandes diferencias que Kepler descubre entre la luz y la gravedad es que, mientras que considera a la primera como algo parecido a una separación, la segunda es más bien un movimiento de unión²⁸. Así, define la gravedad como una atracción entre cuerpos semejantes o de la misma clase²⁹ y, aunque no especifica el significado de tal expresión, afirma que todos los cuerpos que pertenecen a la Tierra, incluida la Tierra misma, se sienten recíprocamente atraídos³⁰. De hecho, corresponde a Kepler la idea de concebir la gravedad terrestre a partir de una incipiente noción de fuerza. Además, igual que Galilei, Kepler no cree en la existencia de cuerpos absolutamente ligeros y se postula a favor de una idea de pesadez o ligereza relativas³¹.

Que la fuerza de atracción gravitatoria sea proporcional a la masa explica el hecho que los cuerpos graves se dirijan al centro de la Tierra, pues la masa de éstos es muy inferior a la de aquélla. Kepler no necesita entonces recurrir al aristotélico geocentrismo estático para explicar la caída (o movimiento hacia el centro de la Tierra) de los cuerpos graves: *“La gravedad es una afección corporal mutua entre cuerpos emparentados tendente a su unión (...), de tal manera que es la Tierra quien atrae a la piedra más bien que al revés. Los graves (...) no se llevan hacia el centro del mundo en tanto que centro del mundo, sino hacia el centro del cuerpo redondo emparentado (...). De ahí que fuere donde fuere que esté o se transporte la Tierra, los graves se enderezarán siempre hacia ella. (...) La esfera de la fuerza atractiva que existe en la Luna se extiende hasta la Tierra (...) de lo cual se sigue que la fuerza atractiva de la Tierra se extiende (...) hasta la Luna y mucho más allá”*³².

Según su propia concepción de la gravedad, advierte Kepler que los planetas y los satélites deberían también atraerse mutuamente. En tal caso, la Luna y la Tierra se atraerían recíprocamente hasta acabar unidas, y así ocurriría también con el resto de cuerpos celestes. Según el astrónomo esto no ocurre porque existe una *“fuerza*

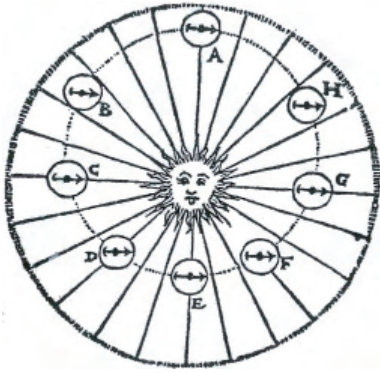
30. “Si dos piedras se hallan situadas en un lugar cualquiera del espacio, la una cerca de la otra, y fuera del alcance de la fuerza de un tercer cuerpo de la misma naturaleza, entonces se unirán entre sí (...) en un punto intermedio, cada una aproximándose a la otra en proporción a la masa de esta última”. *J. Kepler. Citado en KOESTLER, Arthur: Kepler. Barcelona: Salvat, 1985, p. 97.*

31. “Nada que esté hecho de una sustancia terrestre es absolutamente ligero; pero la materia que es menos densa, ya sea por su naturaleza o por el calor, es relativamente más ligera. (...) De la definición de ligereza se deduce su movimiento; porque no se debe creer que una sustancia ligera, cuando se alza, escapa a la periferia del mundo, o que no es atraída por la Tierra. Es simplemente menos atraída que la materia más pesada, y resulta desplazada por la naturaleza más pesada, hasta que termina deteniéndose y es mantenida en su lugar por la Tierra”. *J. Kepler. Citado en KOESTLER, Arthur: Kepler. Barcelona: Salvat, 1985, p. 98.*

32. *Citado en NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 63*

33. “Si la Tierra y la Luna no fueran mantenidas en sus respectivas órbitas por una fuerza espiritual o de alguna otra naturaleza equivalente, la Tierra ascendería hacia la Luna 1/54 parte de la distancia y la Luna descendería las restantes 53 partes del intervalo, y así se unirían”: *J. Kepler. Citado en KOESTLER, Arthur: Kepler. Barcelona: Salvat, 1985, p. 98.*

34. “Aunque la luz del Sol no puede ser en sí misma la fuerza motora (...) puede tal vez representar un tipo de vehículo, o instrumento, que la fuerza motora utilice. Pero las siguientes consideraciones parecen contradecirlo. En primer lugar, la luz queda interrumpida en lugares que permanecen en las sombras. Si la fuerza motora utilizara la luz como vehículo, entonces la oscuridad haría que los planetas se detuvieran”: *J. Kepler. Citado en KOESTLER, Arthur: Kepler. Barcelona: Salvat, 1985, p. 100.*



F.05. Magnetismo planetario según Johannes Kepler. KEPLER, Johannes; MALET, Antoni (ed): *Paralipòmens a Vitel·lió: els orígens de l'òptica moderna*. Barcelona: Eumo, 2010, p. XLIV

35. "Esta emanación es sin embargo tan insustancial como la luz, y no va acompañada por una pérdida de sustancia (...). En consecuencia, tenemos que concluir que, del mismo modo que la luz que lo ilumina todo en la Tierra es una variedad no sustancial del fuego del cuerpo solar, igualmente esta fuerza que aferra y arrastra los cuerpos planetarios es una variedad no sustancial de la fuerza que reside en el propio Sol; y que, al poseer una fuerza inconmensurable, proporciona el primer impulso a todos los movimientos en el mundo": J. Kepler. Citado en KOESTLER, Arthur: Kepler. Barcelona: Salvat, 1985, p. 100.

36. William Gilbert (1540-1603) publica en el año 1600 un tratado sobre el magnetismo, "De magnete magneticisque corporibus". Gilbert postula que los imanes emiten su especie esféricamente y que ésta es proporcional a la cantidad de materia imán. La gravedad terrestre es un fenómeno de atracción magnética que se debe al hecho de que a partir de cierta profundidad la Tierra está compuesta pura y simplemente por piedra imán. Esta atracción magnética explicaría tanto la caída de los cuerpos terrestres -por ser atraídos al gran imán que es la Tierra, como el movimiento de los cuerpos celestes, por atraerse los astros entre sí magnéticamente. Kepler absorbe algunas ideas de Gilbert y afirma que, si bien la especie solar no es atractiva, podría estar relacionada con otra propiedad de la especie magnética, que es la de orientar en una dirección determinada los cuerpos sobre los que actúa. Ver KEPLER, Johannes; MALET, Antoni (ed): *Paralipòmens a Vitel·lió: els orígens de l'òptica moderna*. Barcelona: Eumo, 2010, p. XLIII y NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid: Editora Nacional, 1982, p.80

espiritual o de alguna otra naturaleza equivalente"³³, que se encarga de mantener a los planetas en sus respectivas órbitas. Esta fuerza, emanada por el Sol, es también la responsable del movimiento planetario. Tal como explica Kepler, el Sol gira sobre sí mismo y con él gira su fuerza motora, arrastrando los planetas consigo: así se produce el movimiento de los planetas.

Kepler descarta la posibilidad de que esta fuerza solar sea de naturaleza gravitatoria, pues la gravedad sólo se da entre cuerpos semejantes y la naturaleza sustancial del Sol difiere mucho de la del resto de cuerpos celestes: el primero está formado por una sustancia ígnea, mientras que los segundos son de composición térrea. La gravedad kepleriana, a diferencia de la newtoniana, no tiene pues nada que ver con el movimiento planetario.

Kepler se plantea la posibilidad de que la luz solar sea la portadora de esta *fuerza espiritual* no gravitatoria del Sol y, aunque acaba descartando tal idea³⁴, descubre que esta fuerza motriz comparte muchas propiedades con la luz³⁵, pues ambas son una virtud no material del Sol, una especie de fuerza incorpórea capaz de llenar todo el espacio orbicularmente de manera instantánea e infinita. Además, a pesar de reconocer que esta fuerza solar no es atractiva, le atribuye ciertas propiedades magnéticas³⁶.

Existe, sin embargo, una gran diferencia geométrica entre la luz y esta fuerza motriz solar. Recordemos que Kepler considera la luz como una superficie esférica en expansión en la que los rayos no son más que constructos conceptuales sin entidad física real con los que expresar el movimiento de la luz: así, en tanto que superficie esférica, la fuerza o densidad de la luz no disminuye longitudinalmente sino superficialmente, según la ley del cuadrado inverso³⁷. En cambio, para Kepler esta fuerza motora debe concebirse como una fuerza longitudinal que une al Sol con los planetas y, por ello, su fuerza o densidad disminuye según la inversa de la distancia³⁸. Si Kepler hubiera concebido geoméricamente esta fuerza motriz como superficie y no como rayo, habría podido asignarle una disminución de su densidad según la ley del cuadrado inverso y, con ello, se

hubiera acercado mucho a la formulación newtoniana de la gravedad, aunque conceptualmente hubieran sido muy diferentes.

Como hemos visto, Galileo Galilei y Johannes Kepler utilizaron argumentos similares para derrocar la cosmología aristotélica y para explicar la gravedad terrestre. Sin embargo, fue Kepler quien intentó explicar el funcionamiento del cosmos atendiendo a esta nueva idea de *gravedad*. Más allá de lo acertadas o no que fueran sus ideas, debe reconocerse a Kepler la enorme influencia que ejerció sobre las posteriores teorías sobre la naturaleza gravedad y el funcionamiento del universo propuestas por Descartes y Newton.

II.3.3. RENÉ DESCARTES: VÓRTICES, GRAVEDAD Y LUZ

René Descartes (1596-1650) expone su física en su “*Traité de la lumiere*” (*Tratado de la luz*), la primera parte de “*Le monde*” (*El mundo*)³⁹. Para el filósofo francés la física de Aristóteles ya no es una doctrina a rebatir, como lo fue para Galileo, sino una teoría ya inservible que hay que sustituir o renovar⁴⁰. Las innovaciones cartesianas no suponen, pues, una ruptura total con la tradición aristotélica, sino más bien una actualización o enriquecimiento de la misma, dentro de un nuevo sistema mecanicista y matematizante deudor de las aportaciones de Galilei y Kepler.

Igual que Aristóteles, Descartes pretende explicar toda su física a través de una única y total representación cosmológica basada en la existencia de ciertos elementos que, sometidos a un reducido número de leyes sobre el movimiento, interactúan entre ellos y dan lugar a lo que conocemos por luz y gravedad. Ambos fenómenos son pues realidades físicas explicadas mediante una misma teoría⁴¹.

Esta cosmología cartesiana, de carácter más físico que geométrico, está basada en la idea de que el giro de los cuerpos celestes, ya sean éstos estrellas o planetas, produce a su alrededor unos vórtices o torbellinos que arrastran consigo la materia circundante. Las estrellas, constituidas por *fuego*, el elemento más líquido y sutil,



F.06. René Descartes (1596-1650).
www.medlibrary.org

37. Ver apartado II-3.2.1 La luz, materia inmaterial.

38. Tal como expone Koestler, parece ser que el propio Kepler advirtió las dificultades de considerar a esta fuerza motriz como rayo (disminuyendo pues según la inversa de la distancia) y no como superficie (en cuyo caso disminuiría según la inversa del cuadrado de la distancia): “[Kepler] sabía que su «ley» de la relación inversa (entre la velocidad de un planeta y la distancia solar) era incorrecta. Al final del capítulo 32 lo admite de forma breve y como de pasada. Pero -argumenta- la desviación es tan insignificante que casi puede prescindirse de ella. Esto es cierto para la Tierra, cuya excentricidad es pequeña, pero no es cierto en absoluto para Marte, que tiene una gran excentricidad”. KOESTLER, Arthur: Kepler. Barcelona: Salvat, 1985, p. 96.

39. Vista la condena de la Iglesia a Galileo Galilei por su defensa del heliocentrismo, Descartes retira en 1633 su tratado de la imprenta antes de que saliera publicado, pues en él negaba que la Tierra fuese el centro del universo. Este tratado no se publicaría hasta 1664, catorce años después de su muerte. No obstante, en 1637 publica su “*Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences. Plus la Dioptrique, les Météores et la Géométrie que sont des essais de cette méthode*”, en el que incluye las cuestiones menos comprometidas de su física.

40. UDÍAS VALLINA, Agustín: Historia de la física: De Arquímedes a Einstein. Madrid: Síntesis, 2004, p. 130.

generan a su alrededor vórtices de esta materia sutil que arrastra a los planetas haciéndoles girar en torno a su estrella. A su vez cada planeta gira sobre sí mismo, generando a su alrededor un torbellino secundario llamado cielo: en este cielo giran las partículas de *aire*, elemento más líquido que la *tierra* (elemento del cual se componen los planetas) aunque no tan sutil como el fuego.

II.3.3.1. La gravedad terrestre como repulsión desigual de la materia

El planteamiento cosmológico de la gravedad cartesiana muestra ciertas afinidades con los postulados keplerianos sobre la gravedad y el movimiento planetario ⁴². Igual que el astrónomo, Descartes considera que la gravedad es un fenómeno exclusivo de los planetas, como la Tierra. Como veremos, Descartes construye su teoría sobre la idea kepleriana de que el movimiento de los mismos alrededor de las estrellas, en cambio, no se debe a razones relacionadas con la gravedad. No obstante, a pesar de no explicar el movimiento planetario a través de la gravedad -como hará más adelante Newton-, debe reconocerse a Descartes el plantear por vez primera una única explicación unificada del movimiento de los cuerpos celestes y del de los cuerpos terrestres.

De acuerdo con Galilei y Kepler, y en contra de Aristóteles, Descartes niega que la gravedad terrestre pueda ser concebida como una propiedad privativa de ciertos cuerpos denominados *graves*. No obstante, a diferencia de los dos eminentes científicos de principios del siglo XVII, el filósofo francés se niega a concebir la gravedad como una de fuerza de atracción o como una cualidad real de la materia ⁴³. Por contra, igual que Aristóteles, intenta explicar el fenómeno gravitatorio a partir, exclusivamente, de las consecuencias de su particular cosmología de los torbellinos.

Según la cosmología cartesiana, el movimiento de rotación de la Tierra impele a la materia que contiene y al cielo que la rodea a alejarse de su centro. No obstante, la naturaleza líquida de

41. En el capítulo XI del Tratado de la luz Descartes reflexiona sobre la gravedad y, en el capítulo XII, se ocupa del movimiento de las mareas debido a la acción "gravitatoria" de la luna. En los dos capítulos siguientes, XIII y XIV, trata de la luz y de sus propiedades.

42. Koestler dice que "es probable que Descartes derivara de Kepler su teoría de los *tourbillons*, pero no está probado": KOESTLER, Arthur: Kepler. Barcelona: Salvat, 1985, p. 173

43. Explica Turró que "Descartes niega la existencia de la gravedad como cualidad real y explica el fenómeno como consecuencia de la fuerza centrífuga de las partes de materia del cielo, aire o tierra al girar en torno a su centro y la presión ejercida en sentido contrario por el resto de partes que llenan los cielos colindantes. Quizá porque en su juventud, en unos primeros estudios físicos que datan de 1618, había utilizado el concepto de *vis attractiva* impregnado totalmente por sus intereses herméticos y en clara afinidad a las cualidades ocultas aristotélicas o fuerzas de simpatía renacentistas, el Descartes de madurez se opuso siempre taxativamente a la introducción de este concepto a modo de característica realmente existente en la materia, rechazándolo justamente en función de aquel origen antropomórfico: «No creo en absoluto que los cuerpos pesados descendan por alguna cualidad real llamada gravedad tal como la imaginan los filósofos, ni tampoco atracción de la Tierra...» (Lettre à ?, otoño 1635; AT, 1, p. 324): DESCARTES, René; TURRÓ, Salvo (ed): El Mundo. Tratado de la luz. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989, pp.172-173

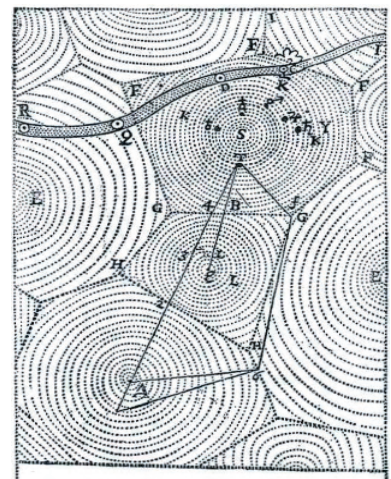
los cuerpos aiosos les permite alejarse más del centro que los cuerpos terrestres. Y, como en el universo cartesiano no hay lugar para el vacío, el espacio desocupado por las partículas de aire debe ser ocupado inmediatamente por las partículas de tierra⁴⁴. Así, para Descartes la gravedad de la Tierra es “la fuerza que une sus partes y hace que tiendan hacia su centro -cada una más o menos según sea mayor o menor y más o menos sólida-, fuerza que no es otra ni consiste en otra cosa más que en lo siguiente: las partes del pequeño cielo alrededor de la Tierra, girando mucho más deprisa que las de ésta en torno a su centro, tienden también con más fuerza a alejarse de él y, por consiguiente, las repelen [a las partes de la Tierra] hacia el centro”⁴⁵.

Galilei y Kepler explican el movimiento de los cuerpos hacia arriba o hacia abajo según si su *gravedad específica* es mayor o menor que la del medio circundante. En cierto modo Descartes recoge esta idea, aunque la invierte, pues la gravedad terrestre cartesiana no se explica a partir de la atracción de la materia hacia el centro de la Tierra, sino más bien al contrario, a través de la repulsión originada por el movimiento de rotación del planeta. Así, esta repulsión afecta por igual a todos los cuerpos terrestres aunque no con la misma intensidad, que depende de su constitución material, siendo mayor en el caso del aire que en el caso de la tierra. Esta idea, en combinación con la negación del vacío y su teoría de los movimientos circulares⁴⁶, es lo que explica según Descartes por qué ciertos cuerpos, esencialmente térreos, se desplazan hacia el centro de la Tierra.

II.3.3.2. La luz como acción de la materia sutil

*“Yo os diré que ahora estoy a punto de desenredar el Caos para hacer brotar la Luz, que es una de las más altas y más difíciles materias que jamás pueda acometer; pues toda la Física está allí casi contenida”*⁴⁷

René Descartes



F.07. Vórtices y cielos. DESCARTES, René; TURRÓ, Salvio (ed): *El Mundo. Tratado de la luz*. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989, p. 142

44. “Las partes de la Tierra tampoco pueden alejarse más que aquéllas [las del cielo] de su centro -si no es que descienden a su lugar otras del cielo o terrestres en la cantidad que se precise para llenarlo- ni, recíprocamente, pueden aproximarse [las del cielo] sin que suban otras tantas a su lugar”: *“El mundo. Tratado de la luz”, capítulo XI: “De la Pesanteur”*. DESCARTES, René; TURRÓ, Salvio (ed): *El Mundo. Tratado de la luz*. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989, pp.177-179.

45. “El mundo. Tratado de la luz”, capítulo XI: De la Pesanteur. DESCARTES, René; TURRÓ, Salvio (ed): *El Mundo. Tratado de la luz*. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989, p.173.

46. “Todos los movimientos que tienen lugar en el mundo son circulares en alguna medida, esto es, cuando un cuerpo deja su lugar, entra siempre en el de otro, y éste en el de otro, y así sucesivamente hasta que el último ocupa en el mismo instante el lugar dejado por el primero” *“Le monde”, capítulo IV*. DESCARTES, René; TURRÓ, Salvio (ed): *El Mundo. Tratado de la luz*. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989, p.75.

47. Carta a P. Mersenne del 23 de diciembre de 1630. Citado en FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 166

48. "La luz no es otra cosa en los cuerpos, que son llamados luminosos, que un cierto movimiento o una acción muy rápida y muy viva que se dirige hacia nuestros ojos a través del aire y de los otros cuerpos transparentes", DESCARTES, René; QUINTÁS, Guillermo (ed): Discurso del método. La dióptrica. Los meteoros. La geometría. Barcelona: Círculo de lectores, 1996, p.145.

"Cuanto sobrepasa en este primer elemento lo requerido para llenar los diminutos intervalos que las partes redondas del segundo dejan necesariamente a su alrededor, debe dirigirse hacia los centros [se refiere a los planetas] en torno a los que [las partes del segundo] giran, puesto que éstas ocupan los lugares más alejados. Asimismo, en este centro [las estrellas], [el primer elemento] debe componer cuerpos redondos, perfectamente líquidos y sutiles [como el Sol] que, girando sin cesar mucho más rápidamente y en el mismo sentido que las partes de rededor del segundo elemento, tengan fuerza para aumentar la agitación de las [partes del segundo elemento] más cercanas e incluso para impelerlas en todas direcciones arrojándolas del centro hacia la circunferencia tal como esas partes se impelen unas a otras: lo cual ocurre por una acción que deberé explicar lo más exactamente que pueda. No obstante, ya os advierto por adelantado que esta acción es la que tomamos por la luz". El mundo. Tratado de la luz, capítulo VIII. DESCARTES, René; TURRÓ, Salvio (ed): El Mundo. Tratado de la luz. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989, pp.139-141.

49. La concepción cartesiana de la luz como la acción de la materia sutil *no dista demasiado, pues, de la concepción aristotélica de la luz como acto del diáfano.*

50. "Pensando que no es tanto el movimiento como la acción de los cuerpos luminosos lo que es preciso tomar como su luz, debéis juzgar que los rayos de esta luz no son otra cosa que las líneas siguiendo las cuales tiende tal acción", DESCARTES, René; QUINTÁS, Guillermo (ed): Discurso del método. La dióptrica. Los meteoros. La geometría. Barcelona: Círculo de lectores, 1996, p. 148.

En efecto, la física de Descartes es una física de la luz. Es la meditación sobre su naturaleza la que fija las líneas maestras de su concepción del cosmos, expuesta en su *Tratado de la luz*.

En la cosmología cartesiana el Sol, en tanto que estrella, está compuesto por *fuego*. Las partículas ígneas, de minúsculo tamaño y en permanente y rapidísima agitación, conforman la luz del cuerpo luminoso (*lux*). Debido al movimiento de rotación del Sol, éstas tienden a alejarse del centro hacia afuera, donde se encuentran con las partículas del segundo elemento, el *aire*. El choque de las partículas del primer elemento con las del segundo produce en éstas últimas un movimiento de agitación que es lo que entendemos por luz (*lumen*)⁴⁸: la luz es la acción de la materia sutil⁴⁹.

Descartes imagina las partículas de este segundo elemento como pequeñas bolas esféricas que, chocando las unas con las otras, transmiten instantáneamente la sensación luminosa. A nivel microscópico la disposición irregular de estas pequeñas partículas no garantiza la transmisión de la acción de manera absolutamente recta. No obstante, admite el filósofo que a efectos generales puede representarse la expansión lumínica desde los cuerpos luminosos simplificada, mediante líneas normalmente rectas que representan los *rayos de luz*⁵⁰. De acuerdo con los postulados keplerianos, aunque esta noción de *rayo* carece de contenido físico, se presenta como un constructo geométrico-conceptual de gran utilidad para determinar la dirección y el movimiento de la luz⁵¹.

Aunque de acuerdo con Aristóteles Descartes opina que la luz es acción de la materia sutil y no cuerpo, considera el filósofo francés, de acuerdo con Kepler, que los fenómenos de la reflexión y la refracción de la luz siguen las mismas leyes del movimiento local de los cuerpos⁵². No obstante, de acuerdo con el astrónomo alemán aclara que el movimiento asociado a la luz no está sometido a su peso⁵³.

II.3.4. CHRISTIAAN HUYGENS: UNA NUEVA LUZ SIN GRAVEDAD

Aunque ya desde joven Christiaan Huygens (1629-1695) se forma en un ambiente claramente pro-cartesiano, durante su etapa de madurez adopta una postura más crítica con las teorías de Descartes. Siguiendo la estela del filósofo francés, Huygens centra sus intereses en el estudio de la luz, relegando a la gravedad a un segundo plano. En 1690 publica su "Traité de la Lumière" (*Tratado de la Luz*), en el que expone su nueva teoría ondulatoria de la luz. Complementa el tratado con un apéndice dedicado a la gravedad. Así como sus investigaciones sobre la naturaleza de la luz abrieron una nueva vía de investigación que posibilitó grandes avances científicos durante el siglo XIX, su defensa de la gravedad cartesiana no sirvió más que para alargar la agonía de una teoría superada por la gravitación universal de Newton.

II.3.4.1. La luz como onda etérea

La nueva teoría de la luz propuesta por Huygens se apoya tanto en el "Traité de la lumiere" (*Tratado de la luz*) de Descartes como en el "Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride" (*Físico-matemática de la luz, los colores y el arco iris*) de Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), ambos publicados póstumamente en 1664 y 1665 respectivamente. De Descartes adopta la idea fundamental de la luz como movimiento de cierta materia⁵⁴, como acción de la materia sutil. De Grimaldi, en cambio, toma prestada su incipiente noción ondulatoria de la luz.

No obstante, entre ambas teorías existe una diferencia fundamental que evidentemente no escapa a Huygens: la instantaneidad o la temporalidad en la propagación de la luz. Como hemos visto en el punto anterior, para Descartes la luz no es una sustancia corpórea en movimiento, sino el movimiento mismo, vibratorio, de cierta materia sutil que, en ningún caso, supone el desplazamiento de materia alguna desde el cuerpo luminoso hasta el ojo. Considera, por tanto, que este movimiento se produce de forma instantánea.



F.08. Christiaan Huygens (1629-1695).
www.britannica.com

50 (cont.). "[La luz] se extiende circularmente en todas direcciones alrededor de los cuerpos luminosos, a cualquier distancia y en un instante, y normalmente mediante líneas rectas que deben ser tomadas por rayos de luz". El mundo. *Tratado de la luz, capítulo XIV: De las propiedades de la luz (DESCARTES, René; TURRÓ, Salvio (ed): El Mundo. Tratado de la luz. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989, p.215).*

En el capítulo XV del mismo tratado Descartes describe dos situaciones en las que los rayos de luz se curvan por acción de los torbellinos: "Acerca de su disposición [la de las estrellas], es necesario que consideréis que casi nunca pueden aparecer en el verdadero lugar donde se hallan (...) por la siguiente razón: al ser los cielos desiguales en tamaño, las superficies que los separan casi nunca se hallan dispuestas de modo que los rayos los atraviesen - para ir de estas estrellas a la Tierra- en ángulos rectos. Al atravesarlos oblicuamente, es claro que (...) deben curvarse y sufrir una gran refracción". Más adelante, comenta que los rayos de luz de un cometa "deben estar ligeramente curvados hacia el Sol". DESCARTES, René; TURRÓ, Salvio (ed): El Mundo. *Tratado de la luz. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989, p. 229 y 243).* Estos apuntes son importantes en tanto que sientan el precedente de científicos posteriores, de la talla de Newton o Einstein, que también atribuirán una cierta curvatura a los rayos de luz, pero debida ya a la acción gravitatoria: ver apartado II-3.6. La interacción luz-gravedad después de Newton y apartado II-4.2.2. La gravitación de la luz en la relatividad general.

51. Según Turró (Ver DESCARTES, René; TURRÓ, Salvo (ed): El Mundo. Tratado de la luz. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989, pp.219) Descartes introduce una dualidad en la naturaleza de la luz pues 1) para el estudio microscópico de la naturaleza de la luz la considerada como partícula mientras 2) que para el estudio "macroscópico" instrumental, considera más adecuada la representación mediante el "rayo de luz". Esto es interesante porque se introduce una dualidad en la naturaleza de la luz según el fenómeno estudiado, como hace más tarde Einstein: ver apartado II-4.1.2.1. La naturaleza cuántica de la luz.

52. "Es fácil creer que la acción o inclinación a moverse, como tal he dicho que debe ser tomada la luz, debe seguir las mismas leyes que el movimiento [de los cuerpos]", DESCARTES, René; QUINTÁS, Guillermo (ed): Discurso del método. La dióptrica. Los meteoros. La geometría. Barcelona: Círculo de lectores, 1996, p. 149.

53. Descartes analiza el fenómeno de la refracción "sin considerar efecto alguno debido a su peso, tamaño o figura. Procedo de tal modo, porque sería innecesario plantearse tales problemas ya que ninguno de estos factores interviene en la acción de la luz a la cual dedicamos nuestras consideraciones". DESCARTES, René; QUINTÁS, Guillermo (ed): Discurso del método. La dióptrica. Los meteoros. La geometría. Barcelona: Círculo de lectores, 1996, pp. 153-154.

54. "Es inconcebible dudar de que la luz consiste en el movimiento de algún tipo de materia (...) que existe entre nosotros y el cuerpo luminoso". HUYGENS, Christiaan; THOMPSON, Silvanus P. (ed): Treatise On Light. London: Macmillan And Company, 1912, p. 3.

55. Citado en FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 251.

56. "Que la luz sea algo corpóreo, y sensible, es patente al sentido, y nadie puede sustraerse a la luz de esta verdad, si no es ciego de nacimiento". Citado en FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 258.

Grimaldi, en cambio, trabaja sobre la hipótesis de que sí se produce un desplazamiento de la sustancia del cuerpo luminoso al diáfano y, dado que los cuerpos no tienen la capacidad de desplazarse instantáneamente, afirma que "el luminoso no actúa en el diáfano inmediatamente" ⁵⁵. Además de este argumento basado en la corporeidad de la luz ⁵⁶, Grimaldi sostiene que el fenómeno de la reflexión no tendría sentido en caso de producirse el movimiento de la luz en un instante, pues este fenómeno está asociado al movimiento y la instantaneidad niega precisamente toda noción de movimiento.

De hecho, ya desde antiguo la velocidad de la luz fue objeto de controversia. El propio Aristóteles, cuando se postula a favor de la instantaneidad de la luz en su tratado *De Anima*, menciona a Empédocles (495-435 a.C.) por defender éste la temporalidad de la luz. A lo largo de más de dos mil años, físicos y pensadores especularon sobre la velocidad de la luz ⁵⁷, hasta que finalmente, en 1676, Ole Roemer (1644-1710) estableció definitivamente, mediante la observación astronómica de los eclipses de los satélites de Júpiter, que la velocidad de la luz es finita.

Cuando Huygens escribe en 1678 la mayor parte de su *Tratado sobre la luz*, es conocedor del gran hallazgo de Roemer. No le cabe la menor duda, pues, en postularse pues a favor de la temporalidad de la luz, criticando de paso la apuesta cartesiana por la instantaneidad: "He hecho bien al meditar sobre estas cosas suponiendo que la emanación de la luz se logra con el tiempo, al ver que de esta manera todos sus fenómenos se pueden explicar, y que en todo lo que sigue la opinión contraria es incomprendible. Porque siempre me ha parecido a mí que ni siquiera el señor Descartes, cuyo objetivo ha sido tratar todos los temas de la Física de manera inteligible, y que seguramente ha tenido éxito en esto mejor que nadie antes que él, no ha dicho nada que no esté lleno de dificultades, o que incluso sea inconcebible, en el tratamiento de la Luz y sus propiedades" ⁵⁸.

De hecho, la cuestión de la velocidad finita de la luz es clave para la nueva teoría de Huygens. Basándose en los postulados de la incipiente teoría ondulatoria de Grimaldi, Huygens llega a la

conclusión de que si la luz invierte tiempo en su propagación, este movimiento sucesivo debe tomar la forma de ondas esféricas⁵⁹. En tanto que onda, la luz necesita un medio fluido en el que transmitirse, y éste es para Huygens la materia sutil, el *éter*. La extrema dureza de las partículas de *éter* es lo que explica la altísima velocidad de la luz y, su extrema elasticidad, que la velocidad de la luz no disminuya al extenderse ésta por el espacio.

La teoría ondulatoria de la luz de Huygens y la teoría corpuscular de Newton nacieron prácticamente al unísono y pugnarón desde sus inicios por su supremacía científica. Sin embargo, finalmente se impuso la teoría newtoniana aunque, más que por sus argumentos, por la indiscutible autoridad científica de su autor, adquirida gracias a la formulación de la Ley de Gravitación Universal. La gravedad de Newton sirvió pues para apagar, al menos durante un tiempo, la ondulatoria luz de Huygens.

II.3.4.2. La gravedad “descartada”

Aunque el estudio de la causa eficiente de la gravedad quedó relegado a un segundo plano, ya desde joven Huygens mostró un temprano interés por los fenómenos relacionados con ella. Con tan sólo 17 años, descubre por sí solo que la curva descrita por una cadena sujeta por sus extremos y sometida a la acción de la gravedad no se correspondía exactamente con una parábola, tal y como había afirmado Galileo Galilei⁶⁰. No obstante, tuvieron que pasar varios años hasta que descubriera en 1691 la fórmula de esa desconocida curva gravitatoria que él mismo bautizó como “catenaria” (del latín *‘catenarius’* que significa ‘propio de la cadena’). Siguiendo la estela de Galilei, Huygens se interesa también por las particularidades de la cicloide, de la que descubre su propiedad tautócrona, relacionada con la caída de los cuerpos graves, según la cual el tiempo que un cuerpo tarda en recorrer la distancia desde cualquier punto de una cicloide invertida hasta el punto más bajo de la curva es siempre el mismo, con independencia de dónde se situó el punto de inicio del movimiento.

57. Cabe apuntar que los grandes físicos de la primera mitad del siglo XVII se habían postulado a favor de la instantaneidad de la luz.

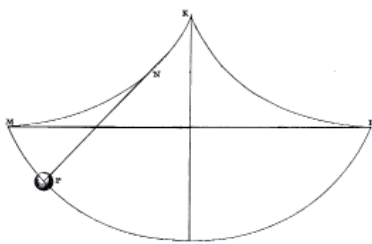
Galileo Galilei propuso en sus *Discorsi* un experimento para probar si la transmisión lumínica requería tiempo o no y, finalmente, concluyó que se podía considerar instantánea: “si potrà assai sicuramente concludere, l'espansion del lume essere istantanea”. (Ver GÓMEZ, Susana: Galileo y la naturaleza de la luz, en MONTESINOS, José (ed); SOLÍS, Carlos(ed): Largo campo di filosofare. Canarias: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 2001, p. 412 nota 19).

Kepler, en la proposición V del Capítulo I de sus *Paralipómenos*, afirma que “La velocidad de la luz no es en el tiempo sino en un momento. (...) Por tanto, la velocidad de la luz es infinita”. (Ver KEPLER, Johannes; MALET, Antoni (ed): *Paralipòmens a Vitel·lió: els orígens de l'òptica moderna*. Barcelona: Eumo, 2010, p. 22).

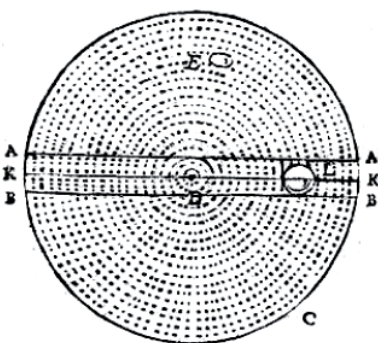
Descartes, en el capítulo XIV de su *Tratado de la Luz*, afirma que “Las principales propiedades de la luz son: 1) se extiende circularmente en todas direcciones alrededor de los cuerpos luminosos; 2) y a cualquier distancia; 3) y en un instante”. (Ver DESCARTES, René; TURRÓ, Salvio (ed): *El Mundo. Tratado de la luz*. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989, p. 215). Tal es su seguridad, que en 1634 afirma que la luz “llega a nuestros ojos desde el objeto luminoso en un instante; e incluso añadiría que para mí esto es tan cierto, que si se demostrara que es falso, estaría dispuesto a confesar que no sé absolutamente nada de filosofía”: citado en ZAJONC, Arthur: *Atrapando la luz. Historia de la luz y de la mente (3a Ed)*. Barcelona: Andrés Bello, 1996, p. 258

58. HUYGENS, Christiaan; THOMPSON, Silvanus P. (ed): *Treatise On Light*. London: Macmillan And Company, 1912, p. 5.

59. “Si la luz necesita tiempo para su propagación (...), este movimiento, impreso en la materia, es sucesivo; y en consecuencia se extiende, como lo hace el sonido, por superficies esféricas y ondas: yo las llamo ondas por su parecido con las que se ven formarse en el agua cuando se tira una piedra en ella”. HUYGENS, Christiaan; THOMPSON, Silvanus P. (ed): *Treatise On Light*. London: Macmillan And Company, 1912, p. 4.



F.09. Cicloide pendular. HUYGENS, Christiaan: BLACKWELL, Richard J. (ed): Christiaan Huygen's the pendulum clock, or, Geometrical demonstrations concerning the motion of pendula as applied to clocks. Ames: The Iowa State University Press, 1986, p. 22



F.10. Vórtice gravitatorio. HUYGENS, Christiaan: *Discours de la Cause De La Pesanteur* / Par C. H. d. Z. Leide: Chez Pierre Vander Aa, Marchand Libraire, 1690

60. Aunque Joachim Jungius (1587-1657), contemporáneo de Galileo, descubrió ya en su momento que la curva descrita por la cadena no coincidía exactamente con la parábola, fue incapaz de resolver el problema.

61. En la misma reunión de la Academia de Ciencias francesa donde Huyghens presentó sus tesis sobre la causa del peso en 1669, el matemático Gilles Personne Roberval (1602-1675) leyó una memoria donde desarrollaba una antigua idea suya, expuesta ya en una carta a Fermat, del 16/8/1636, en la que se traslucía una incipiente noción de gravitación newtoniana, totalmente opuesta a la cartesiana: "Puede suceder, y es muy verosímil, que el peso sea una atracción mutua, o un deseo natural que los cuerpos tienen de unirse, como acontece claramente con el hierro y el imán [...] que, en caso de ser libres, se acercarán de modo recíproco, si bien el más fuerte de los dos hará menos camino..." (Citado en NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p.87).

En 1673 Huygens publica un tratado -escrito en 1668- titulado "Horologium oscillatorium sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae" (*El reloj de péndulo y las demostraciones geométricas sobre el movimiento pendular aplicado a los relojes*) en el que, gracias a su fórmula sobre duración de las oscilaciones del péndulo, es capaz de determinar el valor de la aceleración de la gravedad en $9,81 \text{ m/s}^2$.

Finalmente, en 1669 Huygens expone a la Real Academia de las Ciencias de París sus reflexiones sobre la causa eficiente de la gravedad⁶¹. Años más tarde, éstas quedan recogidas en un apéndice a su *Tratado de la Luz*, cuyo título completo es en realidad "Traité de la Lumiere. Avec un Discours de la Cause De La Pesanteur" (*Tratado de la Luz. Con un Discurso sobre la Causa de la Gravedad*). A pesar de introducir ciertas correcciones y matices, Huygens suscribe en su mayor parte la explicación cartesiana del fenómeno gravitatorio⁶²: el movimiento rotatorio de los vórtices alrededor de los planetas provoca el desplazamiento de la materia sutil, el éter, hacia las partes más externas de los cielos, obligando a los cuerpos más pesados a ocupar los espacios "vacíos" que el éter deja debajo de ellos⁶³. Mediante esta exposición Huygens da por explicado el fenómeno de la gravedad en su manifestación más primaria, la caída de los cuerpos graves.

La publicación en 1687 de la teoría de la gravedad newtoniana, que ataca frontalmente la gravedad cartesiana, induce al físico holandés a redactar un apéndice a su escrito sobre la gravedad, en el que defiende la teoría cartesiana. La crítica de Huygens a Newton se centra en la necesidad del inglés de recurrir a enigmáticas fuerzas a distancia transmitidas en el vacío para explicar la causa de la gravedad pues, según los postulados de la mecánica cartesiana, las fuerzas sólo pueden transmitirse por contacto directo. Critica también la idea según la cual los cuerpos pueden atraerse o repelerse, ajena a las leyes cartesianas del movimiento. No obstante, y a pesar de negar de raíz la Ley de Gravitación Universal, Huygens reconoce algunas bondades de los postulados newtonianos y, convenientemente adaptados al sistema cartesiano, los incorpora a su explicación de

la gravedad. Tal es el caso de la idea newtoniana según la cual el Sol atrae a los planetas de la misma manera que éstos atraen a sus satélites, explicando así el movimiento planetario a través del fenómeno de la gravitación.

De modo análogo a lo que le sucedió a Galileo Galilei, y a diferencia de lo que consiguió con la luz, Huygens no fue capaz de construir una nueva teoría propia de la gravedad, a pesar de descubrir y describir, con gran precisión, un buen número de fenómenos relacionados con la gravitación y la caída libre de los cuerpos. Quizá esta incapacidad para construir una teoría propia sobre la gravitación sea el motivo subyacente de la timidez y la brevedad de la réplica de Huygens a la gravedad Newtoniana, una teoría de una enorme corpulencia teórica y matemática que *descartó*, de una vez por todas, la gravedad de René Descartes.

II.3.5. ISAAC NEWTON: ÉTER, GRAVEDAD Y LUZ

Como hemos visto, fue Galileo Galilei quien, con sus críticas al aristotelismo escolástico, inició el camino hacia la revolución científica del siglo XVII. Significativamente, el mismo año de su muerte nació Isaac Newton (1642-1727), uno de los físicos más notables de la historia que, con su *Ley de Gravitación Universal* y su *Teoría Corpuscular de la Luz*, clausuró un siglo de intensa actividad científica.

Fruto de un temprano interés por las ciencias y las matemáticas, Newton ingresa en el Trinity College Cambridge en 1661. No obstante, su estancia es breve pues, debido a los estragos de la *Gran peste*, la universidad se ve forzada a cerrar cuatro años más tarde. El joven Newton regresa a Lincolnshire, su hogar natal, y durante los dos años siguientes (1665-1666) aprovecha la tranquilidad del campo y la ausencia de obligaciones académicas para concebir sus primeras intuiciones sobre la naturaleza de la luz y de la gravedad ⁶⁴, contrarias a la física cartesiana que, por aquellos tiempos, gozaba de una gran aceptación.



F.11. Isaac Newton (1642-1727).
www.newton-isaac.com

62. Ver apartado II-3.3.1 La gravedad terrestre como repulsión desigual de la materia.

63. En 1668 Huygens fue capaz de mostrar un ejemplo en el que se podía visualizar cómo un movimiento en torbellino causaba una fuerza centrífuga que obligaba a la materia más pesada a ir hacia el centro del torbellino. Huygens depositó un vaso cilíndrico lleno de agua con dos trozos de cera de España -más pesada que el agua- sobre una plataforma giratoria. Cuando la plataforma empezó a moverse, los trozos de cera, al ser más pesados, se desplazaron hacia los bordes del vaso. Pero al detener bruscamente la plataforma giratoria, observó Huygens que la cera "huía hacia el centro en un montón, lo cual me puso de manifiesto el efecto del peso y la razón de esto es que el agua, a pesar del reposo del vaso, continuaba todavía su movimiento circular y, por lo mismo, mantenía su esfuerzo por alejarse del centro; mientras que la cera de España lo había perdido, o casi". Citado en NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, pp. 166-167.

64. "En enero [de 1666] descubrí la teoría de los colores (...). El mismo año empecé a pensar sobre la gravedad". Citado en UDÍAS VALLINA, Agustín: Historia de la física: De Arquímedes a Einstein. Madrid: Síntesis, 2004, p. 143

Pero, a pesar de la potencia inicial de estas tempranas intuiciones, las teorías que Newton desarrolla sobre la gravedad y la luz son el fruto de un lento trabajo de destilación que dura más de cinco décadas, en el que el inglés es capaz de unir y reunir los más importantes avances realizados en la física a lo largo de todo un siglo. Así, han de pasar veinte años hasta que vea la luz su teoría sobre la gravitación, expuesta en su célebre tratado “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*” (*Principios matemáticos de la filosofía natural*, presentado a la *Royal Society* en 1686 y publicado en 1687), y casi cuarenta para que finalmente se publique su teoría corpuscular sobre la luz en “*Opticks, or a Treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light*” (*Óptica, o tratado sobre las reflexiones, las inflexiones y los colores de la luz, 1704*)⁶⁵.

Inicialmente Newton plantea el estudio de la naturaleza de ambos fenómenos de manera independiente. Pero, siguiendo la estela de sus predecesores, a medida que sus investigaciones van madurando muestra un interés creciente en intentar explicar ambos fenómenos a partir de una única concepción física: la noción de *fuerza a distancia*.

II.3.5.1. La gravedad, una fuerza universal

*“Yo considero la filosofía más que las artes, y no escribo sobre potencias manuales, sino naturales, tomando ante todo en cuenta las cosas que se relacionan con gravedad, levedad (...) y fuerzas semejantes, tanto atractivas como impulsivas.”*⁶⁶

Isaac Newton

Data de 1666 la célebre anécdota de la manzana según la cual Newton se pregunta por qué una manzana cae siempre siguiendo una dirección perpendicular al suelo y no hacia un lado o hacia arriba⁶⁷, y por qué la Luna, en cambio, no cae. Fruto de sus cavilaciones escribe en 1667 “*De gravitatione et aequipondio fluidorum*”, un breve texto de tintes marcadamente anticartesianos que condensa ya sus primeras intuiciones sobre la gravedad. No obstante, no es hasta la

65. *Cronología de los tratados de Newton sobre la gravedad y la luz: De gravitatione et aequipondio fluidorum (1667); New Theory about Light and Colours (1672); Mr. Isaac Newton's Observations Mentioned in his foregoing Hypothesis, and conducing to further Discoveries for completing his Theory of Light and Colors (1676); Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (1687); Optiks, or a Treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light (1704); edición en latín de Opticks (1706); segunda edición de los Principia (1713); segunda edición de Opticks (1718); tercera edición de Opticks (1721); tercera edición de los Principia (1726); A treatise of the system of the world, translated into English (1728); cuarta edición de Opticks (1730).*

66. *Prefacio de Newton a la primera edición de los Philosophiae Naturalis Principia Mathematica. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 200*

67. “Tras la cena, siendo cálido el tiempo, fuimos al jardín y tomamos té, bajo la sombra de algunos manzanos, él y yo solos. Entonces, junto con otras cosas, me contó que estaba en la misma situación que cuando se le vino a la mente, otrora, el concepto de gravitación. El motivo fue la caída de una manzana, mientras estaba cavilando con ánimo contemplativo. ¿Por qué había de caer siempre en perpendicular hacia el suelo esa manzana?, se preguntó. ¿Por qué no iba hacia un lado, o hacia arriba, sino constantemente hacia el centro de la Tierra? Con certeza, la razón es que la Tierra atrae a la manzana”; *W. Stukeley, 1727. Citado en NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 15*

68. *Ver apartado II-3.3.1 La gravedad terrestre como repulsión desigual de la materia.*

69. *El título del tercer libro de los Principia, El sistema del mundo, matemáticamente tratado, alude también a El Mundo de René Descartes. Nótese que Newton insiste en desmarcarse del método cartesiano, basado en hipótesis, en favor de la matematización de su física.*

70. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Libro III, Escolio General. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 813*

71. "La materia situada entre dos superficies esféricas concéntricas al vórtice jamás será acelerada". *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Libro II, Sección IX, Proposición LII, Teorema XL, Corolario III.*

"En esta Proposición he intentado investigar las propiedades de los vórtices con el fin de determinar si los fenómenos celestes pueden explicarse recurriendo a ellos. (...) Las partes más gruesas y menos fluidas tenderán hacia la circunferencia, salvo que pesen hacia el centro". *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Libro II, Sección IX, Proposición LII, Teorema XL, Escolio.*

"Es evidente que los planetas no son transportados en vórtices corpóreos. En efecto, según la hipótesis de Copérnico, los planetas que se mueven alrededor del Sol giran en elipses, con el Sol como foco común, y describen áreas proporcionales a los tiempos con radios trazados hasta el Sol. Pero las partes de un vórtice jamás pueden girar con semejante movimiento". *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Libro II, Sección IX, Proposición LIII, Teorema XLI, Escolio.*

Ver *NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, pp. 646, 649 y 651, respectivamente.*

72. Es muy conocida la siguiente frase de Newton: "si he visto un poco más allá que otros es porque estaba encaramado a hombros de gigantes". Citado en *STRATHERN, Paul: Newton y la gravedad. Madrid: Siglo XXI, 1999, p. 9*

73. Citado en *FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 264*

74. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Ley I del movimiento. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 237*

75. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Definición V. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 225*

publicación de su completo y extenso tratado "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" que el inglés expone en toda su completitud su revolucionaria teoría sobre la gravitación.

Newton se alinea con la opinión de físicos como Borelli o Roverbal que, mostrándose críticos con la hipótesis cartesiana de los vórtices gravitatorios⁶⁸, apuestan por una explicación de la gravedad basada en algún tipo de atracción natural. De hecho, el título de su tratado alude directamente a los "Principia Philosophiae"⁶⁹ de Descartes, publicados póstumamente en 1644. Newton considera que "la hipótesis de los vórtices tropieza con muchas dificultades"⁷⁰, algunas de ellas insalvables. Explica, por ejemplo, que un vórtice no puede generar órbitas elípticas ni excéntricas con velocidad variable en su trayectoria orbicular, tal como observó Kepler. También argumenta Newton que, en contra de lo que postula Descartes, los cuerpos más pesados que giran en torno a un vórtice tienden a dirigirse hacia la circunferencia y no hacia el centro. Se hace evidente, pues, la incapacidad de la hipótesis de los vórtices cartesianos para explicar el movimiento de los cuerpos celestes alrededor del Sol o el movimiento de los cuerpos graves en la Tierra⁷¹.

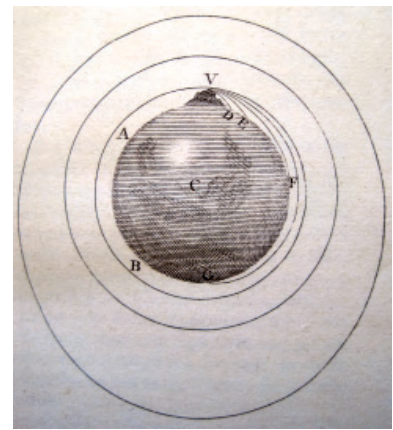
Como alternativa a la invalidada explicación cartesiana de la gravedad, Newton construye una ambiciosa teoría matemática sobre la gravitación capaz de aunar las intuiciones y las teorías de los más eminentes físicos que le precedieron: la ley de la caída de los cuerpos graves de Galileo Galilei; las leyes del movimiento planetario de Johannes Kepler; la idea de atracción magnética de William Gilbert; los conceptos de inercia y de conservación del movimiento de Descartes; el movimiento pendular y la aceleración gravitatoria de Christiaan Huygens; la idea de la existencia de una fuerza planetaria atractiva inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de Giovanni Alfonso Borelli; o el principio de Robert Hooke según el cual una esfera atrae como si toda su fuerza se concentrase en el centro⁷², por citar sólo las contribuciones previas más importantes. No obstante, a pesar de su consistencia matemática y de la enorme cantidad de fenómenos físicos satisfactoriamente explicados por la gravitación newtoniana, los cartesianos convencidos -como

Huygens- se mostraron reticentes a aceptarla como una teoría viable y correcta por no ajustarse a las leyes de la física de Descartes. Voltaire ilustra la compleja situación de aquellos años cuando afirma que “en París todo es explicado por una presión que nadie entiende, y en Londres por una atracción que nadie entiende tampoco”⁷³.

Newton afirma que “todos los cuerpos perseveran en su estado de reposo o de movimiento en línea recta, salvo que se vean forzados a cambiar ese estado por fuerzas impresas”⁷⁴. Se advierte aquí ya el carácter protagonista de la noción de *fuerza* en la física newtoniana pues, aunque tal noción no es nueva, Newton le otorga una importancia central en su física al responsabilizarla de cualquier cambio en la trayectoria y la velocidad de todo cuerpo. De acuerdo con esta primera ley del movimiento, si los planetas son desviados continuamente de sus trayectorias rectilíneas y sufren variaciones en su velocidad es porque sobre ellos actúa algún tipo de fuerza, del mismo modo que todo proyectil es desviado de su trayectoria inicialmente rectilínea, adquiriendo al mismo tiempo una aceleración uniforme en su caída, porque también está sometido a la acción de alguna fuerza.

Newton señala que, en ambos casos, la fuerza que actúa sobre los cuerpos, sean estos planetas o proyectiles, es una fuerza *centrípeta*, una fuerza “por la cual los cuerpos son arrastrados o impelidos, o tienden de cualquier modo hacia un punto”⁷⁵. Es por acción de una fuerza centrípeta que los cuerpos celestes tienden a moverse hacia los centros físicos de sus órbitas, sean éstos otros planetas (en el caso de los satélites) o estrellas (en el caso de los planetas). Del mismo modo, es por acción de una fuerza centrípeta que los cuerpos terrestres tienden caer hacia el centro de la Tierra.

La gran intuición de Newton es advertir que, en ambos casos, esta fuerza centrípeta es una y la misma: *la fuerza de la gravedad*⁷⁶. Con esta síntesis entre la gravedad terrestre galileana y la atracción cósmica kepleriana, termina Newton con la ancestral distinción entre la gravedad, considerada desde Aristóteles como un fenómeno propiamente terrestre, y cualesquiera que fuese la razón dada hasta entonces al movimiento de los planetas alrededor del Sol⁷⁷.



F.13. Trayectorias de un proyectil y de un cuerpo celeste bajo la acción de la gravedad terrestre. NEWTON, Isaac: *A treatise of the system of the world, translated into English*. London: F. Fayram, 1728, p. 6. Fotografía del autor.

76. “Si no fuese por la gravedad, un proyectil no se desviaría hacia la Tierra, sino que continuaría en línea recta con un movimiento uniforme si se suprimiera la resistencia del aire. Es su gravedad quien le aparta continuamente de un curso rectilíneo, haciendo que se desvíe más o menos hacia la Tierra, de acuerdo con su gravedad y la velocidad de su movimiento. (...) Incrementando la velocidad podemos aumentar a discreción la distancia hasta la cual podría proyectarse, y disminuir la curvatura de la línea que describiría, hasta que al fin caería a la distancia de 10, 30 ó 90 grados, o incluso circundaría toda la Tierra antes de caer o, más aún, lograría no caer jamás, encaminándose hacia los espacios celestes, continuando su movimiento indefinidamente”. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Definición V*.

“Puesto que ambas fuerzas, es decir, la gravedad de los cuerpos pesados y las fuerzas centrípetas de las lunas, se dirigen hacia el centro de la Tierra y son semejantes e iguales entre sí, ambas tendrán una y la misma causa. Y, en consecuencia, la fuerza que retiene a la Luna en su órbita es precisamente la misma fuerza que llamamos gravedad”. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Libro III, Proposición IV, Teorema IV, Escolio*.

NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid: Editora Nacional, 1982, pp. 225 y 671 respectivamente.

77. Es significativo que la RAE aún matice la distinción entre la gravedad terrestre y la gravedad universal en su definición de 'Gravedad': 1. f. Fís. Fuerza que sobre todos los cuerpos ejerce la Tierra hacia su centro. Su valor normal (g) es 9,81 m/s². / 2. f. Fís. Atracción universal de los cuerpos en razón de su masa.

78. "A estas atracciones se debe la figura esférica de todos los planetas y la Tierra, así como la coherencia de sus partes". *El Sistema Del Mundo, Párrafo 25. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 846.*

79. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Ley III del movimiento. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 238*

80. "Toda acción es mutua, y hace (por la tercera Ley del Movimiento) que los cuerpos se acerquen mutuamente, por lo que tiene que ser la misma en ambos cuerpos. Podemos, desde luego, considerar que un cuerpo atrae y el otro es atraído, pero esta distinción es más matemática que natural. En realidad, la atracción reside en cada cuerpo hacia el otro y es, en consecuencia, de la misma especie en ambos. La fuerza atractiva se encuentra en ambos". *El Sistema Del Mundo, Párrafo 20. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 842.*

81. *La expresión matemática actual de este enunciado es $F = G \cdot (m_1 \cdot m_2) / r^2$, siendo m_1 y m_2 las masas de los cuerpos que se atraen, r la distancia que los separa y G la constante de gravitación universal (no descubierta por Newton).*

82. *En las proposiciones XVIII y XX del Libro III de los Principia, Newton desarrolla esta idea, reconociendo que fue Richer el primero en deducir, en 1672, que las alteraciones en el movimiento de los péndulos situados en distintas partes del mundo debían de ser provocadas por leves diferencias en la intensidad gravitatoria de la Tierra.*

Al igual que sus predecesores, Newton relaciona la acción de la gravedad con la curvatura. Demuestra matemáticamente que por acción de la gravedad los planetas son desviados de sus trayectorias rectilíneas siguiendo trayectorias elípticas; demuestra también que los cometas y los proyectiles terrestres son desviados siguiendo trayectorias parabólicas; y, además, vincula la forma esférica de los cuerpos celestes a la gravedad⁷⁸.

Cualitativamente, Newton concibe la gravedad como una fuerza de atracción universal y mutua que actúa sobre los cuerpos a distancia e instantáneamente. Es universal porque afecta a todos los cuerpos materiales del cosmos. Es mutua porque, de acuerdo con su tercer axioma del movimiento, "*para toda acción hay siempre una reacción opuesta e igual*"⁷⁹, de modo que la manzana es atraída por la Tierra del mismo modo en que la Tierra es atraída por la manzana⁸⁰. Y actúa a distancia e instantáneamente porque sus efectos aparecen en el preciso momento en que dos cuerpos se encuentran a una distancia suficiente como para que su interacción gravitatoria sea sensible a los sentidos. La gravedad no es, pues, una cualidad absoluta de la materia cuyo centro físico sea localizable en un punto concreto del universo -como afirmó Aristóteles-, sino más bien un fenómeno basado en la interacción recíproca de los cuerpos.

Cuantitativamente, Newton establece que dos partículas materiales se atraen mutuamente con una fuerza gravitatoria directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros de gravedad⁸¹. Cabe recordar que la idea de una fuerza planetaria inversamente proporcional al cuadrado de las distancias rondaba ya desde Kepler y Bouillau y, para cuando Newton escribe los *Principia*, algunos científicos, como Borelli y Hooke, ya habían advertido la importancia central de esta cuestión. Sin embargo, lo que desmarcó a Newton del resto de sus contemporáneos fue el descubrimiento de que sólo una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de las distancias podía generar las órbitas elípticas descritas por Kepler en el movimiento de los planetas. De hecho, fue este descubrimiento el detonante de la publicación de los *Principia*.

El peso de un objeto terrestre no es otra cosa, pues, que la fuerza de atracción gravitatoria entre ese cuerpo y la Tierra. En el caso de suponer constantes la masa de la Tierra y la distancia de su centro al del cuerpo, esta fuerza de atracción dependería exclusivamente de la propia masa del cuerpo. No obstante, Newton advierte que el movimiento de rotación de la Tierra provoca en ésta un achatamiento que supone una diferencia sensible en la distancia del centro de la Tierra a su superficie en los polos y en el ecuador: la distancia es mayor en el ecuador que en los polos, de modo que la intensidad de la atracción gravitatoria en el ecuador es un tanto menor⁸².

La gravedad newtoniana se presenta, pues, como una fuerza universal y omnipresente a través de la cual interactúan todos los cuerpos materiales. Las consecuencias de esta interacción mutua universal son fácilmente apreciables en fenómenos tales como los movimientos planetarios, la caída de los cuerpos hacia la Tierra o el fluir de las mareas, fenómenos todos ellos en los que interactúan cuerpos de grandes masas. Sin embargo, advierte Newton que si no percibimos interacción gravitatoria alguna entre los objetos cotidianos que nos rodean es debido a que, al ser sus masas demasiado pequeñas, la intensidad de la atracción gravitatoria entre estos objetos se nos revela imperceptible⁸³.

A pesar de las bondades y los logros de la *Ley de Gravitación Universal*, Newton se descubre incapaz de dar explicación física alguna de la causa eficiente de la gravedad⁸⁴. Aunque ha conseguido invalidar matemáticamente la hipótesis cartesiana de los vórtices, no está en disposición de ofrecer una alternativa viable sin recurrir a causas teológicas. Además, desde el punto de vista de la física cartesiana la noción de *fuerza a distancia a través del vacío* resulta mecánicamente inviable y, por ello, a pesar de su base eminentemente matemática, corre el riesgo de encontrarse más próxima a las *calidades ocultas* de la obsoleta física aristotélica que de los postulados mecánicos de la nueva ciencia del siglo XVII.

A fin de intentar encontrar alguna explicación mecánica de la gravedad, Newton añade un *Escolio General* en la segunda

83. "Si se objeta que, de acuerdo con esta ley, todos los cuerpos que nos rodean gravitarán unos hacia otros y que esta gravitación no se manifiesta en forma alguna, responderé que, puesto que la gravitación hacia estos cuerpos es a la gravitación hacia toda la Tierra como estos cuerpos son a toda la Tierra, la gravitación hacia ellos tiene que ser muy inferior a lo que nuestros sentidos pueden observar". *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Libro III, Proposición VII, Teorema VII. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 677*

84. "Hasta aquí hemos explicado los fenómenos de los cielos y de nuestro mar por la fuerza gravitatoria, pero no hemos asignado aún causa a esa fuerza. (...) Hasta el presente no he logrado descubrir la causa de esas propiedades de gravedad a partir de los fenómenos." *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Libro III, Escolio General. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, pp. 816-817*

85. *Carta a Boyle, 1678*: "En cuanto a la causa de la gravedad, supondré que el éter consiste en partes que difieren unas de otras por infinitos grados de sutileza; que en los poros de los cuerpos hay menos éter denso, comparado con el más fino, que en las regiones del aire; y que el éter aún más denso en el aire afecta a las regiones superiores de la Tierra, y el éter más fino en la Tierra a las regiones inferiores del aire, de tal manera que desde la parte más alta del aire hasta la superficie de la Tierra, y nuevamente desde la superficie de la Tierra hasta su centro, el éter es insensiblemente más y más sutil. Imagine ahora cualquier cuerpo suspendido en el aire, o yaciendo sobre la Tierra; siendo por la hipótesis el éter más denso en los poros que se encuentran en las partes superiores del cuerpo que en las inferiores, y siendo ese éter más denso menos apto para insertarse en tales poros que el éter más sutil situado debajo, se esforzará por salir y dejar paso al éter más sutil situado debajo, cosa imposible salvo que los cuerpos descendan y le hagan lugar donde ir." *Citado en NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 133*

...
...
... to subscribe
...
...
about a
Light

F.14. "light" (luz). NEWTON, Isaac: *A discourse Of Mr Isaac Newton containing his New Theory about Light and Colours*, sent by him from Cambridge February 6 1672. Manuscrito original: The Royal Society, Ref. No.: RBO/4/44, folio 146. Fotografía del autor.

edición de los *Principia* (1713) en el que recupera algunas reflexiones realizadas en su juventud sobre el éter y la gravedad⁸⁵: sin profundizar en la cuestión, apunta la posibilidad de que en la acción de cierto éter sutilísimo se esconda la causa de la gravedad⁸⁶. Más adelante, a propósito de la segunda edición inglesa de la *Óptica* (1717), Newton explora esta posibilidad y propone que la causa de la gravedad se debe a las diferencias de densidad del medio etéreo. Este éter es mucho más sutil en el interior de los cuerpos celestes que en el exterior y, a medida que se aleja de éstos, su densidad va aumentando. Junto con la densidad aumenta también la presión que las partículas etéreas ejercen sobre los cuerpos, de tal manera que éstos tienden a desplazarse desde las zonas más densas (en el espacio vacío) a las más sutiles (en las inmediaciones de los cuerpos).

A través de esta hipótesis Newton da por explicada la causa por la cual los cuerpos tienden a desplazarse unos hacia otros, fenómeno que se conoce con el nombre de *gravedad*⁸⁷.

II.3.5.2. La luz corpuscular

“La naturaleza y sus leyes yacían ocultas en la noche.

Y dijo Dios ¡hágase Newton! Y todo se hizo luz.”

*Alexander Pope*⁸⁸

Junto a sus primeras intuiciones sobre la gravedad, Newton desarrolla en 1666 sus originales ideas sobre la luz. La lectura de su *Nueva teoría sobre la luz y los colores* en 1672 le sirve para ingresar en la *Royal Society* como *Fellow*. En 1675 publica su *Hipótesis para explicar las propiedades de la luz* que, convenientemente ampliada en 1687, da lugar en 1704 a la publicación de la primera edición de la *Óptica, o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*. Desarrolla aquí su teoría corpuscular de la luz, diametralmente contraria a la concepción ondulatoria propuesta por Descartes y Huygens.

86. “Podríamos ahora añadir algo sobre cierto espíritu sutilísimo que penetra y yace latente en todos los cuerpos grandes, por cuya fuerza y acción las partículas de los cuerpos se atraen unas a otras cuando se encuentran a escasa distancia y se ligan en caso de estar contiguas. (...) Pero éstas son cosas que no pueden ser explicadas en pocas palabras. Por otra parte, tampoco disponemos de una cantidad suficiente de experimentos para determinar con precisión y demostrar mediante qué leyes opera este espíritu”. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Libro III, Escolio General*. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 817

87. *Óptica, Advertencia II*: “En esta segunda edición de la *Óptica* (...) he añadido algunas Cuestiones al final del libro tercero. Para mostrar que no considero que la gravedad sea una propiedad esencial de los cuerpos, he añadido una Cuestión relativa a su causa. He decidido presentar el problema en forma de pregunta, ya que no estoy plenamente satisfecho por falta de experimentos”.

Libro III, Parte I, Cuestión 21: “¿Acaso este medio no es mucho más raro en el interior de los cuerpos densos del Sol, estrellas, planetas y cometas que en los espacios celestes vacíos que se hallan entre ellos? ¿Acaso al alejarse a grandes distancias de ellos no se torna continuamente más y más denso, causando con ello la gravedad de esos grandes cuerpos entre sí y de sus partes hacia los cuerpos, al intentar cada uno de tales cuerpos alejarse de las partes más densas del medio hacia las más raras? (...) Aun cuando este aumento de densidad pueda ser extremadamente lento a grandes distancias, con todo, la fuerza elástica de este medio puede ser extremadamente grande, como para empujar a los cuerpos de las partes más densas del medio a las más raras con esa potencia que denominamos gravedad”.

NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): *Óptica* o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alfaguara, 1977, p.4 y 304 respectivamente.

88. Epitafio de Alexander Pope (1688-1744)



F.15. Cenotafio a Newton (proyecto). Étienne-Louis Boullée (1728-1799). www.newtowninstitute.org

89. Óptica, Libro I, Parte I, Definición I. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, p. 9

90. "¿Acaso los rayos de luz no son cuerpos pequeñísimos emitidos por las sustancias luminosas? En efecto, tales cuerpos habrán de pasar por los medios uniformes en línea recta sin doblarse hacia la sombra, tal como ocurre con la naturaleza de los rayos de luz". Óptica, Libro III, Parte I, Cuestión 29. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, p.320

91. Newton utiliza reiteradamente este argumento en contra de las teorías ondulatorias a pesar de saber que Huygens había dado con una explicación satisfactoria de la rectitud de los rayos en su Tratado de la Luz (escrito en 1678 y publicado en 1690).

92. "La presión no se propaga por un fluido en direcciones rectilíneas excepto cuando las partículas del fluido están dispuestas en línea recta"; "Todo movimiento propagado por un fluido diverge de un proceso rectilíneo en los espacios inmóviles"; "Dado que la luz se propaga en línea recta, es evidente que no puede consistir sólo en acción (según las Proposiciones XLI y XLII)". Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Libro II, Sección VIII, Proposiciones XLI, XLII y Escolio. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, pp. 621, 623 y 637 respectivamente.

"¿Acaso no son erróneas todas las hipótesis en las que se supone que la luz consiste en una presión o movimiento propagado a través de un medio fluido? (...) Si consistiese en una presión o movimiento propagado instantáneamente o en el tiempo, entonces se doblaría hacia las sombras, pues la presión o movimiento no se puede propagar por un fluido en línea recta, tras un obstáculo que detenga parte del movimiento; por el contrario, se doblará y extenderá en todas direcciones por el medio en reposo que está del otro lado del obstáculo". Óptica, Libro III, Parte I, Cuestión 28. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, p.313

Para Newton los rayos de luz "son las partes menores de la misma, tanto las sucesivas en la misma línea como las contemporáneas en diversas líneas" ⁸⁹. Los rayos de luz son entidades físicas plenas, pues los concibe como pequeños corpúsculos proyectados por los cuerpos luminosos que avanzan en línea recta por el espacio y en el tiempo.

Newton considera la rectitud de los rayos como una propiedad fundamental de la luz ⁹⁰ y advierte que, mientras que su teoría corpuscular da una sencilla explicación a este fenómeno, las concepciones ondulatorias (que consideran la luz como una presión o movimiento de las partículas un medio fluido etéreo omnipresente) tropiezan con graves dificultades ⁹¹. Primero en los *Principia* y luego en la *Óptica* ⁹², Newton señala que en un medio fluido la presión no se propaga en línea recta, excepto cuando todas las partículas del mismo están dispuestas en línea recta -algo altamente improbable-. Señala además que, tras superar un obstáculo que detenga parte del movimiento, la presión o movimiento de este medio fluido -que es la luz- no seguirá en línea recta sino que se doblará y extenderá en todas direcciones. Newton considera suficientes estos argumentos como para negar la posibilidad de una transmisión rectilínea de la luz a través del denso éter cartesiano y por tanto, negar de raíz cualquier teoría ondulatoria.

Afirma el científico inglés que existen corpúsculos luminosos de distintos tamaños. Según el tamaño del corpúsculo proyectado, el rayo de luz posee la capacidad de despertar la sensación de un color u otro ⁹³ y, según el color, al rayo le corresponde un grado de refrangibilidad concreto: "Lo único que se requiere para producir toda la variedad de colores y grados de refrangibilidad es que los rayos de luz sean cuerpos de diferentes tamaños, los menores de los cuales toman el color violeta, el más débil y oscuro de todos los colores, siendo los más fáciles de desviar del camino recto debido a las superficies refractantes. Los demás, a medida que se hacen cada vez mayores, adoptarán colores progresivamente más fuertes y luminosos, azul, verde, amarillo y rojo, siendo cada vez más difíciles de desviar" ⁹⁴.

Siguiendo esta nueva teoría de los colores, Newton distingue dos tipos de luz: la luz homogénea, simple, formada por rayos de corpúsculos de un mismo tamaño y, por tanto, de un mismo color y grado de refrangibilidad; y la luz heterogénea, compuesta por rayos de corpúsculos de distintos tamaños y, por tanto, de distintos colores y grados de refrangibilidad⁹⁵. Demuestra experimentalmente que la luz solar, blanca, es en realidad una luz heterogénea compuesta por rayos de diferentes colores: para ello hace pasar un haz de luz solar a través de un prisma de vidrio, de tal modo que al salir del prisma el haz se descompone en rayos con ángulos de refracción y colores distintos⁹⁶. Newton explica que, por composición, se puede obtener cualquier color e, incluso, cualquier tono de gris. Con esta *Nueva teoría sobre la luz y los colores*, Newton no sólo inaugura la espectrografía, sino que además desbanca empíricamente la explicación ondulatoria de los colores, basada en la hipótesis de la alteración en el movimiento de las partículas etéreas.

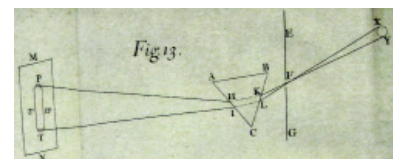
A principios de siglo muchos científicos negaron la naturaleza corpórea de la luz, hecho que dificultó enormemente la explicación de cualquier tipo de interacción entre ésta y los cuerpos, pues ello implicaba tener que dar cuenta de una interacción entre entidades de naturaleza distinta cuando sólo se aceptaba como posible la interacción entre entidades de una misma naturaleza⁹⁷. Bien distinto es el caso de Newton que, al basar su teoría en la naturaleza corpuscular de la luz, puede considerar sin dificultades que ésta y los cuerpos son entidades de naturaleza análoga que pueden, por tanto, interactuar entre sí: así, los cuerpos actúan sobre la luz reflejándola, refractándola o difractándola, y la luz actúa sobre los cuerpos calentándolos⁹⁸. Más aún, la capacidad de los cuerpos de brillar y emitir partículas de luz⁹⁹ (es decir, de convertirse en luz) cuando están lo suficientemente calientes, le lleva a plantear también la posibilidad del caso inverso, es decir, que la luz pueda convertirse en cuerpo. Así pues, en la física newtoniana la luz y los cuerpos no son sólo entidades de naturaleza análoga, sino que también son entidades recíprocamente transmutables¹⁰⁰.

93. "Propiamente hablando, los rayos no tienen colores. En ellos, no existe más que una capacidad o disposición para despertar este o ese color. (...) Así el color no es en el objeto más que una disposición a reflejar este o aquel tipo de rayos más copiosamente que el resto. En los rayos no existe más que esa disposición a propagar este o aquel movimiento hasta el sensorio y, en éste, se dan las sensaciones de dichos movimientos bajo forma de colores". Óptica, *Libro I, Parte II, Definición*. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, p.112

94. Óptica, *Libro III, Parte I, Cuestión 29*. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, p.321

95. "Llamo luz simple, homogénea y similar a aquélla cuyos rayos son igualmente refrangibles; y llamo compuesta, heterogénea o disimilar a aquella luz algunos de cuyos rayos son más refrangibles que otros". Óptica, *Libro I, Parte I, Definición VII*. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, p. 11

96. Óptica, *Libro I, Parte I, Proposición II, Teorema II*. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, p.32



F.16. Descomposición de la luz solar blanca en rayos de varios colores por un prisma de cristal. NEWTON, Isaac: *Opticks; or, A treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light; also, Two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures*. London: Sam. Smith and Benj. Walford, printers to the Royal Society, 1704. Libro I, Lámina III, Parte I, Fig. 13. Fotografía del autor.

97. Es especialmente ilustrativo el caso de Johannes Kepler. Véase el apartado 3.2.1 La luz, materia inmaterial, de este mismo capítulo.

98. "¿Acaso los cuerpos y la luz no actúan mutuamente unos sobre otros? Es decir, ¿no actúan los cuerpos sobre la luz al emitirla, reflejarla, refractarla e inflexionarla y, la luz sobre los cuerpos, al calentarlos y provocar en sus partes un movimiento vibratorio que es en lo que consiste el calor?". *Óptica, Libro III, Parte I, Cuestión 5. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, p. 295*

99. "¿Acaso no brillan y emiten luz todos los cuerpos fijos cuando se calientan más allá de cierto grado?" (...) *Cuestión 9. "¿Qué es el fuego, sino un cuerpo calentado hasta el punto de emitir abundante luz? ¿Qué otra cosa es el hierro al rojo vivo, sino fuego? ¿Y qué otra cosa es el carbón ardiente, sino madera al rojo vivo?". Óptica, Libro III, Parte I, Cuestión 8. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, pp. 296-297*

100. "¿Acaso los cuerpos grandes y la luz no son convertibles unos en otros? (...) La transformación de los cuerpos en luz y de la luz en cuerpos se compecede muy bien con el curso de la naturaleza, que parece deleitarse con las transmutaciones. (...) ¿Por qué no habría la naturaleza de cambiar los cuerpos en luz y la luz en cuerpos?". *Óptica, Libro III, Parte I, Cuestión 30. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, pp. 323-325.*

101. "La causa de la reflexión, contra lo que se cree comúnmente, no es el choque de la luz contra las partes sólidas e impenetrables de los cuerpos. (...) No hay otro modo de resolver este problema que diciendo que la reflexión de un rayo no se produce por un solo punto de la superficie reflectante, sino por cierta potencia del cuerpo uniformemente difundida por toda su superficie, con la que actúa sobre el rayo sin contacto inmediato. Efectivamente, mostraremos más adelante que las partes de los cuerpos actúan sobre la luz a distancia". *Óptica, Libro II, Parte III, Proposición VIII. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, pp. 231-234*

En base a esta franca interacción mutua, explica Newton la transparencia, la opacidad y la absorción de la luz por los cuerpos mediante la existencia -o no- de múltiples reflexiones dentro de sus poros internos: cuando los poros son suficientemente pequeños, la luz los atraviesa sin que se produzcan reflexiones y se produce la transparencia; en cambio, cuando los poros son más grandes, sí se producen éstas reflexiones internas y los rayos de luz se ahogan en el interior de los cuerpos. Así mismo, los cuerpos son calentados por la luz al hacer ésta vibrar sus partes internas.

Sin embargo, en contra de lo que cabría esperar, Newton no concibe la interacción entre la luz y los cuerpos por contacto directo entre las partes sino que, seguramente inducido por su propia concepción de la gravedad, se postula a favor de una interacción a distancia¹⁰¹ basada, de nuevo, en las diferencias de densidad de un medio etéreo extremadamente sutil. Efectivamente, el éter sutil se torna progresivamente más denso al alejarse del interior de los cuerpos compactos hacia los espacios vacíos, produciéndose entonces un gradiente de densidad en las inmediaciones de los mismos. De esta manera, cuando un rayo de luz se acerca a un cuerpo, su trayectoria rectilínea no cambia de golpe en un punto, sino que se incurva progresivamente por acción de estas diferencias de densidad. Esta curva adopta la figura de una parábola, cuya abertura depende tanto de la distancia entre el corpúsculo y el cuerpo, como de la masa del corpúsculo lumínico en cuestión: esta es la explicación de por qué Newton otorga a cada rayo de luz de distinto color (formado por corpúsculos de distinta masa) un ángulo de refrangibilidad diferente.

Newton ensaya esta explicación ya en los *Principia*¹⁰², y la desarrolla más adelante en su *Óptica*. El objetivo último subyacente no es otro que intentar ofrecer una explicación unificada de los fenómenos de la gravedad y de la luz. Como hemos visto, Newton recurre a las diferencias de densidad del medio etéreo para explicar las fuerzas de atracción y repulsión a distancia para explicar la gravitación y ciertos fenómenos de la luz, como la difracción o la reflexión. Newton lleva al extremo la analogía entre ambos fenómenos al

comparar las trayectorias parabólicas de un proyectil sometido a la fuerza de la gravedad y de un corpúsculo luminoso reflejado en un cuerpo ¹⁰³. No obstante, a pesar de todos sus esfuerzos, Newton fracasa en el intento: al tratar de unificar sus teorías, éstas tropiezan con algunas dificultades insalvables pues, al mismo tiempo que se ve incapaz de explicar algunas propiedades de la luz, se ve obligado a subvertir algunos de los postulados fundamentales de su propia *Ley de Gravitación Universal*.

II.3.6. LA INTERACCIÓN LUZ-GRAVEDAD DESPUÉS DE NEWTON

No deja de sorprender que, a pesar de su manifiesto interés por unificar la gravedad y la luz en una misma teoría, Newton no plantease abiertamente la cuestión de si la luz gravita o no, o lo que es lo mismo, si pesa o no, especialmente si se tiene en cuenta que, en su teoría corpuscular, la luz está formada por corpúsculos dotados de masa. Algunos historiadores han interpretado erróneamente que la teoría newtoniana lleva implícita la idea de que la gravedad de los cuerpos actúa a distancia sobre los rayos de luz, produciendo así ciertas inflexiones o incurvaciones de los rayos. Aunque es cierto que Newton se refiere a la actuación de fuerzas de atracción y repulsión en las inmediaciones de los cuerpos para explicar ciertos fenómenos de la luz como la difracción o la reflexión, en ningún momento identifica tales fuerzas con la fuerza de la gravedad.

En caso de considerar que la luz gravita, su trayectoria rectilínea debería curvarse por acción de la gravedad, es decir, por efecto de un cambio de densidad en la materia sutil, no sólo en las inmediaciones de los pequeños cuerpos, sino también por efecto de la gravedad de los grandes cuerpos celestes ¹⁰⁴. Aunque Newton no se manifiesta ante tal posibilidad, sí que afirma que la gravedad del Sol no actúa sobre la luz, pues ésta es capaz de emanar del propio globo solar sin evidenciar los efectos de la gravedad ¹⁰⁵. Veremos que la inconsistencia de estos planteamientos no escapa a los científicos posteriores a Newton.

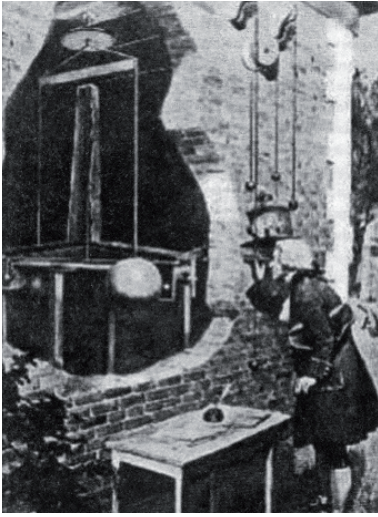
102. Newton desarrolla esta posibilidad en la Sección XIV de los Principia: Sobre el movimiento de cuerpos muy pequeños cuando son perturbados por fuerzas centrípetas tendentes hacia las diversas partes de cualquier cuerpo muy grande. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 470 y ss.



F.17. Reflexión de la luz debida al gradiente de densidad etérea. NEWTON, Isaac; COTES, Roger (Ed): Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (2ª ed). Cantabrigiae: 1713, p. 106. Fotografía del autor.

103. "La atracción de los rayos de luz, en relación a su cantidad de materia, mantiene con la gravedad de un proyectil cualquiera, en relación a su cantidad de materia, una razón compuesta de la razón entre la velocidad del rayo de luz y la del proyectil, y la razón entre la flexión o curvatura de la línea que describe el rayo en el lugar de la refracción y la flexión o curvatura de la línea que describe el proyectil. De esta proporción deduzco que la atracción de los rayos de luz es mayor que 1.000.000.000.000.000 veces la gravedad de los cuerpos en la superficie de la Tierra, en relación a la cantidad de materia que hay en ellos, teniendo en cuenta que la luz del Sol recorre el espacio que la separa de la Tierra en siete u ocho minutos". Óptica, Libro III, Parte I, Cuestión 30. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alfaguara, 1977, p. 439

104. Ralph Baierlein plantea que, según la teoría newtoniana, si la luz estuviese formada por pequeñas partículas corpóreas sometidas a las leyes físicas del movimiento, como la gravedad, su trayectoria no debería ser recta sino curva, como la de cualquier proyectil... El quid de la cuestión está en la enorme velocidad de la luz: cuanto más rápido va un proyectil, menos curva es su trayectoria. Newton conocía un valor aproximado de la elevadísima velocidad de la luz, de modo que pensó que la trayectoria de la luz sí debía curvarse, pero tan poco que nos resultaría imperceptible. BAIERLEIN, Ralph: Newton to Einstein, the trail of light. Cambridge, Cambridge University Press, 1992, p. 35



F.18. Henry Cavendish midiendo el valor de la Constante de Gravitación Universal. LOZANO LEYVA, Manuel: *De Arquímedes a Einstein. Los diez experimentos más bellos de la física* (3a Ed). Barcelona: Debate, 2005, p. 134

105. "¿Acaso el Sol y las estrellas fijas no son inmensas Tierras vehementemente calientes, cuyo calor se conserva por la magnitud de sus cuerpos y por la mutua acción y reacción entre ellos, así como por la luz que emiten y por el hecho de que sus partes no pueden disiparse en humo (...) por el peso y densidad de las atmósferas que gravitan sobre ellas, comprimiéndolas con gran fuerza y condensando los vapores y exhalaciones que surgen de ellas? (...) Ese mismo peso puede impedir que el globo solar disminuya, exceptuando la emisión de luz." *Óptica, Libro III, Parte I, Cuestión 11. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, p. 29*

106. Citado en WHEELER, John Archibald: *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. 221*

107. Citado en WHEELER, John Archibald: *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. 222*

108. *Sobre la gravedad y la luz en los agujeros negros, ver apartado II-4.3. Hacia una teoría unificada de la luz y la gravedad.*

109. *Sobre la curvatura de la luz debida a la gravedad en la física einsteniana, ver apartado II-4.2.2. La gravitación de la luz en la relatividad general.*

110. COOK, A. H.; *Experiments on gravitation. En HAWKING, Stephen (ed); WERNER, Israel (ed): 300 Years of Gravitation (1st paperback edition, with corrections). Cambridge: Cambridge University Press, 1989.*

En 1783 John Michell (1724-1793) realiza un cálculo, basado en la gravedad newtoniana, en el que demuestra que un cuerpo celeste lo suficientemente grande podría llegar a ejercer una atracción tan poderosa que "toda la luz emitida desde tal cuerpo debería de volver a él"¹⁰⁶. Sin ser conocedor de los cálculos de Michell, años más tarde Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) llega a la misma conclusión y publica sus resultados en su *Exposition du Systeme du Monde* (Exposición del Sistema del Mundo, 1796), donde afirma, además, que "es posible que los cuerpos más luminosos del universo sean invisibles por esta causa"¹⁰⁷. Sin ser conscientes de ello, estos científicos anticipan, en clave newtoniana, lo que hoy se conoce como *agujeros negros*¹⁰⁸.

Por su parte, Henry Cavendish (1731-1810) intuye la curvatura que debería sufrir un rayo de luz por efecto de la gravedad de un cuerpo celeste lo suficientemente grande. Llega incluso a calcular dicha curvatura en 1784, pero no publica sus resultados. De manera independiente, Johann Georg von Soldner (1776-1833) publica en 1804 sus propios cálculos sobre la incurvación de la luz por efecto de la gravedad. También sin saberlo, ambos anticipan, en clave newtoniana, la curvatura de la luz debida a la gravedad que, a principios del siglo XX, servirá para demostrar la validez de la *teoría geométrica de la gravedad* de Albert Einstein¹⁰⁹.

Con la finalidad de medir la densidad media de la Tierra Cavendish utiliza la balanza de torsión, un ingenioso aparato ideado años antes por Michell. El experimento consiste en fijar dos pequeñas esferas a los extremos de una ligera barra horizontal que, a su vez, está suspendida del techo por un fino hilo. Al colocar dos grandes esferas cerca de las esferas pequeñas, la fuerza de atracción entre ellas hace que la barra gire y tuerza el hilo de suspensión hacia una nueva orientación de equilibrio. Cavendish esperaba poder cuantificar la atracción gravitatoria entre las esferas a partir de la medición del ángulo formado por la barra entre su posición inicial y final. A fin de poder medir con mayor precisión este ángulo, Cavendish observa la desviación de un haz luminoso reflejado en un espejo unido a la barra. Es así como se utiliza en 1798 la luz para medir la *Constante de Gravitación Universal (G)*¹¹⁰.

II.4. LA FÍSICA MODERNA DE LOS SIGLOS XIX-XX

La revolución científica del siglo XVII termina con la inestimable contribución de Newton al conocimiento de la naturaleza de la luz, a través de su teoría corpuscular, y a la comprensión de los fenómenos de la gravedad, mediante la ley de gravitación universal. Durante más de un siglo, el prestigio de los postulados newtonianos se mantiene vigente y ambas teorías son comúnmente aceptadas. Sin embargo, esta situación no se dilata demasiado en el tiempo: primero la teoría corpuscular de la luz y luego la ley de gravitación universal, ambas son seriamente cuestionadas y finalmente sustituidas por nuevas ideas sobre la gravedad y la luz que dan lugar al nacimiento de una nueva física.

A lo largo de todo el siglo XIX, nuevas teorías, descubrimientos y experimentos van minando la credibilidad de una teoría corpuscular de la luz cada vez más desacreditada, en favor de una nueva concepción ondulatorio-electromagnética de la luz. Sin embargo, a principios del siglo XX Albert Einstein recupera, en cierto modo, la concepción corpuscular cuando propone que, en ciertas ocasiones, la luz se comporta como si estuviera formada por partículas de energía: nace así la teoría cuántica de la luz. Lo más sorprendente del trabajo de Einstein, no obstante, es el descubrimiento de que la luz es una entidad física de naturaleza dual que, en ciertas ocasiones, se comporta como si estuviera constituida por partículas de energía y que, sin embargo, en circunstancias distintas se comporta como si, efectivamente, se tratase de una onda electromagnética.

A partir de sus reflexiones sobre la naturaleza y la velocidad de la luz, Einstein construye a principios del siglo XX la teoría de la relatividad restringida. Una década más tarde, amplía la teoría con la finalidad de explicar, también, la gravedad. Nace así la teoría de la relatividad general, una nueva y sorprendente comprensión de la naturaleza de la gravedad totalmente desvinculada de la física

newtoniana. La nueva concepción einsteiniana de la gravitación no está basada en fuerzas que actúan a distancia a través de un medio etéreo, sino en la propia estructura geométrica de un espacio curvado por la acción de la masa.

Sin embargo, Einstein no se conforma con los avances logrados gracias a la teoría cuántica y a la teoría de la relatividad general, e intenta unificar en una única teoría los fenómenos de la gravedad y de la luz. Aunque muere sin conseguirlo, deja como legado a los científicos venideros esta difícil labor.

II.4.1. HACIA UNA NUEVA LUZ

A lo largo de la historia las mentes más brillantes han intentado, una vez tras otra, descubrir la naturaleza de la luz. Frente a la dificultad del problema, proliferan gran cantidad de teorías sobre su naturaleza y propiedades, tanto entre los pensadores de la antigüedad clásica como por parte de los científicos del siglo XVII.

Curiosamente, cada nueva teoría de la luz nace acompañada de una particular concepción del universo: Descartes, por ejemplo, construye toda su física en base a su propia noción de la luz⁰¹; Newton, por su parte, no duda en replantear los postulados más fundamentales de su física de la gravitación cuando concibe su nueva teoría de la luz. Y es que, parece ser que en la luz se esconden la mayor parte de los secretos de la física.

A principios del siglo XIX, tras un siglo de luz corpuscular, se inicia la gesta de una nueva y revolucionaria concepción sobre la naturaleza de la luz. La nueva teoría viene acompañada por el descubrimiento de ciertas propiedades y fenómenos de la luz que obligan a reformular por completo nuestra idea física del universo: nacen así la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad.

01. "[El conocimiento de la luz] es una de las más altas y más difíciles materias que jamás pueda acometer; pues toda la Física está allí casi contenida". *Carta de Descartes a Mersenne, del 23 de diciembre de 1630. Citado en FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 166.*

II.4.1.1. El siglo XIX: de la luz corpuscular a la onda electromagnética

Las teorías sobre la naturaleza de la luz de Huygens y de Newton fueron concebidas prácticamente al unísono y, aunque rivalizaron durante un tiempo, se impuso finalmente la concepción corpuscular. No obstante, a pesar de ser más completa y consistente que la ondulatoria, la teoría corpuscular no era capaz de explicar adecuadamente todos los fenómenos de la luz. Consciente de ello, Newton planteó una serie de cuestiones al final de la *Óptica* con la esperanza de que, con el tiempo, sus seguidores pudieran resolverlas⁰². Durante el siglo siguiente la teoría corpuscular quedó estancada y no se produjo avance alguno en ninguna de las cuestiones planteadas.

Sin embargo, a lo largo del siglo XIX se descubren nuevas propiedades de la luz que no pueden ser explicadas en base a la teoría corpuscular, hecho que anima a algunos científicos a buscar teorías alternativas a la de Newton. Así, poco a poco empieza a nacer una nueva teoría de la luz que, con el tiempo, acabaría por obligar a una reformulación total de nuestra concepción física del universo.

II.4.1.1.1. Young y Fresnel: de vuelta a la teoría ondulatoria de la luz

Casi un siglo después de la primera edición de la *Óptica* de Newton, Thomas Young (1773-1829) expone en “On the theory of light and colours” (*Sobre la teoría de la luz y los colores, 1801*) los resultados de sus experimentos sobre el fenómeno de la interferencia de la luz. Con su experimento de la doble rendija⁰³, Young deja al descubierto algunos errores graves de la teoría corpuscular y concluye que el fenómeno de la interferencia sólo puede ser explicado en base a una concepción ondulatoria de la luz. Sin embargo, gracias a la fuerte oposición de los partidarios del corpuscularismo, las conclusiones de Young son obviadas durante las dos décadas siguientes.

No obstante, años más tarde Augustin Jean Fresnel (1788-1827) añade a las investigaciones de Young sobre la interferencia sus



F.01. Thomas Young (1773-1829).
www.istockphoto.com

02. “Puesto que no he dado término a esta parte de mis proyectos, concluiré proponiendo simplemente algunos interrogantes para que otros emprendan ulteriores investigaciones”. *Óptica, Libro III, Parte I. NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz. Madrid: Alaguara, 1977, p. 294*

03. Para más detalles sobre los experimentos de Young, véase LOZANO LEYVA, Manuel: *De Arquímedes a Einstein. Los diez experimentos más bellos de la física (3a Ed)*. Barcelona: Debate, 2005, pp. 139-154



F.02. Augustin Jean Fresnel (1788-1827).
www.scf.usc.edu

propias observaciones sobre los fenómenos de la difracción y la polarización. Publica sus investigaciones en “Mémoire sur la diffraction de la lumiere” (*Memoria sobre la difracción de la luz*, 1826), donde expone, con gran precisión matemática, una nueva teoría ondulatoria de la luz. Hasta el momento, los defensores de la concepción ondulatoria habían postulado que la luz estaba formada por ondas longitudinales, es decir, por ondas que siguen la dirección de propagación de la luz. Sin embargo, la observación del fenómeno de la polarización induce a Fresnel a pensar que las ondas que forman la luz no son longitudinales sino transversales, es decir, que el movimiento de las ondas se produce en el plano perpendicular a la dirección de propagación.

De nuevo, la teoría ondulatoria de Fresnel es objeto de las más airadas críticas de los físicos partidarios del corpuscularismo newtoniano. Sin embargo, gracias a la inestimable ayuda del experimentalista J. F. Dominique Arago (1786-1853), Fresnel demuestra empíricamente que su teoría describe correctamente todos los fenómenos observables de la luz algo que la teoría corpuscular, después de más de un siglo de existencia, no podía afirmar.

Sin embargo, es Jean Bernard Leon Foucault (1819-1868) quien da finalmente el toque de gracia a la teoría corpuscular en 1862 cuando, con la ayuda de Armand Fizeau (1819-1896), mide la velocidad de la luz en el aire y en el agua⁰⁴ con una precisión sin precedentes. Según Newton, la velocidad de la luz dependía del medio en el que se propagase, siendo mayor en los medios más densos. Sin embargo, los resultados de las mediciones realizadas demuestran precisamente lo contrario, pues ponen de relieve que la velocidad de la luz es mayor en el aire que en el agua, siendo el primero el medio menos denso de los dos.

Así es como, a pesar de la resistencia inicial de los partidarios de la teoría corpuscular de Newton, los nuevos descubrimientos a favor de la teoría ondulatoria terminan por lograr, finalmente, su aceptación global.

04. Para más detalles sobre las mediciones de Foucault y Fizeau, véase LOZANO LEYVA, *Manuel: De Arquímedes a Einstein. Los diez experimentos más bellos de la física (3a Ed)*. Barcelona: Debate, 2005, pp. 155-172

II.4.1.1.2. Faraday y Maxwell: la luz como onda electromagnética

Aunque ya en la Grecia clásica se observaron algunos fenómenos vinculados al magnetismo y a la electricidad, el estudio de ambos fenómenos tuvo que esperar varios siglos. Hasta el siglo XVII no se planteó ninguna investigación moderna sobre el magnetismo, y los estudios sobre la electricidad no se llevaron a cabo hasta el siglo XVIII. Durante todo este tiempo a nadie se le ocurrió nunca plantear que entre ambos fenómenos pudiera existir conexión física alguna, de modo que tales investigaciones discurrieron de forma independiente. Sin embargo, durante el siglo XIX algunos científicos intuyeron una posible conexión que, a la postre, conduciría hacia una nueva comprensión de la naturaleza de la luz.

Los primeros pasos hacia esta unificación los dan Oersted (1777-1851) y Ampère (1775-1836) entre 1820 y 1827, al descubrir que una corriente eléctrica genera la aparición de efectos magnéticos en sus inmediaciones. Por su parte, Michael Faraday (1791-1867) evidencia la reciprocidad entre los fenómenos eléctricos y los magnéticos en 1831, cuando publica “Experimental reserarches on electricity” (*Investigaciones experimentales sobre la electricidad, 1831*), donde expone el fenómeno de la *inducción electromagnética* según el cual un imán puede generar una corriente eléctrica. Para intentar comprender la interacción electromagnética, Faraday concibe un nuevo concepto físico, el “campo”, según el cual describe la existencia de “líneas de fuerza” en el espacio circundante a un imán o a un conductor. Para Faraday la acción entre los campos eléctricos y magnéticos no se debe a la acción de *fuerzas a distancia* en sentido newtoniano, sino a la interacción entre las líneas de fuerza que componen dichos campos.

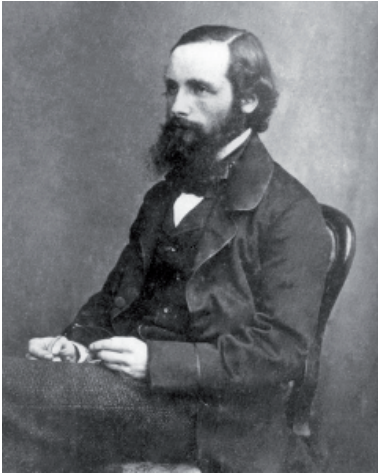
Pero Faraday no se contenta sólo con unificar los fenómenos eléctricos y los magnéticos: intuye, además, una cierta relación entre la luz y el electromagnetismo. Ciertamente, descubre que, en presencia de un campo magnético, el plano de polarización de un rayo de luz varía⁰⁵. Esto le induce a proponer que, en realidad, la luz no se debe a las vibraciones de un medio fluido sutilísimo como sería



F.03. Michael Faraday (1791-1867).
www.britannica.com

05. Ver UDÍAS VALLINA, Agustín: Historia de la física: De Arquímedes a Einstein. Madrid: Síntesis, 2004, p. 215

06. Ver ZAJONC, Arthur: Atrapando la luz. Historia de la luz y de la mente (3a Ed). Barcelona: Andrés Bello, 1996, p. 136



F.04. James Clerk Maxwell (1831-1879).
www.famousscientists.org

el éter, sino a las vibraciones de las líneas de fuerza que forman los campos electromagnéticos⁰⁶.

La formulación matemática de las ideas de Faraday es obra de James Clerk Maxwell (1831-1879), quien en 1865 publica su trabajo "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" (*Teoría dinámica del campo electromagnético*). Aunque en sus investigaciones Maxwell no se interesa en ningún momento por la luz, sus cálculos le llevan a un sorprendente descubrimiento: las ondas electromagnéticas se desplazan a una velocidad muy parecida a la de la luz. Este hecho le induce a plantearse la posibilidad de que la luz sea, en realidad, una forma de onda transversal electromagnética⁰⁷, formada por un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares a la dirección de propagación que se inducen mutua y recíprocamente.

Otra consecuencia importante del trabajo de Maxwell es que, según se desprende de sus cálculos, no sería necesario ningún éter luminífero para garantizar la propagación de las ondas de luz por el espacio⁰⁸. A pesar de ello, Maxwell mantiene su creencia en la necesidad del éter, y durante las dos décadas siguientes la comunidad científica se lanza, infructuosamente, a la investigación de sus nuevas propiedades electromagnéticas.

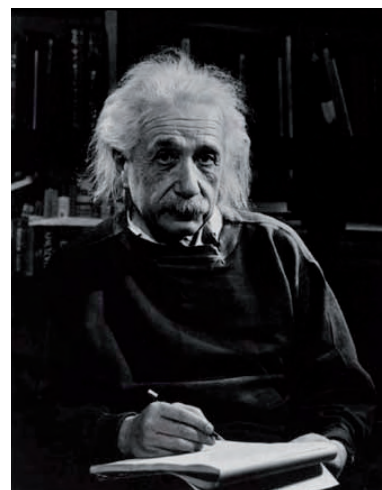
Desde que Aristóteles concibió el éter como un elemento esencial para la comprensión de la naturaleza de la luz, todas las teorías se apoyaron en la posibilidad de su existencia. Sin embargo, a pesar de su importancia crucial para la física, nadie pudo constatar nunca su existencia y, además, la nueva teoría electromagnética obligaba a asignarle unas propiedades elásticas que contradecían la falta de resistencia que debía presentar para preservar el movimiento planetario. Ante tal situación, en 1882 Albert Abraham Michelson (1852-1931) y Edward Williams Morley (1838-1923) se plantean la cuestión de que, en caso de existir realmente el éter, la Tierra debería causar con su movimiento alguna clase de efecto sobre él y, por mínimo que fuera este efecto, la luz lo reflejaría con alguna leve variación en su velocidad. Bajo esta hipótesis, y con unos instrumentos de medida de alta precisión, ambos científicos

07. "Esta velocidad es tan cercana a la de la luz (...) que parece que tenemos razones de peso para concluir que la luz misma (incluyendo el calor radiante y otras radiaciones, en su caso) es una perturbación electromagnética en forma de ondas que se propagan a través del campo electromagnético de acuerdo a las leyes electromagnéticas". Citado en *BAIERLEIN, Ralph: Newton to Einstein, the trail of light. Cambridge, Cambridge University Press, 1992, p. 122*

08. *Las ondas electromagnéticas son capaces de propagarse a través del vacío por sí solas.*

09. Para más información sobre el experimento de Michelson y Morley, ver *BOVA, Ben: Historia de la luz. Madrid: Espasa Calpe, 2004, p. 157-159. También es interesante la descripción del propio experimento y de sus consecuencias que hace Albert Einstein en La teoría de la relatividad General, Parte I, Epígrafe 16: EINSTEIN, Albert: Sobre la teoría de la relatividad especial y general. Madrid: Alianza, 1984, pp. 47-48*

miden la velocidad de la luz en la dirección del movimiento orbital de la Tierra y en su dirección perpendicular, esperando encontrar alguna diferencia de magnitud ⁰⁹. Sin embargo, tras cinco años de experimentos y medidas, obtienen un resultado totalmente inesperado: no se detecta ninguna variación en la velocidad de la luz. Ante la evidencia de las mediciones, Michelson y Morley se ven obligados a admitir dos hechos realmente sorprendentes: por un lado, el éter no existe; y, por otro lado, la velocidad de la Tierra no parece influir en la velocidad de la luz. La comunidad científica al completo queda consternada por estos descubrimientos que, con el paso de los años, inducen a un replanteo de la física en su conjunto.



F.05. Albert Einstein (1879-1955).
www.livephysics.com

Paralelamente a estos asombrosos descubrimientos, durante dos décadas se había intentado en vano demostrar experimentalmente la validez de la hipótesis teórico-matemática de Faraday y Maxwell sobre la naturaleza electromagnética de la luz. Esto lo consigue finalmente Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) en 1888, cuando logra producir, por primera vez, ondas electromagnéticas en un laboratorio. De esta manera, tras casi un siglo de teorías, cálculos y pruebas experimentales, a finales del siglo XIX nadie duda ya de la naturaleza electromagnética de la luz.

II.4.1.2. Albert Einstein: la nueva luz del siglo XX

"¡Durante el resto de mi vida me preguntaré qué es la luz!" ¹⁰

Albert Einstein

Aunque, como hemos visto, a finales del siglo XIX la aceptación de la teoría electromagnética por la comunidad científica era unánime, algunos científicos detectaron que ésta presentaba ciertas dificultades al intentar dar explicación de algunos fenómenos recientemente descubiertos. Uno de estos científicos fue Albert Einstein (1879-1955) quien, en su afán por explicar el fenómeno *fotoeléctrico*, dio en 1905 con una novedosa concepción cuántica de la luz. Además, ese mismo año concibió la *teoría de la relatividad especial*, en la que elevaba la velocidad de propagación de la luz en el vacío a la

10. Citado en ZAJONC, Arthur: *Atrapando la luz. Historia de la luz y de la mente (3a Ed)*. Barcelona: Andrés Bello, 1996, p. 250

11. En 1918 Planck recibe el Premio Nobel en Física "en reconocimiento a su aportación a la Física a través del descubrimiento de los cuantos de energía".

12. Artículo publicado en la revista *Annalen der Physik* 17. p. 132, 1905. Un año después de la publicación de este artículo, Einstein desarrolla sus ideas en otro artículo titulado "*Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption*", (Sobre la teoría de la emisión y absorción de la luz, 1906) en *Annalen der Physik* 20. p. 199, 1906. Para consultar ambos artículos, ver EINSTEIN, Albert; RUIZ DE ELVIRA, Antonio: *Cien años de relatividad: los artículos de Albert Einstein de 1905 y 1906*. Madrid: Nivola, 2004, pp. 45-71 y 189-199 respectivamente.

13. "La teoría ondulatoria de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, se ha revelado adecuada para la representación de los fenómenos puramente ópticos y no será, de hecho, sustituida nunca por otra teoría". *Sobre un punto de vista heurístico concierne a la emisión y transformación de la luz* (Albert Einstein, *Annalen der Physik* 17, 1905). EINSTEIN, Albert; RUIZ DE ELVIRA, Antonio: *Cien años de relatividad: los artículos de Albert Einstein de 1905 y 1906*. Madrid: Nivola, 2004, p. 46.

14. "Me parece a mí ahora, en verdad, que las observaciones sobre la "radiación negra", fotoluminiscencia, la producción de rayos catódicos por luz ultravioleta y otros grupos de fenómenos concernientes a la emisión y transformación de la luz, aparecerán más inteligibles bajo la suposición de que la energía de la luz esté repartida discontinuamente en el espacio. Según la hipótesis que contemplamos aquí, la energía de un rayo de luz que sale de un punto no se reparte de forma continua en un espacio que deviene cada vez más grande, sino que consiste la misma en un número finito de cuantos de energía localizados en puntos en el espacio, los cuales se mueven sin partirse y solo pueden ser absorbidos y generados como un todo". *Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz, 1905. EINSTEIN, Albert; RUIZ DE ELVIRA, Antonio: Cien años de relatividad: los artículos de Albert Einstein de 1905 y 1906. Madrid: Nivola, 2004, p. 47*

"Las reflexiones anteriores no contradicen, según mi opinión, la teoría de la radiación de Planck; más bien me parece mostrar que el Sr. Planck en su teoría de la radiación ha introducido en la física un elemento hipotético nuevo: la hipótesis de los cuantos de luz". *Sobre la teoría de la emisión y absorción de la luz, 1906. EINSTEIN, Albert; RUIZ DE ELVIRA, Antonio: Cien años de relatividad: los artículos de Albert Einstein de 1905 y 1906. Madrid: Nivola, 2004, p. 196*

15. "En la época de Newton no existía el concepto de energía. Los corpúsculos luminosos eran, según Newton, imponderables; cada color conservaba su propio carácter de sustancia. Más adelante, cuando se creó el concepto de energía y se reconoció que la luz transporta energía consigo, nadie pensó en aplicar estos conceptos a la teoría corpuscular de la luz. La teoría de Newton estaba muerta y nadie tomó en serio su resurrección hasta nuestro siglo. Con el objeto de conservar la idea principal de la teoría de Newton, debemos suponer que la luz homogénea está compuesta de granos de energía, y reemplazar los antiguos corpúsculos luminosos por cuantos de luz, que llamaremos *fotoes*, pequeñas porciones de energía que viajan por el espacio vacío con la velocidad de la luz. El renacimiento de la teoría de Newton en esta forma nueva conduce a la *teoría cuántica de la luz*". *EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: La evolución de la física. Barcelona: Salvat, 1986, p. 193*

categoría de *constante universal*, descubriendo con ello una oculta relación entre la energía y la materia.

II.4.1.2.1. La naturaleza cuántica de la luz

En un artículo titulado "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum" (*Sobre la teoría de la ley de la distribución de la energía en un espectro normal, 1900*) Max Karl Ernest Ludwig Planck (1858-1947) publicó una nueva explicación del fenómeno de la radiación emitida por los cuerpos negros, un fenómeno para el que, desde su descubrimiento en 1860 por Kirchhof, no se había encontrado ninguna explicación satisfactoria basada en las leyes del electromagnetismo. Planck descubrió la posibilidad de describir adecuadamente dicho fenómeno suponiendo que la distribución de la radiación no se producía de manera continua, como mantenían los postulados de la física clásica, sino de manera discontinua, en paquetes de energía llamados *cuantos*¹¹.

La importancia del descubrimiento de Planck no pasó inadvertida a un joven y desconocido científico recién titulado llamado Albert Einstein. En 1905, Einstein publica un artículo titulado "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" (*Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz, 1905*)¹² en el que expone una novedosa explicación del efecto fotoeléctrico, un fenómeno descubierto en 1894 por Hertz y que, durante una década, también había esquivado toda explicación teórica basada en el electromagnetismo. Tal como anuncia el título, el interés del artículo no radica tanto en la explicación concreta de dicho fenómeno, sino en la novedosa idea sobre la naturaleza de la luz que Einstein desarrolla para tal fin.

Desde siempre, toda concepción ondulatoria de la luz se había basado en la idea de que ésta se propagaba por el espacio de manera continua y, en este sentido, la teoría electromagnética de Faraday-Maxwell no era una excepción. En su artículo, Einstein acepta esta hipótesis como

válida sólo para la explicación de fenómenos puramente ópticos¹³, pues advierte que ciertos fenómenos concernientes a la emisión y transformación de la luz no pueden hallar una correcta explicación suponiendo continua la propagación de la luz. Así, basándose en el artículo de Planck, Einstein propone que la propagación de la luz no es continua, sino que está también “cuantificada”, es decir, formada por *cuantos* de energía¹⁴. Einstein concibe estos *cuantos de luz*, también llamados *fotones*, como partículas simples que, de algún modo, se han liberado de su masa y se han convertido en una forma de energía que se propaga a la velocidad de la luz. En tanto que considerados partículas, los *fotones* reavivan una cierta noción corpuscular de la luz¹⁵, una idea considerada totalmente obsoleta desde mediados del siglo XIX.

En 1916 Robert Andrews Millikan (1868-1953) comprueba experimentalmente la explicación einsteiniana del fenómeno fotoeléctrico y, en 1923, Arthur Holly Compton (1892-1962) comprueba que ciertos fenómenos relacionados con los rayos-X, sin explicación ondulatorio-electromagnética alguna, pueden ser correctamente descritos atribuyendo a la radiación electromagnética una naturaleza corpuscular, tal como había propuesto Einstein en 1905. La explicación cuántica de la luz es finalmente aceptada y Albert Einstein recibe por ello en 1921 el Premio Nobel en Física¹⁶.

Con su nueva teoría cuántica Einstein no intenta suplantar a la teoría ondulatorio-electromagnética de Maxwell. Más bien al contrario, ambas teorías demuestran ser complementarias, pues los fenómenos que una no es capaz de explicar son perfectamente descritos por la otra, y viceversa¹⁷. Ante esta situación, la luz pasa a ser concebida entonces como una entidad física de naturaleza dual¹⁸ que, en ciertos fenómenos, manifiesta una naturaleza corpuscular, mientras que en otras ocasiones muestra un carácter ondulatorio¹⁹. Con la dualidad ondulatorio-corpúscular de la luz propuesta por Einstein, la clásica distinción entre ondas y corpúsculos se diluye poco a poco. La vieja disputa entre los partidarios de la concepción corpuscular de la luz y los seguidores de la teoría ondulatoria deja así de tener sentido.

16. En 1921 Albert Einstein es galardonado con el Premio Nobel en Física “por sus servicios a la Física Teórica, y especialmente por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico”.

17. “Hay fenómenos que pueden ser explicados por la teoría cuántica y no por la teoría ondulatoria. El efecto fotoeléctrico constituye uno de estos casos, conociéndose otros fenómenos de esta clase. Hay fenómenos que pueden ser explicados por la teoría ondulatoria, pero no por la teoría cuántica. La propiedad de la luz de bordear un obstáculo [la difracción] es un ejemplo típico de éstos últimos. Finalmente, hay fenómenos, tales como la propagación rectilínea de la luz, que pueden ser explicados perfectamente por ambas teorías”. *EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: La evolución de la física. Barcelona: Salvat, 1986, p. 195*

18. Es pertinente señalar que en el estudio de la luz algunos científicos anteriores ya otorgaron a la luz cierta dualidad de estados. Sin embargo, tal como apunta Ferraz Fayos, fue Newton quien introdujo en la descripción de ciertos fenómenos de la luz algunas propiedades típicamente asociadas a las ondas en su teoría corpuscular de la luz: “Se introduce en el sistema newtoniano un marcado carácter periódico, cuyas notas más significativas parecen ser no ya las referencias expresadas a ondulaciones y vibraciones, sino la dualidad de estados”. *FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 311*

19. “Pero, entonces, ¿qué es realmente la luz? ¿Es una onda o una lluvia de fotones? (...) No parece existir la posibilidad de ofrecer una descripción basada en uno solo de los lenguajes. Parece como si debiéramos usar a veces una teoría y a veces otra, mientras que en ocasiones se puede emplear cualquiera de las dos”. *EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: La evolución de la física. Barcelona: Salvat, 1986, p. 195*

Einstein no se contentó con el descubrimiento de los cuantos de luz y durante toda su vida continuó indagando en su naturaleza. Sin embargo, poco a poco fue abandonando la confianza inicial en la óptica cuántica y, finalmente, se desdijo de una teoría que él mismo había contribuido a construir²⁰.

II.4.1.2.2. La velocidad de la luz como constante universal

Desde la antigüedad clásica hasta la segunda mitad del siglo XVII, durante dos milenios, la velocidad de la luz fue objeto de especulación científica. Buena parte de los grandes científicos del siglo XVII se postularon a favor de la instantaneidad de la luz, hasta que en 1676 Ole Roemer estableció experimentalmente que, definitivamente, la luz se propagaba por el espacio con velocidad finita aunque extremadamente rápida²¹.

Sin embargo, con este importante hallazgo la velocidad de la luz no quedó libre de interrogantes. Dos siglos más tarde, en 1887, Michelson y Morley tuvieron que admitir que, en base a los resultados obtenidos en sus experimentos, la velocidad de la luz parecía ser independiente de la velocidad del cuerpo emisor. Este descubrimiento no atentaba solamente contra el sentido común, sino que también entraba en contradicción con el *teorema de adición de velocidades* postulado por la física clásica, según el cual la velocidad de un cuerpo proyectado es la suma de la velocidad en él impresa más la velocidad del cuerpo emisor. El experimento de Michelson-Morley, junto con otros nuevos fenómenos observados, puso en crisis la validez de las leyes de la física clásica newtoniana y se empezó a advertir, entonces, la necesidad de reconsiderar la validez de estas leyes. Fue Jules Henri Poincaré (1854-1912), quien, anticipando la solución, sugirió que *“quizás debiéramos construir una mecánica nueva por completo en la que (...) la velocidad de la luz sería un límite infranqueable”*²².

Desde muy joven Einstein sintió una especial fascinación por los temas relativos a la velocidad de la luz y, con tan sólo 16 años, se planteó el problema de cómo verían un rayo de luz dos observadores

20. “En 1951 [Einstein] declaró: “Cincuenta años de tenaz reflexión no me han bastado para responder a la pregunta ‘¿qué son los cuantos de luz?’ Claro que hoy cualquier pillastre cree conocer la respuesta, pero se engaña”. Hace cuarenta años que advirtió contra la arrogancia de los científicos en lo concerniente a la luz. Los esfuerzos para comprenderla no han menguado desde su muerte, pero la esencia de la luz continúa siendo un enigma”. Ver ZAJONC, Arthur: Atrapando la luz. Historia de la luz y de la mente (3a Ed). Barcelona: Andrés Bello, 1996, p. 272

21. Sobre la velocidad de la luz en el siglo XVII, ver apartado 3.4.1. La luz como onda etérea, en especial la nota 56

22. Citado en STRATHERN, Paul: Einstein y la relatividad. Madrid: Siglo XXI, 1999, p. 56

23. Artículo publicado en la revista Annalen der Physik 17. p. 891, 1905. Ver EINSTEIN, Albert; RUIZ DE ELVIRA, Antonio: Cien años de relatividad: los artículos de Albert Einstein de 1905 y 1906. Madrid: Nivola, 2004, pp. 88-139

24. También llamada teoría de la relatividad restringida. Cabe señalar que no es objeto de interés de este trabajo de investigación la descripción de esta teoría, pues en realidad en ella Einstein no se ocupa de un modo específico del tema de la luz. Sin embargo, sí parece conveniente señalar las reflexiones que Einstein realiza sobre la velocidad de la luz.

25. “Estipulamos, adicionalmente, que, según la experiencia, la magnitud V es una constante universal (la velocidad de la luz en el espacio vacío)”. ¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético?, 1905. EINSTEIN, Albert; RUIZ DE ELVIRA, Antonio: Cien años de relatividad: los artículos de Albert Einstein de 1905 y 1906. Madrid: Nivola, 2004, p. 93

en caso de que uno de ellos se moviera con una velocidad parecida o igual a la de la luz con respecto al otro. Durante años, la física clásica había sido incapaz de encontrar respuesta a esta cuestión.

En 1905 Einstein publica la solución a este problema en un artículo titulado “Zur Elektrodynamik bewegter Körper” (*Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, 1905*)²³, donde expone su célebre *teoría de la relatividad especial*²⁴. En ella, Einstein eleva la velocidad de la luz en el vacío a la categoría de *constante universal*²⁵, de modo que, con independencia de la velocidad del cuerpo emisor o de la velocidad del observador, su valor se mantiene siempre constante. La velocidad de la luz pasa a ser entonces un límite infranqueable (nada puede superar esta velocidad) y la única referencia universal válida para describir las coordenadas espacio-temporales de los fenómenos físicos²⁶.

Poco tiempo después de la publicación de su artículo sobre la relatividad especial, Einstein publica otro artículo, muy breve, titulado “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?” (*¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético?, 1905*)²⁷. En él, deduce una consecuencia realmente sorprendente de su teoría de la relatividad: la masa y la energía parecen no ser dos entidades físicas autónomas, sino más bien dos formas o manifestaciones de una misma realidad, la *masa-energía*²⁸. Así lo expresa Einstein en su ecuación más famosa, $E=mc^2$, en la que la velocidad de la luz en el vacío actúa como factor de conversión entre la masa y la energía, de modo que a una cantidad diminuta de masa le corresponde una cantidad ingente de energía: “*la masa es energía y la energía tiene masa*”²⁹. Gracias a este descubrimiento, los científicos pudieron comprender, de una vez por todas, por qué el Sol, un cuerpo celeste muy masivo, es capaz de irradiar ingentes cantidades de energía en forma de luz y calor durante millones de años sin, prácticamente, consumirse³⁰.

En la teoría einsteiniana, la luz visible puede ser considerada, al mismo tiempo, como una onda de radiación electromagnética y como un cuanto de energía proyectado. En ambos casos, la luz transporta energía y, por tanto, tiene masa³¹.

26. Actualmente se establece la velocidad de la luz en 299.792.458 metros por segundo, aunque suele redondearse a 300.000 m/s. En ciertas ocasiones, la velocidad de la luz se utiliza como medida espacio-temporal: así, la expresión “año luz” indica una longitud equivalente a la distancia que recorrería un fotón desplazándose a la velocidad de la luz durante un año.

27. Artículo publicado en la revista *Annalen der Physik* 18. p. 639, 1905. Ver EINSTEIN, Albert; RUIZ DE ELVIRA, Antonio: Cien años de relatividad: los artículos de Albert Einstein de 1905 y 1906. Madrid: Nivola, 2004, pp. 140-144

28. “Los resultados de una investigación electrodinámica publicada por mí recientemente en estos *Annalen* llevan a una consecuencia muy interesante que se deducirá aquí. (...) Si un cuerpo cede la energía L en forma de radiación, disminuye entonces su masa como (LV2). (...) La masa de un cuerpo es una medida de su contenido de energía; cambia su energía en L, cambia entonces su masa en el mismo sentido en L/9·10²⁰, cuando medimos la energía en ergios y la masa en gramos”. *¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético?, 1905. EINSTEIN, Albert; RUIZ DE ELVIRA, Antonio: Cien años de relatividad: los artículos de Albert Einstein de 1905 y 1906. Madrid: Nivola, 2004, pp. 140-144.*

29. EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: La evolución de la física. Barcelona: Salvat, 1986, p. 183

30. “La radiación, emitida por el Sol y que se propaga por el espacio, contiene energía (...); el Sol y todas las estrellas radiantes pierden masa al emitir su radiación. Esta conclusión, de carácter completamente general, constituye una importante consecución de la teoría de la relatividad”. EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: La evolución de la física. Barcelona: Salvat, 1986, p. 148. Ver también STRATHERN, Paul: Einstein y la relatividad. Madrid: Siglo XXI, 1999, p. 62

31. “Un haz de luz posee energía, y la energía tiene masa”. EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: La evolución de la física. Barcelona: Salvat, 1986, p. 166

II.4.2. ALBERT EINSTEIN: GRAVEDAD, GEOMETRÍA Y ESPACIO

Desde su publicación en 1687, uno de los aspectos más duramente cuestionados de la teoría de la gravedad de Newton fue la noción de *fuerza a distancia a través del vacío*, una idea inconcebible para los mecanicistas cartesianos, cuya física estaba basada en la transmisión de fuerzas naturales por contacto directo entre partículas. Ante estas críticas Newton matizó su idea del vacío absoluto en favor de la existencia de un éter sutilísimo a través del cual creyó poder explicar la aparición de estas fuerzas y, por tanto, la causa eficiente de la gravedad.

Sin embargo, estas explicaciones tampoco acabaron de convencer a una parte importante de los físicos contemporáneos a Newton, y durante las décadas siguientes se intentó encontrar, sin éxito, una explicación mecánica de la causa de la gravedad. Ante tales dificultades y frente al innegable éxito práctico de la teoría, se aceptó finalmente la descripción newtoniana de la gravedad y ésta pasó a ser considerada, en cierto sentido, como una *cualidad oculta* de la materia que, por tanto, no precisaba de ningún tipo de explicación causal³². Desde ese momento los físicos dejaron de investigar las posibles causas de la gravedad y, durante siglo y medio, se centraron en la descripción pormenorizada de los fenómenos físicos a través de la noción de fuerza a distancia, así como en cuestiones relativas al cálculo y a la medición de los fenómenos gravitatorios predichos por la teoría newtoniana³³.

A propósito del estudio del fenómeno electromagnético, se sucedieron una serie de descubrimientos que pusieron en crisis la validez de los postulados newtonianos. A mediados del siglo XIX Faraday describió el fenómeno electromagnético sin necesidad de recurrir a ningún tipo de fuerza a distancia: de esta manera puso de relieve la artificiosidad de un concepto que, al mismo tiempo que parecía fundamental para la gravitación newtoniana, era innecesario para la explicación de otros conceptos físicos. Más adelante, a finales del mismo siglo, Michelson y Morley demostraron experimentalmente la inexistencia del éter, dando al traste con la explicación newtoniana

32. "La búsqueda de una explicación mecánica de la gravedad fue uno de los problemas más difíciles para quienes aceptaban los Principia como paradigma. (...) La única opción aparente era la de rechazar la teoría de Newton debido a que no lograba explicar la gravedad, y también esta alternativa fue adoptada ampliamente. Sin embargo, en última instancia, ninguna de esas opiniones triunfó. Incapaces de practicar la ciencia sin los Principia o de hacer que ese trabajo se ajustara a las normas corpusculares del siglo XVII, los científicos aceptaron gradualmente la idea de que la gravedad, en realidad, era innata. Hacia mediados del siglo XVIII esa interpretación había sido casi universalmente aceptada y el resultado fue una reversión genuina (que no es lo mismo que retroceso) a una norma escolástica. Las atracciones y repulsiones innatas se unían al tamaño, a la forma, a la posición y al movimiento como propiedades primarias, físicamente irreductibles, de la materia". KUHN, Thomas S.: La estructura de las revoluciones científicas. México: Fondo de cultura económica, 2004, pp. 168-169. Como evidencia de la consideración de las leyes naturales como cualidades ocultas durante el siglo XVIII véase el Libro II de El mundo como voluntad y representación de Arthur Schopenhauer (ver apartado I-2.3. Arthur Schopenhauer: luz y gravedad).

33. Ver apartado 3.6 La interacción luz-gravedad después de Newton, donde se exponen los trabajos realizados por Michell, Laplace, Cavendish y Soldner en esta dirección.

de la causa eficiente de la gravedad. Finalmente, a principios del siglo XX, Einstein negó la instantaneidad atribuida hasta entonces a las fuerzas newtonianas pues, según su propia *teoría de la relatividad especial*, ningún fenómeno físico podía superar la velocidad de la luz en el vacío.

Estos descubrimientos sirvieron para cuestionar la validez de los presupuestos fundamentales de la física clásica en conjunto, y de la ley de gravitación universal en particular: la gravedad dejó de comprenderse, por primera vez en dos siglos, como una *fuerza de atracción*. Como alternativa, Einstein se planteó la posibilidad de describir el fenómeno gravitatorio a partir de la noción de *campo* que Faraday y Maxwell habían utilizado para la descripción del fenómeno electromagnético³⁴.

Por otro lado, Einstein estaba también interesado en ampliar el ámbito de aplicación de su *teoría de la relatividad especial* pues, dado que su validez estaba *restringida* a la descripción de fenómenos físicos con movimiento relativo uniforme, parecía necesario contemplar también la descripción de fenómenos físicos con movimiento relativo acelerado.

En 1907 Einstein se percató de que al caer no sentimos nuestro propio peso. Esta observación fue clave para formular el *principio de equivalencia* de la teoría de la relatividad, según el cual la atracción de un campo gravitatorio es experimentalmente indiscernible de un movimiento con aceleración continua y constante. Aunque Benedetti³⁵ relacionó la gravedad con la aceleración en el siglo XVI, tuvo que ser Einstein quien advirtiera, tres siglos y medio más tarde, una relación tan íntima entre ambas cuestiones. A partir de ese momento, intentar ampliar la teoría de la relatividad a los fenómenos con movimiento relativo acelerado fue sinónimo, para Einstein, de concebir una nueva teoría del campo gravitatorio en términos relativistas³⁶.

Einstein trabajó en esta dirección durante una década, hasta que en 1916 expuso su *teoría de la relatividad general* en un extenso artículo titulado “Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie” (*Los fundamentos de la teoría de la relatividad general, 1916*)³⁷.

34. “La introducción inesperada de fuerzas que actúan instantáneamente a distancia para la descripción de las acciones gravitatorias no concuerda con el carácter de la mayoría de los sucesos que conocemos de nuestras experiencias cotidianas”. *EINSTEIN, Albert: Mi visión del mundo (6a Ed). Barcelona: Tusquets, 2006, p. 184.*

“A la pregunta de por qué cae al suelo una piedra levantada y soltada en el aire suele contestarse “*porque es atraída por la Tierra*”. La física moderna formula la respuesta de un modo algo distinto, por la siguiente razón. A través de un estudio más detenido de los fenómenos electromagnéticos se ha llegado a la conclusión de que no existe una acción inmediata a distancia”. *EINSTEIN, Albert: Sobre la teoría de la relatividad especial y general. Madrid: Alianza, 1984, p. 58*

“Como la mayoría de los investigadores de aquella época, intenté determinar una ley de campo para la gravitación, ya que debido a la abolición del concepto de simultaneidad ya no era posible introducir, al menos de manera natural, fuerzas que actuaran inmediatamente a distancia”. *EINSTEIN, Albert: Mi visión del mundo (6a Ed). Barcelona: Tusquets, 2006, p. 160*

35. Ver apartado 3.1.1 El principio del fin de la gravedad aristotélica.

36. “La gravitación es el problema fundamental de esta teoría. La relatividad constituye el primer esfuerzo serio de reforma de la ley de la gravitación desde el tiempo de su descubrimiento por Newton. (...) No sería posible la formulación de una teoría general de la relatividad sin resolver el problema de la gravedad”. *EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: La evolución de la física. Barcelona: Salvat, 1986, p. 176*

37. Artículo publicado en la revista *Annalen der Physik* 49. p. 769, 1916. Ver *EINSTEIN, Albert: La relatividad: memorias originales. Buenos Aires: Emecé, 1950, pp. 115-213*

38. "La teoría de la gravitación de Newton es un caso particular de la relativista. Si las fuerzas de gravitación son relativamente débiles, la antigua teoría newtoniana resulta una buena aproximación a las nuevas leyes de gravitación. Luego, todas las observaciones que confirman la teoría clásica confirman también la teoría relativista. Aún cuando no se pudieran encontrar observaciones adicionales a favor de la teoría relativista, si su explicación fuera sólo tan buena como la anterior, deberíamos decidirnos por ella. (...) No hacen falta hipótesis sobre la dependencia de la fuerza de gravitación respecto de la distancia. Las ecuaciones gravitatorias tienen la forma de leyes de estructura." *EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: La evolución de la física. Barcelona: Salvat, 1986, p. 178*

"En efecto, si se particularizan las ecuaciones de la teoría de la relatividad general al caso de que los campos gravitatorios sean débiles y de que todas las masas se muevan respecto al sistema de coordenadas con velocidades pequeñas comparadas con las de la luz, entonces se obtiene la teoría de Newton como primera aproximación; así pues, esta teoría resulta aquí sin necesidad de sentar ninguna hipótesis especial, mientras que Newton tuvo que introducir como hipótesis la fuerza de atracción inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los puntos materiales que interactúan. Si se aumenta la exactitud del cálculo, aparecen desviaciones respecto a la teoría de Newton, casi todas las cuales son, sin embargo, todavía demasiado pequeñas para ser observables". *EINSTEIN, Albert: Sobre la teoría de la relatividad especial y general. Madrid: Alianza, 1984, p. 90*

39. "De esta manera el espacio-tiempo controla a la masa, diciéndole cómo ha de moverse. De esta manera la masa controla al espacio-tiempo, diciéndole cómo ha de curvarse. Con estas dos sentencias en la mano, sostenemos delante de nosotros en pocas palabras toda la gran teoría geométrica de gravedad de Einstein". *WHEELER, John Archibald: Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. XII*

Las diferencias prácticas de la teoría de la relatividad general de Einstein en relación a la ley de gravitación universal de Newton son escasas y únicamente observables en campos gravitatorios muy fuertes o cuando las masas se mueven con velocidades cercanas a las de la luz. En estos casos, la teoría gravitatoria de Newton se revela insuficiente. A pesar de que formalmente ambas teorías se encuentran a años luz la una de la otra, la teoría de la relatividad general puede entenderse, en cierto modo, como la generalización de la ley de gravitación de newtoniana ³⁸.

II.4.2.1. Los dos principios fundamentales de la relatividad general

Para comprender la concepción de Einstein sobre la naturaleza de la gravedad es fundamental despojarse de la explicación newtoniana de la gravedad como una *fuerza de atracción mutua que actúa sobre las masas a distancia e instantáneamente*. Intentar entender la descripción einsteiniana de la gravedad pensando en términos newtonianos puede inducir a importantes malentendidos.

La concepción einsteiniana de la gravedad descansa sobre dos ideas fundamentales, supeditadas ambas a la existencia de una masa: la curvatura del espacio-tiempo, o cómo *la masa controla al espacio-tiempo diciéndole cómo debe curvarse*, y la flotación libre, o cómo *el espacio-tiempo le dice a la masa cómo debe moverse*³⁹. A continuación desgranaremos el significado de estos dos axiomas, centrando la atención únicamente en aquellos aspectos de la *teoría de la relatividad general* más íntimamente relacionados con la gravedad.

II.4.2.1.1. La curvatura del espacio-tiempo por acción de la masa

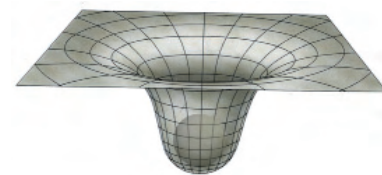
Einstein afirma en su teoría que una gran concentración de masa⁴⁰ produce a su alrededor un *campo gravitatorio*, es decir, una alteración de las propiedades geométricas del espacio ⁴¹ en las inmediaciones de esa misma masa. La gravedad así concebida deja de ser una

fuera física que se transmite a través del espacio y ajena a él⁴². Más bien al contrario, el campo gravitatorio se caracteriza, a diferencia del electromagnético, por su capacidad de modificar las propiedades métricas del espacio circundante⁴³. Éste deja de ser comprendido, entonces, como un recipiente pasivo de los sucesos físicos, y pasa a convertirse en parte activa de los fenómenos. Así pues, gravedad y espacio son, en la teoría de la relatividad general, cuestiones íntimamente relacionadas.

En la relatividad general, describir el fenómeno de la gravedad es sinónimo de describir las propiedades geométricas del espacio bajo la acción de un campo gravitatorio: no en vano, la descripción relativista de la gravitación recibe también el nombre de *teoría geométrica de la gravedad*⁴⁴. Einstein advierte que la gravedad no puede ser descrita correctamente en base al espacio tridimensional plano de la geometría euclidiana⁴⁵.

Como alternativa, plantea la unión de la teoría del *espacio-tiempo cuadrimensional* postulada por Hermann Minkowski (1864-1909) en 1907, con los axiomas de la *geometría curva no euclídea* formulados por Bernhard Riemann (1826-1866) en 1854⁴⁶. A partir de la conjunción de estas dos ideas nace la noción geométrica cuadrimensional de un espacio-tiempo curvo, a través del cual Einstein sí se ve capaz de describir las propiedades geométricas de la materia y del espacio sometidos a la acción de un campo gravitatorio.

En línea con las intuiciones más antiguas de la física, Einstein afirma que la materia tiende a aglomerarse en cuerpos casi esféricos en torno a un centro de gravedad. El espacio-tiempo, en cambio, tiende a curvarse alrededor de la materia siguiendo una curvatura proporcional a la cantidad y a la densidad de la masa que la provoca. La curvatura en las inmediaciones de la masa esférica coincide con un paraboloides de revolución, una figura geométrica obtenida haciendo girar una parábola sobre su eje. La curvatura decrece en el espacio-tiempo a medida que éste se aleja de la masa y, en las regiones libres de toda acción gravitatoria la curva del espacio-tiempo es nula.



F06. Representación de la curvatura del espacio-tiempo por acción de la masa. WHEELER, John Archibald: *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. 132. Imagen modificada por el autor.

40. Nos referimos aquí a la noción de "masa" para simplificar el vocabulario y facilitar así la comprensión de la noción de campo. Sin embargo, teniendo en cuenta la identificación entre masa y energía derivada de la relatividad especial (ver apartado 4.1.2.2. La velocidad de la luz como constante universal), sería más correcto utilizar el concepto de "masa-energía" para describir el campo gravitatorio. Aquí este matiz no parece importante, pero sí lo será para la comprensión del fenómeno de los agujeros negros: ver apartado 4.3. Hacia una teoría unificada de la luz y la gravedad.

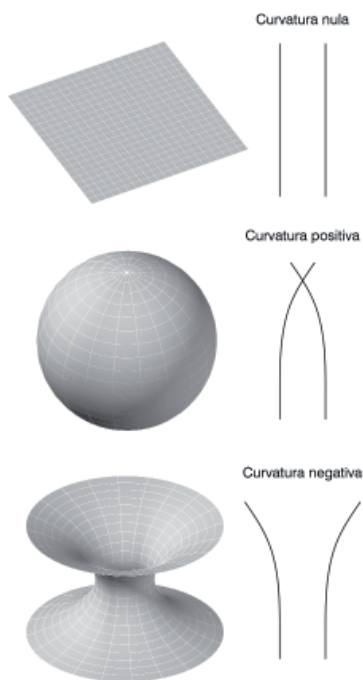
41. WHEELER, John Archibald: *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. XI

42. "Según la teoría de la relatividad general, las propiedades geométricas del espacio no son independientes, sino que vienen condicionadas por la materia". La estructura del espacio según la teoría de la relatividad general, en EINSTEIN, Albert: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza, 1984, p. 98

43. "La gravitación desempeña, pues, conforme a la teoría general de la relatividad, un papel excepcional respecto de las otras fuerzas –en especial de las electromagnéticas– ya que las funciones que representan el campo gravitatorio determinan al mismo tiempo las propiedades métricas del espacio cuadrimensional". *El fundamento de la teoría de la relatividad general, parte A, epígrafe 4*. EINSTEIN, Albert: *La relatividad: memorias originales*. Buenos Aires: Emecé, 1950, p. 134

44. WHEELER, John Archibald: *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. 9

45. "Los teoremas de la geometría euclídea no pueden cumplirse exactamente (...) en un campo gravitacional" EINSTEIN, Albert: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza, 1984, p. 73



F.07. Sistemas geométricos con distinta curvatura: nula, positiva y negativa. Esquema del autor.

46. Se llama geometría euclídeana a aquella que cumple el quinto postulado (conocido como el postulado de las paralelas) del célebre tratado sobre geometría de Euclides, Los Elementos. De este quinto postulado se desprende que, dados una recta y un punto, sólo es posible trazar una única recta paralela a la recta dada que pase por ese punto. Sin embargo, a principios del siglo XIX se descubrieron sistemas geométricos que, a pesar de cumplir con los cuatro primeros postulados de la geometría euclídea, no cumplían el postulado de las paralelas. A estos sistemas geométricos se les llamó no euclídeos. Así, mientras que en el espacio plano euclídeo por un punto exterior a una recta sólo puede trazarse una única recta paralela a la primera, en el espacio curvo no euclídeo se pueden trazar multitud de líneas rectas que nunca se cruzarán con la primera (cuando la curvatura es negativa) o multitud de líneas rectas que se cruzarán con la primera (cuando la curvatura es positiva). Bernhard Riemann fue el primero en plantear la posibilidad, en 1854, de que el espacio no fuese realmente plano sino curvo, y desarrolló el soporte matemático necesario para la concepción de geometrías curvas de más de tres dimensiones.

47. Ver apartado 3.5.1. La gravedad, una fuerza universal.

Así es como, en la relatividad general, *la masa controla al espacio-tiempo diciéndole como debe curvarse*.

II.4.2.1.2. La flotación libre de la materia en el espacio-tiempo curvo

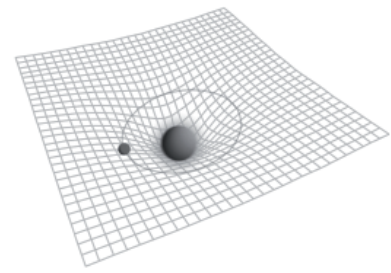
Tal como intuyó Newton a través de su ley de gravitación universal, Einstein advierte que tanto la curvatura de la órbita elíptica de los planetas como la de la trayectoria parabólica de los proyectiles debe ser provocada por un mismo fenómeno físico, la gravedad. Sin embargo, Einstein no explica la curvatura de estas trayectorias mediante la acción de fuerzas a distancia, sino en base a la comprensión conjunta de la curvatura del espacio-tiempo y la noción de *flotación libre*. A partir de estas dos ideas es posible entender que *el espacio-tiempo, curvado por acción de la masa, le dice a la materia cómo debe moverse*.

No obstante, antes de adentrarnos en la explicación einsteiniana del movimiento de la materia a través de su propia idea de flotación libre, es importante hacer algunas reflexiones sobre la idea flotación derivada de la física newtoniana en relación a la gravedad para evitar posibles confusiones. Para Newton, la flotación y la gravedad son cuestiones íntimamente relacionadas, pues un cuerpo sólo puede flotar en el espacio cuando sobre él no actúa ninguna fuerza gravitatoria, o cuando la resultante de las que actúan es cero. Partiendo de esta consideración, cabría plantear que la flotación de los cuerpos en el espacio extraterrestre se debe a la ausencia de gravedad en ese espacio, una idea popularmente extendida que, sin embargo, entra en contradicción con la explicación newtoniana del movimiento planetario, basada en la atracción gravitatoria que ejerce el Sol sobre los planetas a través de ese mismo espacio que acabamos de considerar ingrávico. En el fondo de este equívoco subyace la antigua distinción entre la gravedad *solar* y la gravedad *terrestre*, que Newton intentó unificar a través de su ley de gravitación *universal* ⁴⁷. En base a esta distinción pre-newtoniana la flotación se considera la ausencia de gravedad *terrestre*, o lo que es lo mismo, como la ausencia de *peso*.

Para Einstein, en cambio, el concepto de flotación difiere de la idea newtoniana, pues no depende de la gravedad. Einstein afirma que todo cuerpo tiende a la flotación libre en el espacio-tiempo, tanto en zonas libres de toda gravedad, como en zonas sometidas a la acción de un campo gravitatorio. La contraposición antes apuntada entre la idea de peso y la noción de flotación se conserva en la teoría einsteiniana, aunque con un carácter muy distinto y ajeno a la gravedad. Como veremos, paradójicamente en la teoría einsteiniana de la gravedad la noción de peso aparece, precisamente, cuando le es negado a un cuerpo terrestre su tendencia a la flotación libre. Para Newton, la flotación se da en ausencia de peso; para Einstein, el peso se da en ausencia de flotación.

En la relatividad general, las características del movimiento de flotación libre de un cuerpo vienen determinadas por la región espacio-temporal en el que se produce. En aquellas regiones libres de toda acción gravitatoria, es decir, con curvatura espacio-temporal nula, el movimiento de flotación libre tiene velocidad constante y se produce en línea recta. Por el contrario, en aquellas regiones del espacio-tiempo sometidas a la acción de un campo gravitatorio, es decir, con un grado variable de curvatura, el movimiento de flotación libre es acelerado y puede considerarse que la trayectoria es también “recta”. No obstante, esta última afirmación requiere aclarar que una línea “recta” en un espacio-tiempo curvo no euclidiano es, en realidad, una línea “curva”. En un sistema geométrico curvo, el equivalente a la recta euclídea recibe el nombre de *geodésica*. Y, en la física einsteiniana, la línea geodésica se identifica con la línea de flotación libre en el universo.

Si el espacio-tiempo no estuviera curvado por acción de la gravedad, todo objeto en flotación libre se movería en línea recta y con velocidad uniforme por siempre jamás. La Tierra y los otros planetas no disfrutarían, entonces, de la compañía del Sol, pues cada uno de ellos flotaría siguiendo su propio camino. Análogamente, una vez lanzados los proyectiles seguirían una trayectoria rectilínea y se alejarían sin retorno de la Tierra. Pero si se acepta que el espacio-tiempo está curvado por acción de la gravedad tal y como



F.08. Representación de la órbita de un cuerpo en flotación libre alrededor de una masa en un espacio-tiempo curvo. Esquema del autor.

postula Einstein, se puede comprender que el movimiento de los cuerpos celestes en flotación libre sigue en realidad una trayectoria geodésica “recta” dentro de este espacio curvo. A partir de esta idea es posible comprender que esta trayectoria “recta” es, en realidad, una trayectoria curva cerrada que coincide geoméricamente con la órbita elíptica planetaria descrita por Kepler-Newton.

De manera análoga, Einstein basa la explicación de la trayectoria curva de un proyectil terrestre también en la idea de flotación libre. Según la explicación einsteiniana, el proyectil sigue un movimiento de flotación libre acelerado describiendo una trayectoria “recta” en un espacio-tiempo curvo, de modo que, desde la superficie de la Tierra, esa trayectoria es percibida como una curva parabólica de acuerdo con las observaciones de Galilei⁴⁸. La consecuencia más importante de esta descripción de la trayectoria de un proyectil a partir de la noción de flotación libre es la percatación de que, en realidad, “*caer no es caer, es flotar libremente*”⁴⁹. El concepto de *caída libre*, asociada a un proyectil terrestre, pasa a identificarse con la noción de *flotación libre*, más general.

Sin embargo, a diferencia de la infinitud que puede suponerse al movimiento planetario, el movimiento de un proyectil acaba siendo impedido, siempre, por la corteza terrestre. La superficie de la Tierra impide la satisfacción de este estado natural de flotación libre tanto en los cuerpos que se ven obligados a permanecer sobre ella en reposo, como en los que, al caer, ven su movimiento obstaculizado al impactar sobre la superficie terrestre. En ambos casos, tal como señaló Aristóteles, identificamos este “impedimento” con la noción de *peso*. Sin embargo, Einstein no atribuye el peso a la obstaculización de la tendencia de un cuerpo a moverse hacia su lugar natural⁵⁰, ni tampoco a la fuerza de atracción gravitatoria entre ese cuerpo y la Tierra. Según la teoría einsteiniana “*la fuerza que actúa sobre nuestros pies no es de carácter gravitacional. Su origen está en la física del estado sólido y en la elasticidad de la materia. Simplemente tenemos que eliminar ese suelo, esa elasticidad, esa física del estado sólido para poder alcanzar la condición de flotación libre*”⁵¹. Y, entonces, el peso desaparecerá.

48. Ver apartado 3.1.1. El principio del fin de la gravedad aristotélica.

49. “Einstein fue el primero en vislumbrar cómo podían mezclarse todas estas ideas cuando se dio cuenta de repente en 1908 que caer no es caer, es flotar libremente”. WHEELER, John Archibald: *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. 16

50. Ver apartado 2.1.1. La “gravedad” como tendencia natural de los cuerpos pesados

51. WHEELER, John Archibald: *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. 15

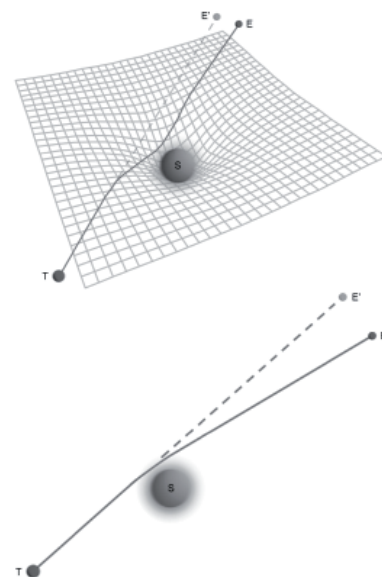
52. “La luz se propaga en línea recta y solamente en línea recta según el sentido de la geometría práctica”. EINSTEIN, Albert: *Mi visión del mundo* (6a Ed). Barcelona: Tusquets, 2006, p. 153

II.4.2.2. La gravitación de la luz en la relatividad general

Desde antiguo la propiedad de la luz de seguir el camino más corto fue considerada una característica fundamental de la luz. Dado que en la geometría plana euclídea la trayectoria más corta se identifica con la línea recta, durante dos milenios se identificó la rectitud de la propagación de la luz como su principal característica físico-geométrica ⁵². Newton, a pesar de convertir la rectitud de los rayos luminosos en uno de los principales argumentos a favor de su teoría corpuscular, introdujo en la descripción de ciertos fenómenos de la luz, como la reflexión o la difracción, ciertas inflexiones o curvaturas en los rayos inducidas por diferencias de densidad en el medio etéreo que provocaban, en las inmediaciones de los cuerpos, la aparición de fuerzas de atracción o repulsión entre éstos y los corpúsculos luminosos ⁵³. Sin embargo, estas fuerzas no eran planteadas como fuerzas gravitatorias. De hecho, Newton no planteó en ningún momento ninguna posible modificación de la trayectoria de los rayos luminosos por acción de la gravedad. Fueron algunos de sus seguidores quienes, décadas más tarde, plantearon la posibilidad de este tipo de interacción lumínico-gravitatoria ⁵⁴.

En 1907 ⁵⁵ Einstein se plantea la posibilidad de que la trayectoria de la luz pueda verse afectada por la acción de la gravedad. En efecto, según la relatividad especial, la luz contiene energía y la energía tiene masa, lo que significa que la luz tiene masa. Einstein llega a la conclusión de que, en tanto que poseedora de masa, la luz debe estar sujeta a la acción de la gravedad y, por tanto, debe curvar su trayectoria en presencia de un fuerte campo gravitatorio ⁵⁶.

La explicación de esta curvatura es análoga a la empleada para describir el movimiento de la materia en un campo gravitatorio. El hecho de que la luz tenga la propiedad de seguir el trayecto más corto significa, traducido a la geometría no euclídea, que se propaga siguiendo las líneas geodésicas del espacio-tiempo. Así, cuando un rayo de luz pasa por una región del espacio-tiempo afectada por la presencia de una gran masa, su trayectoria sigue la curvatura del espacio-tiempo y, por tanto, la luz ve curvada su trayectoria.



F.09. Curvatura de la luz cerca del Sol. Leyenda: S (Sol), T (Tierra), E (posición real de la estrella que emite el rayo de luz), E' (posición aparente de la estrella desde la Tierra tras curvarse la trayectoria del rayo). Esquema del autor.

53. Ver apartado 3.5.2. La luz corpuscular.

54. Ver apartado 3.6 La interacción luz-gravedad después de Newton.

55. Einstein expone sus primeras reflexiones sobre la relación entre la luz y la gravedad en la sección XX "Influencia de la gravitación en procesos electromagnéticos" del artículo "El principio de la relatividad y sus consecuencias", publicado en 1907 en la revista *Radioaktivität und Elektronik*, nº 4, pp. 411-462

56. "Un haz de luz posee energía y la energía tiene masa. Pero toda masa inerte es atraída por un campo gravitatorio ya que la masa inerte y la masa gravitatoria son equivalentes. Un haz luminoso se curvará en un campo gravitatorio exactamente igual que lo haría la trayectoria de un cuerpo lanzado horizontalmente con una velocidad igual a la de la luz". EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: La evolución de la física. Barcelona: Salvat, 1986, p. 166

"Los rayos de luz en el seno de campos gravitatorios se propagan en general según líneas curvas". EINSTEIN, Albert: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza, 1984, p. 67

Ver apartado 3.6 La interacción luz-gravedad después de Newton: a finales del siglo XVIII Cavendish y Soldner intuyeron que la luz debía curvarse por acción de la gravedad y calcularon esta curvatura en base a la física newtoniana.

Sin embargo, postular que la trayectoria de la luz puede curvarse por efecto de la gravedad implica, necesariamente, cuestionar la validez de la ley de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío sobre la que se apoya la teoría de la relatividad especial, pues sólo puede producirse una curvatura en la trayectoria si se produce una modificación en la velocidad. Esta conclusión es fácilmente comprensible si se tiene en cuenta que la teoría de la relatividad especial fue formulada para describir todos los fenómenos físicos sin contar con el fenómeno de la gravitación ⁵⁷.

Además de la exposición teórica sobre la curvatura de la luz debida a la acción de la gravedad, Einstein concluye su artículo sobre la relatividad general de 1916 con un cálculo preciso de la desviación de un rayo de luz cerca del Sol: *“un rayo luminoso que pase cerca del sol sufrirá, según esto, una flexión de 1,7”* ⁵⁸. Sin embargo, para comprobar observacionalmente esta curvatura hubo que esperar al eclipse solar del 29 de mayo de 1919. Arthur Stanley Eddington (1882-1944) tomó numerosas fotos del mismo, y comprobó que, en efecto, había un desplazamiento de la luz de 1,61”, un valor muy cercano al calculado por Einstein. Gracias a ello, se dio por comprobada la teoría de la relatividad general ⁵⁹ y ésta fue unánimemente aceptada por la comunidad científica.

II.4.3. HACIA UNA TEORÍA UNIFICADA DE LA LUZ Y LA GRAVEDAD

“Es verdad que la gravitación se había relacionado con la estructura del espacio, pero aparte del campo gravitacional existe el campo electromagnético. (...) Pero para el espíritu teórico era insoportable que existieran dos estructuras independientes entre sí del espacio, a saber, la métrico-gravitacional y la electromagnética. Uno se siente impulsado al convencimiento de que las dos clases de campos tienen que corresponder a una estructura homogénea del espacio” ⁶⁰. Animado por el éxito de la teoría del campo gravitatorio en la relatividad general, Albert Einstein dedica el resto de su vida a la formulación de una teoría capaz de describir unificadamente el campo electromagnético -la luz- y el campo gravitatorio -la gravedad-.

57. “[La curvatura de la luz] demuestra que, según la teoría de la relatividad general, la tantas veces mencionada ley de constancia de la velocidad de la luz en el vacío -que constituye uno de los supuestos básicos de la teoría de la relatividad especial- no puede aspirar a validez ilimitada, pues los rayos de luz solamente pueden curvarse si la velocidad de propagación de ésta varía con la posición. (...) La teoría de la relatividad especial no puede arrogarse validez en un campo ilimitado; sus resultados sólo son válidos en la medida en que se pueda prescindir de la influencia de los campos gravitatorios sobre los fenómenos (los luminosos, por ejemplo)”. *EINSTEIN, Albert: Sobre la teoría de la relatividad especial y general. Madrid: Alianza, 1984, pp. 68-69*

58. El fundamento de la teoría de la relatividad general, epígrafe 22, “La curvatura de rayos luminosos”. *EINSTEIN, Albert: La relatividad: memorias originales. Buenos Aires: Emecé, 1950, p. 212*

59. *Aparte de la observación de la curvatura de la luz, hubo más pruebas observacionales a favor de la teoría de la relatividad general: una de ellas fue la correcta descripción de la anomalía observada en la órbita de Mercurio, inexplicable para mecánica celeste de Newton. La otra fue la correcta predicción del corrimiento hacia longitudes de onda más largas de la radiación electromagnética en un campo gravitacional muy fuerte.*

60. *EINSTEIN, Albert: Mi visión del mundo (6a Ed). Barcelona: Tusquets, 2006, p. 174*

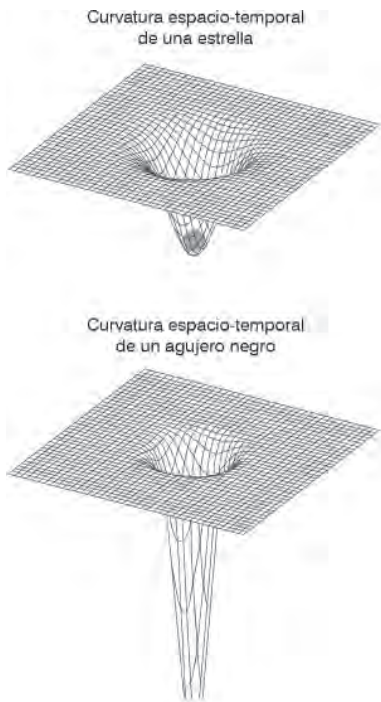
A fin de intentar unificar los fenómenos físicos, Einstein plantea la conjugación de la equivalencia descubierta entre la materia y la energía en la teoría de la relatividad especial, con la dicotomía entre materia y campo derivada de la relatividad general. Así, podría plantearse que, tomando como base la energía, la diferencia existente entre la materia y el campo no sería cualitativa sino cuantitativa: lo que llamamos materia sería una enorme concentración de energía, mientras que lo que llamamos campo supondría una concentración de energía mucho menor. En base a este planteamiento, sería posible construir una física basada únicamente en las nociones de campo y energía pues, lo que ahora es considerado como materia, podría ser descrito como una región del espacio con una gran concentración de energía, es decir, como una región del espacio donde el campo es muy intenso. De esta manera, Einstein concibe la posibilidad de construir una física de la luz y de la gravedad basada únicamente en la noción de campo ⁶¹.

En 1950, a los 71 años y con una frágil salud, Einstein publica sus ideas con el nombre de *Teoría del campo unificado*. Sin embargo, la comunidad científica recibe esta teoría con un incómodo silencio pues, aunque el interés por la unificación de los fenómenos de la luz y de la gravedad es compartido, el planteamiento de Einstein se aparta totalmente de las líneas de investigación más activas y prometedoras de mediados de siglo.

Actualmente existen dos grandes teorías en el ámbito de la física. Una de ellas es, efectivamente, la teoría de la relatividad, una teoría que describe los fenómenos físicos propios del *macrocosmos* y que ofrece una descripción correcta y comprobada del fenómeno de la gravedad. La otra teoría es la mecánica cuántica, que describe con acierto los fenómenos físicos propios del *microcosmos*, como los cuantos de energía que constituyen la luz. Como el ámbito de estudio de ambas teorías es muy distinto, las enormes diferencias formales de las dos teorías nunca fueron consideradas como un problema.

Sin embargo, Stephen Hawking (1942-) descubre que, por su naturaleza singular, el fenómeno de los agujeros negros sí precisa

61. "De la teoría de la relatividad sabemos que la materia representa enormes depósitos de energía y que la energía representa materia. No se puede, por este camino, distinguir cualitativamente entre materia y campo, pues la diferencia entre masa y energía tampoco es cualitativa. La materia es, con mucho, el mayor depósito de energía; pero el campo que envuelve la partícula representa también energía, aunque en una cantidad incomparablemente menor. Por eso se podría decir: la materia es el lugar donde la concentración de energía es muy grande y el campo es donde la concentración de energía es pequeña. Pero si éste es el caso, entonces la diferencia entre materia y campo es sólo cuantitativa. No hay razón, entonces, para considerar la materia y el campo como dos cualidades esencialmente diferentes. (...) ¿No sería factible desechar el concepto de materia y estructurar una física fundamentada sólo en el concepto de campo? (...) Podríamos considerar materia las regiones donde el campo es extremadamente intenso. De esta manera se crearía un nuevo panorama filosófico. Su misión y objetivo último sería la explicación de todos los fenómenos de la naturaleza por medio de leyes estructurales, válidas siempre y en todas partes. Desde este punto de vista, una piedra que cae sería un campo variable en el que los estados de máxima energía se desplazan por el espacio con la velocidad de la piedra. En una física tal no habría lugar para ambos conceptos, materia y campo; este último sería la única realidad. Esta nueva concepción nos es sugerida por el triunfo, sin precedente, de la física del campo, por el éxito alcanzado al expresar las leyes de la electricidad, magnetismo y gravitación en forma de leyes estructurales y, finalmente, por el descubrimiento de la equivalencia entre masa y energía. Nuestro problema último sería modificar las leyes del campo de tal modo que no dejen de valer en las regiones de concentración energética singular. (...) Pero todavía no se ha conseguido formular una física de campos pura". *EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: La evolución de la física. Barcelona: Salvat, 1986, pp. 181-184*



F.10. Curvatura del espacio-tiempo en una estrella y en un agujero negro.
www.skyrock.com

de una unificación de las dos teorías. Un agujero negro se forma por el colapso de una estrella que, a pesar de perder toda su materia, conserva toda su masa. Esta enorme concentración de masa sin materia provoca un campo gravitatorio tan intenso que la velocidad necesaria para escapar de su interior es mayor que la velocidad de la luz. Así, la luz que se adentra demasiado en el campo gravitatorio del agujero es engullida por éste sin posibilidad de escapar ⁶². Ello significa que los agujeros negros no emiten luz y, por tanto, son invisibles (de ahí su nombre).

La paradoja que plantea Hawking es que, como la enorme masa del agujero negro se concentra en una región espacio-temporal minúscula, para una correcta descripción de los agujeros negros es imprescindible la formulación de una teoría que unifique la descripción del macrocosmos y del microcosmos. Durante las últimas décadas se ha hecho un notable trabajo en esta dirección que ha derivado en diversas hipótesis que apuntan hacia una *teoría de la gravedad cuántica*, pero el alcance y el acierto de estas investigaciones está aún por determinar.

62. Ver apartado 3.6 La interacción luz-gravedad después de Newton: a finales del siglo XVIII Michell y Laplace predijeron, basándose en la física newtoniana, la existencia de cuerpos lo suficientemente masivos cuya enorme fuerza de la gravedad impidiera la propagación su propia luz.

II.5. CONCLUSIONES

Aunque la evolución de las distintas teorías sobre la naturaleza de la gravedad y de la luz se ha producido de manera más o menos conjunta a lo largo de la historia, parece conveniente repasar brevemente los principales rasgos evolutivos de sendos fenómenos por separado. Con ello se asegurará una visión global y completa de los aspectos fundamentales de la gravedad y de la luz, gracias a la cual será posible analizar la estrecha relación que se establece entre ambos fenómenos.

II.5.1. Sobre las grandes teorías de la gravedad

La historia de la gravedad es la historia de una idea construida a base de grandes teorías y, también, de grandes crisis. Su desarrollo no puede entenderse tanto como la evolución de una idea a lo largo del tiempo, sino como la sucesión de distintas teorías inconexas y radicalmente distintas a sus predecesoras que, una tras otra, han descrito con más acierto que las anteriores los hechos observados.

Aunque los griegos no conceptualizaron la idea de la gravedad como tal, pues hubo que esperar hasta la época romana para bautizar esa tendencia natural de los cuerpos a caer en vertical con el nombre de gravedad, la identificaron con su manifestación más evidente, el peso y la caída libre, fenómenos que toda teoría sobre la gravitación tuvo que poder explicar. Durante casi dos milenios fue considerada, de acuerdo con los postulados aristotélicos, como una cualidad oculta de la materia que la hacía tender a moverse hacia el centro de la Tierra. A partir de las observaciones realizadas entre finales del siglo XVI y principios del siglo XVII, se asumió la necesidad de concebir una teoría alternativa a la de Aristóteles que se ajustara, con mayor fidelidad, a los fenómenos observados. Descartes planteó como alternativa la idea de que la gravedad era una consecuencia indirecta del desplazamiento de la materia etérea en torno a la Tierra. Sin embargo, a pesar de su gran aceptación la teoría cartesiana tuvo

"La teoría de la gravitación está muy lejos de poder ser considerada un capítulo cerrado en la historia de la ciencia."

*Stephen Hawking*⁰¹

"Ninguna fuerza de la naturaleza se presenta a la humanidad de una forma más directa que la gravedad, ninguna ha atraído hacia su estudio durante siglos a pensadores más grandes y ninguna ha abierto -y continúa abriendo- mayores perspectivas."

*John Archibald Wheeler*⁰²

01. *Stephen Hawking*. HAWKING, Stephen (ed); WERNER, Israel (ed): 300 Years of Gravitation (1st paperback edition, with corrections). Cambridge: Cambridge University Press, 1989, p. XI

02. WHEELER, John Archibald: Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. 3

una vida bastante breve, pues a finales del siglo XVII fue eclipsada por la ley de gravitación universal de Isaac Newton, una teoría basada en la idea, intuitiva ya por algunos científicos anteriores, de que la gravedad era una fuerza de atracción entre la materia. Durante más de doscientos años se aceptó la validez de esta teoría hasta que la observación de nuevos fenómenos obligó a cuestionar sus presupuestos. Finalmente, a principios del siglo XX Albert Einstein planteó la idea de que la gravedad era, en realidad, la manifestación de la curvatura del espacio-tiempo por acción de la masa.

Inicialmente la gravedad fue concebida como un fenómeno exclusivamente terrestre, es decir, que afectaba únicamente a los cuerpos formados por el elemento “tierra” en la Tierra. Sin embargo, con el tiempo se advirtió que no solamente los cuerpos terrestres estaban sometidos a la acción de la gravedad, sino que todos los cuerpos sobre la faz de la Tierra, con independencia de su constitución material, tendían a moverse en mayor o menor grado hacia el centro del planeta. Más adelante se advirtió que la Tierra era un planeta más del sistema solar y que, por tanto, el fenómeno de la gravedad debía darse también en el resto de planetas del sistema solar, cuya constitución era, previsiblemente, similar a la de la Tierra. Finalmente se hizo partícipe también al Sol del fenómeno gravitatorio, y se comprendió que el movimiento de los planetas a su alrededor se debía a la acción de la gravedad. Así pues, la gravedad pasó de ser un fenómeno exclusivamente terrestre, y por tanto vinculado a la noción de peso y vertical, a un fenómeno universal.

Otro aspecto fundamental en la comprensión de la naturaleza de la gravedad fue su relación intrínseca con la aceleración y con la curvatura, dos conceptos íntimamente relacionados. Arquímedes fue el primero en advertir la relación entre la gravedad y la curvatura, al observar que los cuerpos tendían a adoptar la forma esférica en torno a un centro de gravedad masivo. Hasta el siglo XVII, sin embargo, no se relacionó la gravedad con la aceleración, pues Aristóteles no advirtió que un objeto que cae por gravedad no sigue un movimiento con velocidad uniforme, sino con aceleración uniforme. Finalmente se relacionó la trayectoria curva parabólica de un proyectil con la

atracción gravitatoria. Esta percatación abrió la puerta al estudio de otras curvas vinculadas a la acción gravitatoria, como la cicloide y la catenaria, y al cálculo preciso del valor de la aceleración gravitatoria, idéntica para todos los cuerpos en caída libre con independencia de su peso o constitución material. Cuando se comprendió que la gravedad no era un fenómeno únicamente terrestre sino universal, se comprendió que la trayectoria elíptica de los planetas en torno al Sol era causada, también, por la gravedad. Finalmente, a principios del siglo XX se entendió que la gravedad y la aceleración eran dos fenómenos experimentalmente indiscernibles, lo que abrió la puerta a una nueva concepción de la gravedad basada en la curvatura no euclidiana, no ya de las trayectorias de los cuerpos en movimiento a través del espacio, sino del espacio mismo.

II.5.2. Sobre las sucesivas teorías en torno a la luz

A diferencia de la gravedad, la historia de la luz es la historia de una idea en constante evolución. De las primeras reflexiones de los pensadores griegos surgieron distintas concepciones sobre su naturaleza que, de algún modo, han ido desarrollándose a lo largo del tiempo. Como consecuencia de esta amplia variedad de ideas, durante largos periodos de tiempo llegaron a coexistir, en absoluta disputa, teorías sobre la naturaleza de la luz diametralmente contrapuestas. Sin embargo, ninguna de estas teorías llegó nunca a formularse con suficiente solidez, lo que asentó a la reflexión sobre la naturaleza de la luz en un estado de permanente provisionalidad.

Desde los primeros intentos de conceptualización realizados durante la antigüedad clásica, la naturaleza de la luz se intentó explicar recurriendo a la existencia de un hipotético medio material invisible e imperceptible, el éter. De las concepciones helénicas sobre la naturaleza de la luz, la que gozó de una mayor aceptación durante milenio y medio siguiente fue la de Aristóteles, quien consideró la luz como un estado de ese medio diáfano que era el éter: cuando el medio etéreo estaba “en potencia” reinaba la oscuridad, pero cuando estaba “en acto” se hacía la luz. Sin embargo, a finales del siglo XVI

“Entre los estudios de causas y leyes naturales, la luz es lo que más deleita a los estudiosos.”

*Leonardo Da Vinci*⁰³

03. Citado en ZAJONC, Arthur: Atrapando la luz. Historia de la luz y de la mente (3a Ed). Barcelona: Andrés Bello, 1996, p. 98

se reabrió el debate iniciado por los pensadores griegos sobre si la luz debía ser considerada como accidente, sustancia o cuerpo, empleando para ello conceptos de una enorme ambigüedad.

A mediados del siglo XVII Descartes recuperó, en cierto sentido, la idea aristotélica de la luz, identificando su naturaleza con el movimiento o presión de las partículas que constituían el medio etéreo y Huygens enriqueció esta idea con la explicación de la propagación de la sensación luminosa en el espacio por medio de ondas esféricas. Sin embargo, a principios del siglo XVIII Newton recuperó la antigua idea de que la luz estaba formada por diminutos corpúsculos luminosos que, tras ser emitidos por los cuerpos luminosos, eran proyectados a través de un sutilísimo medio etéreo. Los partidarios de ambas teorías se enzarzaron en una longeva disputa que, a pesar de las evidentes inconsistencias conceptuales de sendas concepciones, se saldó con una provisional victoria de la teoría corpuscular.

Sin embargo, a lo largo de la primera mitad del siglo XIX se descubrieron nuevos fenómenos de la luz que la teoría newtoniana no fue capaz de explicar, de modo que se recuperaron los postulados de la teoría ondulatoria. A finales del siglo XIX, y tras dos milenios de teorías basadas en su presencia, se demostró experimentalmente la inexistencia del éter, lo cual puso en entredicho la teoría ondulatoria, pues toda onda precisaba de un sustrato material para su propagación. Pero gracias a los nuevos descubrimientos sobre el electromagnetismo de Faraday y Maxwell se descubrió que la luz era una onda electromagnética que, por tanto, no precisaba de la existencia de ningún medio etéreo para su transmisión. No obstante, una vez más, a principios del siglo XX se descubrieron nuevos fenómenos que la teoría electromagnética se vio incapaz de explicar.

Como solución, Einstein propuso una nueva manera de comprender la naturaleza de la luz basada en la dualidad ondulatorio-corpúscular, según la cual la luz se comportaba en ciertas ocasiones como una onda electromagnética, mientras que en otras ocasiones, lo hacía como un cuanto de luz, es decir, como una partícula de energía.

Por muy distintos que fueran sus planteamientos, prácticamente todas las teorías han reconocido la rectitud en la propagación de la luz como su principal característica geométrico-física. No obstante, cabe mencionar que, por sorprendente que pueda parecer, algunas teorías no consideraron el rayo de luz como una entidad física real, sino como una construcción geométrico-conceptual inventada para poder analizar con exactitud los fenómenos de la luz ⁰⁴. Por otra parte, durante milenio y medio se pensó que la luz se propagaba por el espacio de manera instantánea. Sin embargo, a finales del siglo XVII se demostró que, aunque su velocidad fuera rapidísima, la propagación de la luz sí requería de tiempo. Más adelante se constató que, aunque fuera uniforme, esta velocidad variaba con el medio de propagación, estableciendo a principios del siglo XX la velocidad de la luz en el vacío como una constante universal infranqueable. Así pues, durante más de dos milenios, a lo largo de los cuales se sucedieron múltiples teorías de naturaleza muy diversa, la luz fue considerada siempre como un fenómeno de propagación rectilínea con velocidad uniforme.

Sin embargo, durante el siglo XVIII algunos físicos, como Newton, Cavendish o Soldner, intuyeron la posibilidad de que, en ciertas circunstancias, la luz pudiera curvar su trayectoria. Einstein también contempló esta posibilidad y advirtió que ello supondría una cierta aceleración en el movimiento de la luz, con lo que, además perder su rectitud, la luz perdería también su velocidad de propagación constante. Estas hipótesis fueron finalmente confirmadas por la observación.

Las teorías que no consideraron la luz como una actualización o movimiento del medio etéreo se plantearon el problema de la materialidad de la luz y, con ello, de relación recíproca entre la luz y la materia. Aunque algunas teorías anteriores intuyeron la reciprocidad entre materia y luz, no fue hasta Newton que se planteó abiertamente que la luz podía convertirse en materia y la materia en luz. Tres siglos más tarde Einstein formuló matemáticamente esta idea a través de su célebre fórmula $E=mc^2$, en la que la materia y la energía eran representadas como dos formas de una misma realidad.

04. En el siglo IX, al-Kindi (801-866) convirtió el euclídeo como visual emitido por el ojo en una pirámide de luz enviada por los objetos visibles y recibida por el cristalino. Siglo y medio más tarde, en su tratado "Kitab al-manazir" -traducido posteriormente al latín con el título "De aspectibus" (Sobre la visión)- Alhazen (965-1039) liquidó definitivamente la noción de "rayo visual", sustituyéndola por la de "rayo de luz". Según Alhazen todos los puntos de los cuerpos visibles emiten rayos de luz en todas direcciones, pero sólo los que inciden perpendicularmente en el cristalino ocular son visualmente efectivos. No obstante, admitía el propio autor que las nociones geométricas de "rayo de luz" y "pirámide perspectiva" eran nociones imaginarias que, aunque útiles para la comprensión del comportamiento de la luz, no se correspondían con su realidad física y, por tanto, no aportaban ninguna información sobre su verdadera naturaleza. Hubo que esperar hasta la teoría corpuscular de Newton para que el "rayo de luz" fuera considerado unívocamente como una entidad física real.

II.5.3. Las teorías unificadas sobre la gravedad y la luz

Aunque de maneras distintas, los mayores físicos de la historia han intentado concebir la naturaleza de la gravedad y de la luz de forma conjunta y englobada dentro de un sistema físico-teórico propio. A lo largo de la historia, todo gran físico se ha visto obligado a elaborar las teorías con que ha intentado describir la naturaleza y los fenómenos de la gravedad y de la luz de un modo coherente, a fin de conformar una representación del cosmos congruente con sus propios fundamentos.

Aristóteles concibe un universo cuyo centro coincide con el de la Tierra y en el que a los distintos elementos les corresponde un lugar natural. El lugar natural de los elementos graves está situado en el centro del cosmos y los elementos más ligeros van ocupando esferas concéntricas. El más pesado de los elementos es la tierra, seguida del agua, el aire, el fuego y finalmente el éter. Aristóteles combina esta particular visión del mundo con la idea de que todo fenómeno físico debe poder ser explicado a partir de la noción de movimiento, entendido éste como el paso de la potencia al acto, distinguiendo dos tipos: el movimiento de alteración, cuando lo modificado es la cualidad de una sustancia, y el movimiento de desplazamiento, cuando lo que se modifica es el lugar. A partir de estas ideas, Aristóteles concibe la luz como un movimiento de alteración del medio diáfano, el éter, y la gravedad como un movimiento de desplazamiento provocado por la tendencia natural de los cuerpos graves a ocupar su lugar natural, es decir, a desplazarse hacia el centro de la Tierra, fenómeno directamente relacionado con nuestra idea de peso y caída libre.

Para Johannes Kepler la luz y la gravedad son también fenómenos de una naturaleza similar. Ambos son virtudes incorpóreas que anidan en los cuerpos y que emanan de ellos de manera esférica. La gran diferencia que advierte Kepler entre ambas virtudes es que, mientras que la gravedad tiende a la unión de los cuerpos, la luz se identifica más con la separación, pues en eso consiste precisamente la emanación de la luz en los cuerpos luminosos.

René Descartes, en línea con Aristóteles, concibe su propia idea del cosmos, basada en la negación del vacío y en el hecho de que el movimiento de

rotación de los cuerpos celestes provoca, a su alrededor, la aparición de torbellinos de éter. En el caso de los planetas, el desplazamiento centrífugo de la materia etérea provocado por los vórtices obliga a los cuerpos más pesados a desplazarse hacia el centro del planeta a fin de ocupar el espacio libre dejado por el éter. A este fenómeno se le conoce por gravedad. En el caso de las estrellas, su movimiento de rotación provoca el choque de las partículas ígneas que las constituyen con el éter que llena el universo a su alrededor. Como producto de este choque se produce una vibración o movimiento de las partículas etéreas que identificamos con la luz. Así pues, ambos fenómenos son provocados por los torbellinos etéreos producidos por el movimiento de rotación de los cuerpos celestes que, según su constitución térrea o ígnea, son la causa de la gravedad o de la luz respectivamente.

Isaac Newton basa su física en la concepción corpuscular de la materia y en la noción de fuerza a distancia, cuya aparición es provocada por las diferencias de densidad del medio etéreo en presencia de los cuerpos: la densidad del éter aumenta a medida que se aleja de ellos. La gravedad es concebida como una fuerza de atracción entre masas que viene originada por la presión que el medio etéreo ejerce, allí donde es más denso, sobre los cuerpos. Fruto de esta presión los cuerpos tienden a moverse de las zonas más densas del éter (las más alejadas de los otros cuerpos) a las zonas menos densas (las más cercas a los otros cuerpos). La luz es concebida como diminutos corpúsculos proyectados en línea recta por los cuerpos luminosos cuya trayectoria se ve modificada también por las diferencias de densidad antes descritas en las inmediaciones de los cuerpos. Así pues, Newton explica los fenómenos de la gravedad y de la luz a partir una concepción corpuscular de la materia y de las fuerzas a distancia causadas por las diferencias de densidad del éter.

Albert Einstein formula su teoría de la relatividad especial gracias a sus reflexiones sobre la luz, y al ampliar su ámbito de aplicación en la teoría de la relatividad general, descubre una nueva manera de concebir la gravedad. Einstein concibe la gravedad y la luz a partir de la noción de campo, entendido como una alteración real de las propiedades del espacio alrededor de los cuerpos. Al final de su vida intenta aunar, sin éxito, la descripción del campo gravitatorio y la del electromagnético en una misma teoría.

Las principales vías de investigación planteadas por los físicos en la actualidad se centran en intentar unificar la teoría cuántica (mediante la que se explica el microcosmos, al que pertenece la luz) con la relatividad general (mediante la cual se explica el macrocosmos, al que pertenece la gravedad), a fin de encontrar una teoría capaz de explicar ambos fenómenos al mismo tiempo.

II.5.4. La relación física entre la gravedad y la luz

A pesar de que la luz y la gravedad han sido siempre concebidas como fenómenos que había que describir de manera análoga, los físicos han hallado a lo largo de la historia ciertas contraposiciones ontológicas entre ambos fenómenos, especialmente en la manifestación terrestre de sus fenómenos.

La luz se relaciona con lo ígneo y lo etéreo; la gravedad, con lo térreo y lo telúrico. La luz se asocia con la diafanidad y la transparencia; la gravedad, con la opacidad y la oscuridad. La luz se vincula a la ligereza y la levedad; la gravedad está íntimamente vinculada a la pesantez. La luz se asocia con una idea de separación de la materia; la gravedad, con una idea de unión. A la luz se le supone una cantidad ínfima de materia y de masa; la gravedad se percibe sólo en los cuerpos con grandes concentraciones de materia y de masa. La interacción electromagnética es muy fuerte pero las masas que interactúan son ínfimas; la interacción gravitatoria es muy débil pero las masas que interactúan son enormes⁰⁵. La intensidad de la luz solar en la Tierra es mayor en el ecuador que en los polos; la intensidad de la gravedad en la Tierra es un poco mayor en los polos que en el ecuador⁰⁶. A la luz le corresponde un movimiento rectilíneo con velocidad uniforme; la gravedad está asociada a la aceleración y la curvatura.

Además de todas estas contraposiciones ontológicas de origen físico, que acompañaron a la reflexión sobre naturaleza de la gravedad y de la luz desde tiempos ancestrales, a partir del siglo XVII empezó a plantearse la posibilidad de que en nuestro planeta pudiera existir una interacción directa entre ambos fenómenos.

05. "La influencia gravitacional entre objetos es extremadamente pequeña: es una fuerza que es un 1 seguido de 40 ceros más débil que la fuerza eléctrica entre dos electrones. En la materia, casi todas las fuerzas eléctricas se emplean en mantener a los electrones próximos a los núcleos de sus átomos, creando un fino equilibrio mezcla de masas y menos que se cancelan entre sí. Pero con la gravitación, la única fuerza es la atracción y crece y crece según hay más y más átomos hasta que, al final, cuando obtenemos esas grandes masas ponderables que somos, empezamos a medir los efectos de la gravedad –sobre los planetas, sobre nosotros mismos y así sucesivamente-. (...) La fuerza gravitacional es mucho más débil que cualquiera otra de las interacciones". FEYNMAN, *Richard Phillips*; *Electrodinámica cuántica*. Madrid: Alianza, 1988, p. 147

ficcies, become a perfect Fluid, or a Water. No two contiguous *Minims* yet agree in Unity or Uniformity of Motion. And hitherto seems to be the History of the Creation, or making of the two first Powers, *Matter* and *Motion*, *Body* and *Spirit*, or *Matter* and *Form*.

In the next place follows the Description of the two great Laws of Motion, which constitute the Form and Order of the *universe*, or World. The first is that of *Light*, and the second is that of *Gravity*.

First for that of *Light*, which is the first regular Motion, or Rule of Nature, which is that regular Propagation of Motion, which, as I have formerly explain'd, extends it self instantaneously through the Whole of Matter. We find in the third Verse, *And God said, Let there be Light, and there was Light, and God divided the Light from the Darkness*. Whereby we find, that the first Regulation of Motion was the Principle of *Light*; which seems to signify, that this Propriety of the fluid Matter was then first implanted, by which the similar Parts of it were made fit to propagate the Pulse of *Light* to all imaginable Distance; and this Substance was distinguished from that other Substance, which would not propagate it, which was opaque and dark: For as yet we find neither the *Sun* nor *Stars* were made, nor the *Earth* it self formed but only a Qualification of Matter fit for the performing of those Functions, which were accordingly made distinct, and secondarily implanted: *And God said, Let there be an Expanse, or a Firmament, and let it divide the Waters from the Waters*. This seems to signify the second general and grand Rule of Natural Motion, namely, *Gravity*. For this Expanse or Firmament is said to divide the Waters from the Waters, or one Fluid from another; for so the Word *Maim* seems to signify. And this made all those Fluids which were of a Terrestrial Nature, to congregate or gather together into the Mass of the Earth, or Earths; and the other of a more Celestial Nature, to gather together in the Sun and Stars. And this Expanse or Firmament, which was the extensive Power of Gravitation, was that which caused those Effects. These two Powers seem to constitute the Souls of the greater Bodies of the World, *viz.* the Sun and Stars, and the Planets, both such as move about the Sun, and such as move about any other Central Body: And both these are to be found in every such Body in the World; but in some more, in some less; in some one is predominant, in others the other; but no one without some Degree of both: For as there is none without the Principle of *Gravitation*, so there is none without some degree of *Light*. And though some doe not shew its Effects in producing Light immediately, yet I shall make it probable that it has that Motion blended with others, which hinder it from producing Effects, but yet do not wholly destroy the Principle. And this I shall make the more probable, when I shall shew how both these Powers are but distinct Effects produced by one and the same Power, and that this Power is implanted in every such great Globular Body in the World. I could go on through the whole History delivered in this first Chapter of *Genesis*, but that I only aimed at present to shew, that nothing of what I have hitherto supposed, does any ways disagree with Holy Writ, but rather, that it is perfectly consonant to that, as well as it is to Reason, and the Nature of things themselves.

The two great
Laws of Mo-
tion, Light and
Gravity,
1. Light.

2. Gravity.

F.01. En este fragmento en el que profundiza sobre las leyes del movimiento, Robert Hooke no sólo reconoce la importancia fundamental de la luz y la gravedad, sino que además reconoce que son dos cuestiones íntimamente relacionadas: "A continuación sigue la descripción de las dos grandes Leyes del Movimiento, que constituyen la Forma y el Orden del Mundo. La primera es la de la Luz, y la segunda la de la Gravedad. (...) Y ambas pueden ser encontradas en cada Cuerpo del Mundo: en unos más, en otros menos; en unos una es la predominante, en otros predomina la otra; pero no hay ninguno sin algún Grado de ambos: Así como no hay ninguno sin el Principio de Gravitación, tampoco hay ninguno sin algún grado de Luz": "A Discourse of the Nature of Comets. Read at the Meetings of the Royal Society, soon after Michaelmas 1682", en HOOKE, Robert: WALLER, Richard (ed): *The posthumous works of Robert HOOKE... containing his Cutlerian lectures, and other discourses read at the meetings of the... Royal Society... to these discourses is prefixt the author's life*. London: Sam. Smith & Benj. Walford, 1705, p. 175 (líneas 5-7 y 32-36). Fotografía del autor.

06. Sobre las diferencias en la incidencia de la luz solar en la Tierra ya se escribió a finales del siglo XVI. En su "Theoremata de Lumine et Umbra" (Teoremas de la luz y la sombra, escrito entre 1521 y 1552, publicado póstumamente en 1611) Francesco Maurolico (1494-1575) demuestra que los rayos igualmente inclinados iluminan igualmente y que cuanto más rectos (perpendiculares) son más iluminan, alcanzándose el máximo cuando son perpendiculares a la superficie iluminada. (...) De esto sigue, como corolario, que los rayos solares calentarán diversamente zonas terrestres según sea su inclinación (ver FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 117). Décadas más tarde, Pedro Petit (1598-1670) escribe "De ignis et lucis natura exercitationes ad Is. Vossium" (Sobre la naturaleza del fuego y la luz en las explicaciones presentadas por Is. Vossium, 1664), donde afirma que no son los lugares más próximos al Sol, sino los más expuestos (perpendicularmente) a sus rayos, los que se calientan con más intensidad (ver FERRAZ FAYOS, Antonio: Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton. Madrid: Dossat, 1974, p. 214).

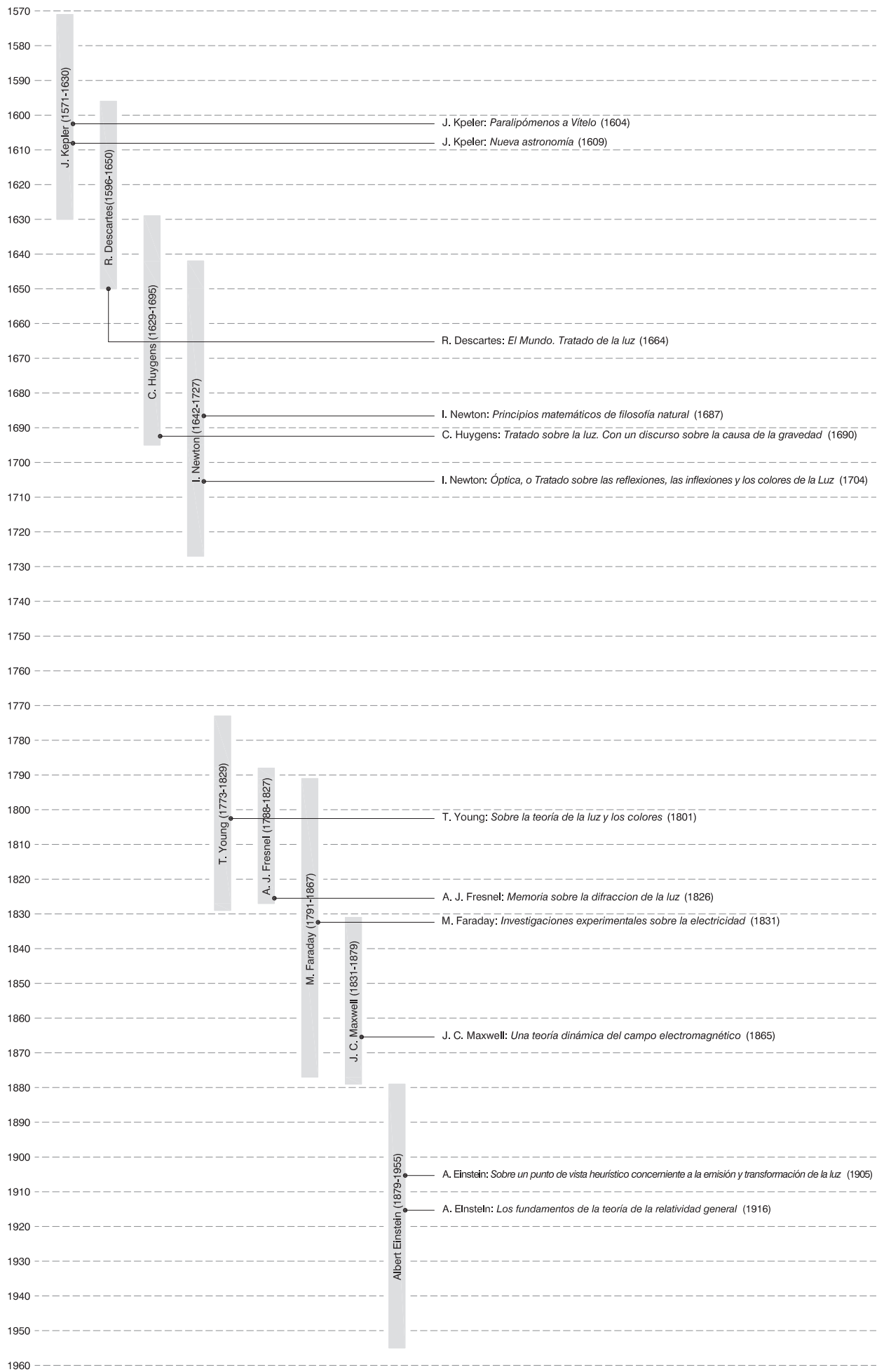
En 1672, Richer (1630-1696) advirtió experimentalmente que la intensidad de la gravedad no era la misma en todas las latitudes terrestres, pues los relojes de péndulo (gracias a los cuales grandes físicos estudiaron la gravedad, como Galilei y Huygens) se movían más lentamente en el ecuador que en Europa. Newton incorpora este dato en sus Principia y lo explica por el achatamiento del globo terrestre debido a su movimiento de rotación.

En la actualidad se sabe que en efecto la intensidad de la luz solar en la Tierra es mayor en el ecuador que en los polos porque sólo en los trópicos pueden los rayos solares incidir perpendicularmente contra la superficie terrestre, mientras que en los polos los rayos inciden de manera tangencial. La intensidad de la gravedad en la Tierra es un poco mayor en los polos que en el ecuador, ya que la fuerza centrífuga que contrarresta la gravitatoria experimentada por los cuerpos es mayor que en el ecuador que en los polos y, además, el achatamiento del globo terrestre por efecto de su rotación disminuye el radio terrestre en los polos y lo aumenta en el ecuador.

Kepler fue el primero en cuestionarse la posibilidad de que la luz pudiera pesar o gravitar, y llegó a la conclusión de que la luz no pesaba. Posteriormente, Descartes se planteó también esta misma cuestión con idéntica respuesta. Estas conclusiones no eran de extrañar si se tiene en cuenta que ambos físicos plantearon la naturaleza de la luz como virtud de los cuerpos o como presión etérea, al margen de cualquier nota de materialidad. Además, desde tiempos muy antiguos se había observado que la trayectoria de la luz, considerada de naturaleza inmaterial, era absolutamente recta y que su propagación no priorizaba ninguna dirección concreta en relación a la Tierra, en contraposición con la trayectoria curva en caída libre observada en el movimiento de los cuerpos por acción de la gravedad.

Con la teoría corpuscular de la luz, formulada por Newton a principios del siglo XVIII, estas consideraciones recibieron algunos matices. Por un lado, la luz fue considerada como una realidad física corpórea y material y, por otro lado, algunos de sus fenómenos (como la reflexión o la difracción) fueron explicados en base a la inflexión, en forma de curvatura, experimentada por los rayos lumínicos por acción de fuerzas de atracción o repulsión sobre los corpúsculos luminosos en las inmediaciones de los cuerpos. Sin embargo, hubo que esperar casi un siglo para que Cavendish y Soldner propusieran que los rayos de luz podían ser desviados de sus trayectorias rectilíneas con una cierta curvatura por acción de una atracción gravitatoria especialmente fuerte. Finalmente fue Einstein quien, a principios del siglo XX, se percató de que en su teoría de la relatividad general la luz, considerada como una entidad física con masa, debía curvarse por efecto de la gravedad de enormes masas como la del Sol. Aunque de manera indirecta, la curvatura de la luz por la gravedad del Sol fue experimentalmente demostrada en 1919.

La historia de la naturaleza física de la luz y de la gravedad se basa en la idea de que ambos fenómenos no deben ser comprendidos como hechos físicos independientes entre sí y sin interacción mutua, sino que más bien al contrario, es necesario formular una concepción del mundo que atienda por igual a la descripción de los fenómenos y a la comprensión de las causas de ambos fenómenos.



III. LA GRAVEDAD Y LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO

III.1. Introducción.....	209
III.1.1. Consideraciones de carácter conceptual.....	213
III.1.2. Estructura y consideraciones de carácter metodológico.....	221
III.2. La resistencia a la gravedad y la oposición a la luz en la estructuración del espacio exterior.....	225
III.2.1. El Stonehenge.....	227
III.2.2. La verticalidad del peso y la caída.....	231
III.2.3. La orientación de la luz solar.....	237
III.2.4. Gravedad y luz como realidades contrapuestas.....	243
III.2.5. La cubrición del espacio como problema gravitatorio.....	249
III.2.6. El nacimiento de la luz estructural.....	253
III.2.7. La resistencia a la gravedad y la oposición a la luz en la estructuración del espacio exterior.....	259
III.3. El encauzamiento de la gravedad y la interiorización de la luz en la estructuración del espacio interior.....	261
III.3.1. El Pantheon de Roma.....	263
III.3.2. La luz y la sombra como secuencia espacial.....	265
III.3.3. La forma de la gravedad clásica.....	279
III.3.3.1. <i>La tectónica de la estructura arquitecónica</i>	283
III.3.3.2. <i>La ligereza inclinada como mecanismo de cubrición espacial</i>	291
III.3.4. El espacio estructurado por la curvatura de la gravedad.....	296
III.3.4.1. <i>Del dintel al arco: la gravedad como necesidad estructural</i>	297
III.3.4.2. <i>La curvatura intrínseca de la gravedad</i>	309
III.3.4.3. <i>La mecánica gravitatoria del espacio estructural</i>	315
III.3.4.4. <i>La tectónica aparente de la estructura</i>	329
III.3.5. La luz como presencia espacial y ausencia gravitatoria.....	346
III.3.5.1. <i>La estructura física de la luz ocular</i>	350
III.3.5.2. <i>La ingravidez de la luz reflejada</i>	357
III.3.6. El encauzamiento de la gravedad y la interiorización de la luz en la estructuración del espacio interior.....	369
III.4. La victoria de la luz sobre la gravedad en la estructuración del espacio interior exteriorizado.....	373
III.4.1. El Palais des Machines de 1889.....	375
III.4.2. La gravedad superada.....	381
III.4.2.1. <i>La gravedad ausente del siglo XIX</i>	384
III.4.2.2. <i>El gran espacio diáfano: más espacio con menos materia</i>	387
III.4.2.3. <i>La forma estructural como optimización de la función portante</i>	393
III.4.2.4. <i>La nueva articulación entre la carga y el soporte</i>	399
III.4.2.5. <i>La ligereza de la línea estructural</i>	405
III.4.3. El descubrimiento de una nueva luz.....	411
III.4.3.1. <i>La luz vitrificada como cerramiento espacial</i>	417
III.4.3.2. <i>De la luz estructural a la luz desestructurada</i>	421
III.4.3.3. <i>El peso de la transparencia</i>	426
III.4.4. La victoria de la luz sobre la gravedad en la estructuración del espacio interior exteriorizado.....	433

III.5. La abstracción de la gravedad y la levedad de la luz en la estructuración del espacio interior en continuidad con el exterior.....	437
III.5.1. La Neue Nationalgalerie de Berlín.....	439
III.5.2. La estructuración del espacio continuo.....	445
III.5.3. La levedad como abstracción de la gravedad.....	467
<i>III.5.3.1. Abstracción y gravedad: entre la física y la arquitectura.....</i>	<i>468</i>
<i>III.5.3.2. La planeidad como abstracción de la forma de cubrición.....</i>	<i>473</i>
<i>III.5.3.3. La levedad como abstracción de la condición del apoyo.....</i>	<i>489</i>
III.5.4. La espacialidad de la luz abstracta.....	506
III.5.5. La abstracción de la gravedad y de la luz en la estructuración del espacio continuo.....	523
III.6. Conclusiones.....	527
III.6.1. La estructuración gravitatoria del espacio.....	530
<i>III.6.1.1. El peso de la primera concepción espacial.....</i>	<i>531</i>
<i>III.6.1.2. La curvatura gravitatoria de la segunda concepción espacial.....</i>	<i>533</i>
<i>III.6.1.3. La ligereza de la tercera concepción espacial.....</i>	<i>535</i>
<i>III.6.1.4. La levedad de la cuarta concepción espacial.....</i>	<i>537</i>
<i>III.6.1.5. La gravedad en la construcción del espacio.....</i>	<i>539</i>
III.6.2. La estructuración lumínica del espacio.....	542
<i>III.6.2.1. La sombra exterior de la primera concepción espacial.....</i>	<i>543</i>
<i>III.6.2.2. La luz interior de la segunda concepción espacial.....</i>	<i>545</i>
<i>III.6.2.3. La ligera luminosidad de la tercera concepción espacial.....</i>	<i>546</i>
<i>III.6.2.4. La abstracción lumínica de la cuarta concepción espacial.....</i>	<i>548</i>
<i>III.6.2.5. La luz en la configuración del espacio.....</i>	<i>549</i>
III.6.3. Hacia la transparencia estructural.....	550

INTRODUCCI'ON

III.1.1. Consideraciones de carácter conceptual

III.1.2. Estructura y consideraciones de carácter metodológico

III.1. INTRODUCCIÓN

“La arquitectura es hermana de la ciencia y se modifica y progresa con ella”.⁰¹

Viollet-le-Duc

Tal como su título indica, la presente investigación doctoral pretende ahondar en la estructuración del espacio por la gravedad y la luz, es decir, en cómo la gravedad y la luz conforman el espacio arquitectónico a través de la estructura.

A fin de eludir la vaguedad y la ambigüedad que en demasiadas ocasiones acompañan al discurso poético, al final de la primera parte de esta investigación se advierte la conveniencia de incorporar a la reflexión teórica arquitectónica sobre ambas cuestiones, el conocimiento elaborado con tanto rigor y durante tiempo desde el ámbito de la física teórica⁰².

En el tratado de arquitectura más antiguo conservado, Vitruvio señala ya la necesidad de que el arquitecto posea profundos conocimientos de astronomía, gnomónica, mecánica u óptica. Wren, por su parte, cultiva por igual su interés por la física y la arquitectura, llegando a ser al mismo tiempo presidente de la Royal Society of London y arquitecto responsable de la reconstrucción de la St. Paul Cathedral. Se puede afirmar casi con toda seguridad que la idea de Arthur Schopenhauer de que la finalidad de la arquitectura es manifestar la luz y la gravedad, proviene de su especial interés por la filosofía natural. Por su parte, las vanguardias artísticas europeas de principios del siglo XX encuentran en los preceptos de la física einsteiniana su principal fuente de inspiración. Incluso los dos arquitectos que han demostrado un mayor interés por la gravedad y la luz en nuestro país, Navarro Baldeweg y Campo Baeza, recurren también al ámbito de la física en sus reflexiones escritas.

Mediante el análisis que aquí se plantea en torno a la influencia de la comprensión física sobre la gravedad y la luz en la concepción



Encuentro entre el arquitecto Le Corbusier y el físico Albert Einstein en Princeton (1946).

⁰¹. Citado en *ANTIGÜEDAD*, María Dolores; AZNAR, Sagrario: El siglo XIX: el cauce de la memoria. Madrid: Istmo, 1998, p. 243

02. "El arte es ciencia espacial por excelencia". *Le Corbusier. "L'Architecture d'Aujourd'hui". Número extraordinario de Abril de 1946, págs. 9-17. Traducción de Marisa Pérez Colina. Citado en GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 175*

"El hombre, producto del universo, integra, desde su punto de vista, el universo, procede de sus leyes y ha creído leerlas; las ha formulado y erigido en un sistema coherente, estado de conocimiento racional sobre el que puede actuar, inventar y producir. Este conocimiento no lo pone en contradicción con el universo, sino que lo pone en armonía; de modo que tiene razón de actuar así: no podría hacerlo de otro modo". *Le Corbusier: La ciudad del futuro. Buenos Aires: Infinito, 1962, p. 20*

"El arte es el lenguaje del espíritu. Crear es la constatación sensorial de la psique y la obediencia a las leyes de la naturaleza". *KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (ed): Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas. Madrid: El Croquis, 2003, pp. 202-203. Observaciones, 1976*

"Creía en las virtudes de la civilización moderna y me empeñaba en contribuir, mediante mis realizaciones, al acendramiento de las tendencias que aparecían. Mi convicción se estimulaba con las innovaciones de la ciencia y de la técnica donde encontraba sugerencias para mis investigaciones arquitectónicas". *Mies van der Rohe. BLASER, Werner: Mies van der Rohe (6a Ed). Barcelona: Gustavo Gili, 1987*

"Nuestra civilización depende en gran medida de la ciencia y de la tecnología; esto es un hecho. Todo el mundo debería darse cuenta. La cuestión es hasta dónde podemos expresarlo". *Mies van der Rohe. PUENTE, Moisés (ed): Conversaciones con Mies van der Rohe: certezas americanas. Barcelona: Gustavo Gili, 2006, p. 34*

"La arquitectura en cuanto arte tiene que apropiarse, como fundamento inmovible de su específica positividad, de esos resultados científicos y tiene que partir de ellos en todas sus empresas de dación de forma; ella les añade –meramente– un modo apariencial estético adecuado, por el cual aquellos elementos científicos –sin perder su naturaleza esencial de conexiones científicamente captadas– se transforman en un nuevo y propio medio homogéneo". *G. Lukács: Estética. Barcelona, Gustavo Gili, 1972, vol. IV, p. 92. Citado en IÑIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p. 22*

del espacio arquitectónico a lo largo de la historia, la presente investigación reivindica la necesidad de recuperar el interés por el conocimiento científico en general y a la física en particular desde el ámbito de la arquitectura⁰³. El arquitecto debe interesarse por la física no por simple erudición, sino desde el convencimiento de que en el conocimiento científico puede encontrar una potente herramienta de proyecto, situada a medio camino entre la intuición artística y la comprensión científica.

Es en este contexto en el que debe encuadrarse el análisis desarrollado en el apartado anterior. La imposibilidad de dar con una explicación definitiva sobre la naturaleza de la gravedad y de la luz ha obligado a centrar el estudio en la evolución de la representación científica de ambas realidades físicas a lo largo de la historia. No obstante, al margen de su valor historiográfico concreto, dicha investigación se ha realizado con el objetivo de construir una base conceptual sólida sobre la que fundamentar el análisis que se pretende realizar en esta tercera parte de la tesis doctoral. Se ha intentado suplir así la carencia de que adolece la formación del arquitecto en el ámbito de la física, especialmente en lo concerniente a la gravedad y a la luz.

En principio totalmente ajeno al ámbito de la arquitectura, y gozando de autonomía y valor propio, el análisis de la evolución del conocimiento físico sobre la gravedad y la luz se descubre decisivo en el desarrollo posterior de la investigación, en tanto que ha permitido percibir ciertas relaciones entre el modo de comprender su naturaleza física y la manera de manipular arquitectónicamente ambos fenómenos. Se descubre así la conveniencia de realizar una investigación de carácter interdisciplinar⁰⁴ sobre la posible influencia que el desarrollo del conocimiento físico sobre la gravedad y la luz ha podido ejercer en la evolución de la noción de espacio en la arquitectura a lo largo de la historia. Sin embargo, es importante advertir que el análisis de esta influencia no es un fin en sí mismo; más bien, se descubre como un modo adecuado e inédito de aproximarse al objeto de estudio de la presente investigación doctoral: *la estructuración del espacio por la gravedad y la luz.*

III.1.1. Consideraciones de carácter conceptual

Antes de iniciar el desarrollo de dicha investigación, conviene realizar algunas consideraciones de carácter conceptual en torno a las cuestiones sobre las que se fundamenta el análisis, a fin de configurar el marco teórico necesario para asegurar la correcta comprensión de la investigación aquí planteada.

La arquitectura se fundamenta en la relación entre la materia y su ausencia, a la que nos referimos como *espacio*. A la materia que, dispuesta de acuerdo a las leyes de la gravedad, construye el espacio, la denominamos *estructura*⁰⁵. Y el carácter de este espacio depende de la interacción entre la materia grave que lo define y la luz que lo revela. Se descubre entonces que no existe ni una sola obra de arquitectura en el mundo que, en su afán por construir el espacio, haya podido eludir la acción de la gravedad terrestre ni haya podido prescindir de los efectos de la luz solar.

Ante la imposibilidad de modificar las propiedades de estas dos realidades primigenias incidiendo en el origen y la causa de su naturaleza física, el arquitecto debe actuar sobre los distintos modos en que éstas se manifiestan sobre la materia. La presente tesis doctoral pretende ahondar en la naturaleza de esta manipulación arquitectónica, centrado su interés en las consecuencias especiales que de ello se derivan, descubriéndose el análisis de la influencia del conocimiento científico de la gravedad y de la luz en la manipulación arquitectónica de sus fenómenos como una adecuada aproximación al tema objeto de estudio.

Tal como se ha demostrado, desde sus inicios la teoría de la arquitectura ha reconocido la importancia fundamental de la gravedad y de la luz en el hecho arquitectónico, incorporando de un modo u otro el conocimiento científico sobre ambas realidades elaborado en cada momento de la historia. Sin embargo, a pesar del interés que ha despertado siempre desde el ámbito de la física, la noción de *espacio* no aparece de un modo explícito y con entidad propia en la reflexión arquitectónica hasta finales del siglo XIX⁰⁶,

03. "Así pues, los arquitectos deben volver a los principios fundamentales, deben estar al día y consultar con los científicos todo lo relativo a los nuevos conocimientos." *KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (ed.): Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas. Madrid: El Croquis, 2003, p. 26. Monumentalidad, 1944.*

"Yo tengo que escuchar, necesito escuchar, porque el germen de muchas cosas está en esa maravillosa ciencia. Es importante escuchar, porque en la física está el germen de muchas fuerzas primigenias del hombre". *KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (ed.): Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas. Madrid: El Croquis, 2003, p. 316. ¿Qué tal lo estoy haciendo, Le Corbusier?, 1972.*

04. "¿Dónde acaba la ciencia, donde empieza el arte, qué es tecnología aplicada, qué pertenece al puro conocimiento? Estos campos se impregnan y fertilizan mutuamente, así como se superponen. Apenas nos interesa hoy dónde se dibuja la frontera entre la ciencia y el arte. Valoramos estos campos no jerárquicamente, sino como emanaciones equivalentes de un mismo impulso superior: LA VIDA! Entender la vida como totalidad, evitar cualquier tipo de división, está entre las más importantes cuestiones de nuestra era." *GIEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 87.*

"Fomentar el fuego cruzado de ideas y la promiscuidad entre las distintas formas de conocimiento (...): habitar la frontera. (...) En este terreno, que no es tierra de nadie o de nada, sino justamente tierra de todo y de todos, hay dos ocupaciones esenciales. Una es proveer ideas allí donde pocos llegan, porque pocos invierten en terreno dudoso o inseguro. La otra es facilitar el paso de las ideas a través de la frontera". *WAGENSBERG, Jorge: Si la naturaleza es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?, y otros quinientos pensamientos sobre la incertidumbre (5a Ed). Barcelona: Tusquets, 2003, p. 93*

"¿Es necesario usar esas metáforas procedentes de otros lados? Creo que sí, son intrínsecas a la creación; por lo menos en mi experiencia. Casi todo lo que sospecho que tiene algún aspecto interesante y que no sé qué es (porque eso ocurre mucho en la creación cuando encuentras algo), precisa una creación metafórica para hablar de ello. Por eso a veces la gente se irrita cuando un artista compara su arte con elementos científicos, y dicen: 'Qué tontería, no tiene nada que ver'. Pero a él le sirve, y tal vez éste sea su único modo de contarlo". *ESPAÑOL, Joaquín (ed): Invitación a la arquitectura: diálogos con Oriol Bohigas, Juan Navarro Baldeweg, Oscar Tusquets, Albert Viaplana y Peter G. Rowe. Cinco reflexiones sobre la arquitectura que nos rodea. Barcelona: RBA, 2002, p. 67*

05. "El concepto de espacio y el carácter ontológico de la estructura son dos polos opuestos que irremisiblemente determinan el ámbito y el alcance del concepto arquitectónico". APARICIO GUIASADO, *Jesús María: El muro. Buenos Aires: Universidad de Palermo, 2000, p. 9*

06. Según Bruno Zevi, la definición espacial de la arquitectura "en sustancia se encuentra también en los tratadistas antiguos", refiriéndose a la funcionalidad práctica del espacio en tanto que firmitas vitruviana. Recoge también las ideas renacentistas que señalan como finalidad de la arquitectura el proporcionar ambientes y cerrar espacios aptos para la vida del ser humano. Afirma también que "el concepto de espacio como factor distintivo de la arquitectura, como motivo de su conformación, está implícito en el pensamiento de Kant, de Hegel, en la teoría dinámica estructural de Schopenhauer...". Pero reconoce que no es hasta el último siglo cuando el problema del espacio lo estudian, con creciente fervor, etnólogos, historiadores, críticos del arte y filósofos. Ver ZEVI, Bruno; MONEO VALLÉS, Rafael (Trad.): *Architettura in nuce; una definición de arquitectura. Madrid: Aguilar, 1969, p. 40*

07. "El espacio físico es a la arquitectura como una tela es a la pintura, un bloque de mármol a la escultura, una hoja de papel y un determinado vocabulario a la poesía". ZEVI, Bruno; MONEO VALLÉS, Rafael (Trad.): *Architettura in nuce; una definición de arquitectura. Madrid: Aguilar, 1969, p. 58*

"Decía Santo Tomás: *Debo vaciar mi alma para que Dios pueda entrar en ella.* El arquitecto-poeta se encuentra en un estado de ánimo análogo, ya que la experiencia histórica prueba que puede prescindir de todo: de la simetría, del equilibrio estático-visual, de la simbología, de los contrastes pintorescos, de las proporciones y de la escala humana, de la geometría elemental, perspectivística o post-euclídea, de la decoración, de la buena ejecución, en resumidas cuentas de toda regla o ley compositiva enunciada teniendo presente el lenguaje de una determinada época y contradicha por otros lenguajes; pero no puede prescindir del espacio, del vacío animado en donde, cuando Dios no penetra, entra y vive el hombre, sufre, se regocija busca su destino". *Ibid.*, p. 78

cuando la estéril polémica sobre la noción de *estilo* induce a algunos teóricos a indagar en la razón de ser de la arquitectura. Es en ese preciso momento de la historia cuando, finalmente, se advierte que lo que de verdad caracteriza a la arquitectura es su intrínseca condición espacial; desde entonces la arquitectura se ha identificado ineludiblemente con la noción de *espacio*⁰⁷.

Sin embargo, a pesar de que desde entonces el quehacer arquitectónico gravita en torno a la idea de espacio, su conceptualización se ha presentado siempre compleja y difícil. Las aproximaciones a la noción de espacio han sido múltiples y variadas, lo cual da muestra de la dificultad de aprehender el significado de la naturaleza espacial de la arquitectura. Es por ello que, sin pretender ahondar en la naturaleza de la noción de espacio arquitectónico, se plantea aquí la necesidad de realizar algunas puntualizaciones de orden conceptual en torno a, con la única finalidad de establecer un marco teórico común sobre el que desarrollar la investigación aquí planteada.

El carácter historiográfico-espacial de la teoría desarrollada por Sigfried Giedion, según la cual la historia de la arquitectura puede interpretarse como una sucesión de distintos modos de concebir el espacio⁰⁸, resulta enormemente sugestiva y adecuada para la presente investigación. Giedion fundamenta su teoría en la idea de que a cada momento de la historia le corresponde una actitud concreta y diferencial con respecto a la idea de espacio⁰⁹. A tal efecto identifica tres actitudes con respecto a la noción de espacio arquitectónico a lo largo de la historia. Lógicamente, cada una de estas etapas abraza un largo periodo de tiempo e incluye estilos arquitectónicos diversos que, a pesar de sus notables diferencias, comparten una actitud análoga frente al espacio: "*Lo propio de la concepción espacial arquitectónica consiste en abarcar un amplio espacio de tiempo, el cual está compuesto a su vez de periodos muy diferentes. (...) Abarca diferencias mucho mayores dentro de su periodo que las demás artes. Varios periodos fuertemente contrastantes coinciden básicamente en su planteamiento el espacio arquitectónico. (...) Desde los comienzos de la arquitectura ha habido solamente dos concepciones espaciales básicas, como*

reconocieron Riegl y Schmarsow. Una tercera concepción que reúne características de ambas pero que, en cierta medida, va más lejos que cualquiera de las dos, se está formando ahora”¹⁰.

Según Giedion durante la primera concepción del espacio la arquitectura se configura a partir de la disposición de volúmenes que irradian espacio a su alrededor: *“La primera etapa abarcó tanto las grandes civilizaciones arcaicas como la evolución griega. Se colocaban objetos escultóricos –volúmenes- en el espacio ilimitado. (...) La primera concepción espacial arquitectónica estaba relacionada con el poder procedente de los volúmenes, sus relaciones mutuas y su interacción”*¹¹.

La segunda concepción del espacio se identifica exclusivamente con la noción de espacio interior: *“Las arquitecturas romana, medieval, renacentista y barroca, pese a todas sus diferencias estilísticas, se ajustan a la misma concepción del espacio. (...) Esta segunda concepción del espacio cargó siempre el acento en el espacio interior, vaciándolo y abriéndolo por medio de ventanas. Desde el Panteón de Roma en adelante hubo una constante elaboración de la forma y la iluminación del espacio interior. La penetración de la luz del sol se expandió continuamente desde los grandes ventanales de las termas romanas hasta los muros cortina de nuestro siglo pasando por las esbeltas ventanas con vidrieras de las catedrales góticas y las escaleras y salones barrocos inundados de luz”*¹².

Giedion señala la época romana imperial en general y la construcción del Pantheon en particular como el momento de inicio de esta segunda concepción espacial que, por medio del problema de la cubrición abovedada, se prolonga a través de distintos estilos arquitectónicos hasta el siglo XVIII: *“La segunda etapa de la evolución arquitectónica se inició en la mitad de la época romana. El espacio interior, y con él todo el problema del abovedamiento, llegó a ser el objetivo principal de la arquitectura. En la concepción espacial de esta segunda etapa, la idea del espacio arquitectónico era casi idéntica a la idea de espacio interior hueco. Desde la Antigüedad tardía en adelante, el espacio hueco –el espacio interior circunscrito- fue el mejor logro*

08. Giedion expone su teoría sobre las concepciones espaciales en tres libros distintos: *Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición* (1941); *El presente eterno: una aportación al tema de la constancia y el cambio*. Vol.1 *Los comienzos del arte*; Vol.2 *Los comienzos de la arquitectura* (1964); y *La arquitectura, fenómeno de transición: las tres edades del espacio en arquitectura* (1969). *Las ediciones consultadas de la bibliografía de Giedion son:*

GIEDION, Sigfried: *Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición* (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, pp. pp. XXVIII-XXIX

GIEDION, Sigfried: *El presente eterno: una aportación al tema de la constancia y el cambio*. Madrid: Alianza, 1981, pp. 490-497

GIEDION, Sigfried: *La arquitectura, fenómeno de transición: las tres edades del espacio en arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 1975, pp. 1-8

09. “En las últimas páginas de *The Beginnings of Architecture* mencionaba yo brevemente las tres concepciones arquitectónicas del espacio, que ejemplificaban uno de los aspectos que las grandes épocas tienen en común: su actitud frente al espacio”. GIEDION, Sigfried: *La arquitectura, fenómeno de transición: las tres edades del espacio en arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 1975, p. 3

10. GIEDION, Sigfried: *El presente eterno: una aportación al tema de la constancia y el cambio*. Madrid: Alianza, 1981, p. 490

11. GIEDION, Sigfried: *El presente eterno: una aportación al tema de la constancia y el cambio*. Madrid: Alianza, 1981, pp. 490-491

12. GIEDION, Sigfried: *La arquitectura, fenómeno de transición: las tres edades del espacio en arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 1975, pp. 4-5

del arte de construir. Las mejores técnicas han sido consagradas al modelado del espacio interior, y en los métodos de abovedamiento la imaginación ha tenido su mayor libertad de expresión. Así, los distintos medios de abovedamiento del espacio interior señalan la evolución de esta etapa de la arquitectura. El Panteón romano, con sus precursores espaciales, señala el comienzo. La segunda concepción espacial abarca el periodo comprendido entre la construcción de las grandes bóvedas romana, tales como las termas, y el final del siglo XVIII. (...) Las bóvedas existían desde los tiempos en que comenzó la arquitectura, pero su capacidad de intensificación de la experiencia religiosa y secular no fue conocida hasta la Roma imperial. (...) La cúpula del panteón de Adriano de comienzos del siglo II, señaló la completa irrupción de la segunda concepción espacial. Desde ese momento el concepto de espacio arquitectónico fue casi indistinguible del concepto de espacio interior hueco. Desde los tiempos romanos, los periodos cambiantes desarrollaron el abovedamiento para expresar sus diferentes necesidades emotivas. (...) En la segunda concepción espacial aparecieron diferencias en la construcción y en el significado del modelado del espacio interior. El contenido simbólico de las cúpulas del Panteón, Hagia Sophia, los edificios del Renacimiento y las cúpulas tardobarrocas de Borromini Guarini y Balthasar Neumann es ampliamente diferente, pero todos están comprendidos dentro de la gran curva de la segunda concepción espacial”¹³.

Giedion señala la importancia del periodo de transición que se produce durante el siglo XIX, entre la segunda y la tercera concepción¹⁴. El desarrollo de las grandes estructuras de hierro y vidrio pone fin a la idea de espacio arquitectónico como espacio interior y supone el inicio de una nueva concepción espacial: *“El que abrió el camino fue el ingeniero, no el arquitecto. Esta evolución se inició con las anónimas construcciones en hierro del siglo XIX y alcanzó su cénit en la última feria mundial importante, la celebrada en París el año 1889, con la erección de la Torre Eiffel y de la enorme “Galerie des Machines”, una estructura de 400 m de longitud y con una luz de más de 106 m cuyas cerchas de acero iban adelgazando progresivamente hasta dar la impresión de que apenas si tocaban*

13. GIEDION. *Sigfried*: El presente eterno: una aportación al tema de la constancia y el cambio. Madrid: Alianza, 1981, pp. 491-493

14. “La tercera fase de la evolución arquitectónica fue prefigurada en los comienzos del siglo XIX. Este siglo actuó como periodo de transición”. GIEDION. *Sigfried*: El presente eterno: una aportación al tema de la constancia y el cambio. Madrid: Alianza, 1981, p. 491

15. GIEDION. *Sigfried*: La arquitectura, fenómeno de transición: las tres edades del espacio en arquitectura. Barcelona: Gustavo Gili, 1975, pp. 6-7

el suelo. Estas dos estructuras resultaban incomprensibles para los arquitectos de la época. Era preciso que primero las interpretaran ojos de artistas (...) [que] encontraron un modo de comunicar el mensaje que comportaba este diseño para la arquitectura por venir: el mensaje de la transparencia y la luz”¹⁵.

La tercera y última concepción espacial de Giedion aúna idea de arquitectura como volumen propia de la primera concepción y la identificación de la arquitectura con el espacio interior de la segunda etapa: *“La tercera concepción espacial contiene elementos tanto de la primera como de la segunda etapas. Ha descubierto de nuevo las propiedades que emanan de los volúmenes en el espacio, sin renunciar al modelado del espacio interior. La integración de estos dos elementos básicos da origen a otros nuevos que presagian una tercera fase de evolución”¹⁶*, en la que se produce *“una interpenetración hasta ahora desconocida de espacio interior y exterior”¹⁷.*

Se constata que Giedion basa su reflexión en la contraposición entre el espacio irradiado por los volúmenes y la noción de espacio interior: a tal efecto distingue una primera concepción del espacio que se identifica con la idea de volumen, que va desde la prehistoria hasta la Grecia clásica; un segundo periodo que se basa en la noción de interior, que nace en época romana y se prolonga hasta el siglo XIX; y una tercera etapa en la que la arquitectura explora al mismo tiempo la noción de volumen y espacio exterior, que justo empieza a desarrollarse durante el siglo XX; aprecia, además, la existencia de un periodo de transición entre la segunda y la tercera concepción, que se desarrolla a lo largo del siglo XIX.

No obstante, la contraposición entre las nociones de *volumen* y *espacio* en que Giedion fundamenta su teoría se descubre un tanto confusa. Si lo que se pretende analizar es la evolución del concepto de “espacio” en arquitectura, parece acertado centrar el análisis en la propia noción de espacio, sin introducir en la reflexión otras cuestiones, tales como la idea de volumen. En este sentido, es posible reinterpretar la teoría formulada por Giedion en base a las consideraciones desarrolladas por Bruno Zevi sobre la identidad del

16. GIEDION, Sigfried: El presente eterno: una aportación al tema de la constancia y el cambio. Madrid: Alianza, 1981, p. 491

17. GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, pp. pp. XXIX

18. “La ‘distinción’ entre espacio ‘interno’, propio de la arquitectura, y espacio ‘externo’, propio de la urbanística, está justificada solo en un provisional terreno didáctico, puesto que el vacío de una plaza o una calle, externo respecto a los edificios que la componen es interno respecto a la ciudad; los edificios hacen las veces de divisorias o de directrices del vacío urbano, como las membranas o los muebles que articulan un ambiente cerrado”. ZEVI, Bruno; MONEO VALLÉS, Rafael (Trad.): Architettura in nuce; una definición de arquitectura. Madrid: Aguilar, 1969, p. 71-73

espacio¹⁸, centrando el análisis en el carácter interior o exterior de cada una de las concepciones espaciales expuestas por Giedion.

Tomando como base la idea de arquitectura como sinónimo de espacio interior con la que Giedion identifica la segunda etapa, la primera puede identificarse con la noción de espacio exterior. Lo que para Giedion es una etapa de transición entre el segundo y el tercer periodo, puede interpretarse como una nueva concepción espacial en la que el espacio interior pierde su identidad al abrirse al exterior. A diferencia de las dos concepciones espaciales previas, en las que se enfatiza la diferencia entre el interior y exterior, en esta tercera etapa, interior y exterior se funden y confunden en una sola entidad espacial. En cambio, en la última concepción, el espacio se abre al exterior sin verse obligado a renunciar a su inherente carácter interior, produciéndose una total interpenetración entre interior y exterior.

Así pues, en base a esta reinterpretación de la teoría de Giedion, para el estudio planteado en esta tercera parte de la investigación se distinguen cuatro -y no tres- concepciones espaciales: 1) la arquitectura como espacio exterior; 2) la arquitectura como espacio interior; 3) la arquitectura como espacio interior exteriorizado y 4) la arquitectura como espacio interior en continuidad con el exterior.

El carácter interior o exterior del espacio puede establecerse en base a la luz que lo cualifica o, hablando con más precisión, en base a la relación que se establece entre la luz y la sombra que lo configura: *“Como a menudo identificamos instintivamente a la luz con su fuente –el sol- y la sombra con su límite –la oscuridad-, suponemos que la luz es un fenómeno de exterior, mientras que la sombra es un fenómeno de interior. Es más cierto lo contrario: sólo en los interiores la luz se materializa y se deja ver; lo que hay fuera son las sombras. La luz tiene presencia y da forma sólo a lo de dentro, mientras que la sombra tiene presencia y da forma sólo a lo de fuera”*¹⁹.

A partir de esta elocuente reflexión se advierte que un espacio será interior cuando se configure a partir de una luz que se manifieste en una sombra previamente construida. Por contra, el exterior será un

19. QUETGLAS, Josep: Sol y sombra, luz y oscuridad, en TORRES TUR, Elías: Luz cenital, Barcelona: Publicacions COAC, 2004, p. 262

espacio de sombra en la luz, es decir, un espacio donde se arrojan sombras sobre un fondo dominado por la luz del sol. Desde un punto de vista lumínico, el espacio interior decimonónico puede asimilarse a un exterior inundado de luz en el que apenas hay cabida para la sombra; interior y exterior se funden y confunden, dando lugar a una suerte de espacio interior exteriorizado. En la concepción moderna del espacio se mantiene la identidad lumínica del espacio interior propio de la segunda etapa, de modo que la luz se manifiesta en una sombra previamente construida. Sin embargo, esta concepción espacial cuenta con la particularidad de que no existe ya un límite físico que separe y segregue a la luz interior de la exterior, haciendo posible una transición totalmente continua entre ambas formas de luz. Este modo de conceptualizar el espacio arquitectónico según su carácter interior y exterior y en base a la luz y la sombra que lo configura deviene una herramienta analítica fundamental en la investigación aquí planteada. No se trata sólo de distinguir lo que es interior y lo que es exterior en términos puramente lumínicos, sino que se deben definir también los términos en que se produce la transición entre ambos extremos lumínico-espaciales.

En base a estas consideraciones, la presente investigación estudia conjuntamente los tres factores que se presumen fundamentales para el nacimiento y el desarrollo de una nueva concepción espacial arquitectónica: la necesidad de satisfacer nuevas demandas de orden espacial, la concepción de una nueva manera de comprender la realidad física del mundo²⁰ y el desarrollo de nuevas posibilidades estructurales y constructivas²¹. Haciendo especial hincapié en los últimos dos factores, el análisis de la naturaleza del espacio arquitectónico se fundamenta en la investigación realizada previamente sobre la evolución de las representaciones científicas de los fenómenos de la gravedad y de la luz.

Se reconoce en la estructura portante el elemento físico capaz de establecer un vínculo común a la forma y la materia que, haciendo interactuar a la gravedad con la luz, hace posible la construcción del espacio arquitectónico²². En términos puramente físicos, la *estructura* tiene la ineludible misión de encauzar y resistir a los

20. "Uno de los signos indicadores del nacimiento de una nueva concepción del espacio y una nueva tradición en medio de la tormenta que supone cualquier punto de ruptura es el resurgimiento de una visión cósmica del mundo, visión que se nos presenta en todas y cada una de las ramas de la ciencia". *GIEDION. Sigfried: La arquitectura, fenómeno de transición: las tres edades del espacio en arquitectura. Barcelona: Gustavo Gili, 1975, p. 324*

21. *Giedion afirma que el uso de nuevos materiales y técnicas constructivas tiene una influencia decisiva en lo que él llama etapas de "transición" entre distintas concepciones, o lo que es lo mismo, en el nacimiento de una nueva concepción espacial.*

22. "La estructura resiste y, a la vez, revela el impacto de la gravedad en su forma, mientras que la luz revela, por así decir, la naturaleza intrínseca de la estructura". *FRAMPTON, Kenneth: Reflexiones sobre la autonomía de la arquitectura: una crítica a la producción contemporánea. Criterios, La Habana, nº 31, enero-junio 1994, pp. 259-267*

"Se descubre entonces, precisa y preciosa coincidencia, que la Luz es la única que de verdad es capaz de vencer, de convencer a la Gravedad. Y así, cuando el arquitecto le pone las trampas adecuadas al Sol, a la Luz, ésta, perforando el espacio conformado por estructuras que, más o menos pesantes, necesitan estar ligadas al suelo para transmitir la primitiva Fuerza de la Gravedad, rompe el hechizo y hace flotar, levitar, volar a ese espacio. Santa Sofía, el Panteón o Ronchamp, son pruebas tangibles de esta portentosa realidad". *CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 57. Architectura sine luce nulla architectura est: Sobre la luz, 1992*

efectos de la gravedad sobre la materia que conforma el hecho constructivo. Con independencia de su naturaleza y finalidad, así como de las fuerzas de la naturaleza que sobre ella actúan, en toda construcción existe siempre una determinada cantidad de materia destinada a hacer frente a las dificultades constructivas que plantea el hecho gravitatorio.

Sin embargo, la estructura *arquitectónica* puede y debe trascender esta primigenia función resistente y, más que una simple estructura *portante*, debe constituirse en una estructura *importante* que contribuya de manera decisiva a la configuración del espacio arquitectónico. La estructura gravitatoria deviene en el elemento material mínimo e ineludible de la arquitectura en tanto que realidad construida y, en este sentido, adquiere ella sola la capacidad de construir el espacio: en su mínima expresión, la arquitectura se reduce a su estructura²³.

En este sentido, la estructura arquitectónica puede definirse como una determinada cantidad de materia que, dispuesta en equilibrio estático, configura un determinado espacio. Cada tipo de espacio requiere de una forma estructural que lo haga posible y, al mismo tiempo, cada tipología estructural hace posible la construcción de un determinado tipo de ámbito espacial. Se descubre entonces que la estructura deviene el vínculo común entre la gravedad y el espacio, pues el modo de ordenar la una afecta al otro y viceversa: *la gravedad construye el espacio*²⁴.

Sin embargo, tal como se ha apuntado anteriormente, el carácter interior o exterior de un espacio viene definido por la relación que se establece entre la luz y sombra que lo configuran. En tanto que materialmente opaca, la estructura se descubre un elemento fundamental en la ordenación de la luz y su opuesto, la sombra. Es por ello que, más allá de su condición de límite físico o elemento portante, la estructura deviene un elemento importantísimo en la cualificación lumínica y visual del espacio arquitectónico.

Cabe recordar, sin embargo, que en el ámbito de la arquitectura

23. "La estructura de la arquitectura es la arquitectura de su estructura". GREGOTTI, Vittorio: Desde el interior de la arquitectura: un ensayo de interpretación. Barcelona: Península, 1993, p. 63

24. "La GRAVEDAD CONSTRUYE EL ESPACIO. Los ELEMENTOS materiales pesantes, que hacen reales las formas que conforman el espacio, tienen que acabar transmitiendo la Gravedad, el peso de su materialidad, a la tierra. El sistema gravitatorio sustentante, la estructura, es la que ordena el espacio, la que lo construye". CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 78. Idea, luz y gravedad, bien temperadas: Sobre las bases de la Arquitectura, 1995

la noción de estructura puede trascender su acepción física para referirse también a la ordenación general de las partes que la conforman. En este sentido, desde un punto de vista abstracto, la idea de estructura hace referencia al modo de ordenar el lleno y el vacío, la materia y el espacio. La estructura deviene así en soporte físico y metafísico del espacio. La noción de estructura no puede limitarse sólo al elemento físico resistente al que normalmente nos referimos, sino que abarca el hecho espacial en su totalidad. Más que restringir su significado a su condición material -como elemento-, cualquier referencia a la noción de estructura debería aludir a su capacidad de estructurar -en cuanto a acción- la relación entre el espacio, la gravedad y la luz, una interacción soportada y ordenada necesariamente por medio de la materia.

Las reflexiones hasta aquí desarrolladas en torno a las nociones de espacio y estructura en arquitectura, conforman el marco teórico sobre el que se fundamenta el análisis sobre la estructuración del espacio por la gravedad y la luz, y la posible influencia del conocimiento científico sobre ambos fenómenos en la condición espacial del quehacer arquitectónico.

III.1.2. Estructura y consideraciones de carácter metodológico

La investigación planteada en esta última parte se ha estructurado en cuatro apartados, que corresponden a las cuatro concepciones espaciales antes apuntadas: el espacio como exterior, el espacio como interior, el espacio como interior exteriorizado y el espacio como interior en continuidad con el exterior.

En aras de una mayor claridad expositiva, el estudio de la relación estructural entre la gravedad y la luz que caracteriza a cada una de estas cuatro concepciones espaciales se acota y vehicula a través del análisis de una obra maestra de la arquitectura que, más allá de sus particularidades concretas, se constituye en ejemplo paradigmático de cada uno de estos modos de entender el espacio arquitectónico.

La obra por medio de la cual se analiza la concepción espacial que identifica a la arquitectura con el espacio exterior es el Stonehenge, una singular construcción prehistórica erigida en Wiltshire entre el 3.000 y el 1.000 a.C. En las piedras que conforman esta impresionante estructura megalítica están ya contenidas aquellas cuestiones fundamentales sobre la relación espacio-estructural entre la gravedad y la luz que se ha prolongado durante varios milenios.

Según Giedion la construcción del Pantheon de Roma en el 118-128 d.C. señala el inicio de la segunda concepción espacial, la que identifica a la arquitectura con el espacio interior. En efecto, en este magnífico e inmenso espacio interior se descubre una nueva manera de comprender la naturaleza de la gravedad que, en conjunción con el uso de una tecnología estructural sin precedentes, inaugura un modo de cubrición espacial en el que la luz se convierte en el elemento esencial de una nueva concepción del espacio arquitectónico. El Pantheon se constituye así en origen y paradigma de una importante serie de cuestiones invariablemente presentes durante los dos milenios que siguen a su construcción.

Giedion reconoce en el Palais des Machines de la Exposición Universal de París de 1889 el punto culminante de la etapa de transición entre la arquitectura como espacio interior y la espacialidad moderna. Esta imponente construcción de hierro y vidrio sintetiza con maestría un siglo de exploraciones arquitectónicas sobre la materia, la luz, la gravedad y el espacio. La ligereza y la luminosidad, hasta entonces cualidades arquitectónicas más utópicas que reales, se convierten en verdaderas propiedades de una arquitectura con más espacio y menos materia. Con sus luces y sus sombras, la enorme nave central del Palais des Machines deviene en paradigma del espacio interior exteriorizado, un espacio con más luz y menos gravedad.

La Neue Nationalgalerie de Berlín (1968), paradigma de la arquitectura moderna, se erige en la obra en la que se centra el análisis de la cuarta concepción espacial. Con la única ayuda de dos planos horizontales se construye un espacio interior en continuidad con el exterior en el que la gravedad se abstrae de la pesantez y la caída

en favor de la levedad y la flotación; la luz solar se convierte en una luminosa claridad abstraída de su dirección natural y su capacidad de generar sombra.

Estas cuatro obras han pasado a la historia de la arquitectura por la grandeza de sus espacios, una grandeza que va más allá de la medida; cualquiera que haya podido visitar estos espacios lo habrá podido comprobar²⁵. Su construcción ha obligado a tensar al máximo la pugna entre la masa y el espacio, razón de ser del problema de la cubrición espacial. Tanto el metro de distancia que cubre el dintel megalítico del Stonehenge erigido hace cinco mil años, como los más de cien metros que cubre la estructura triarticulada de hierro de la nave central del Palais construida hace un siglo, así como los más de cuarenta metros que cubren la cúpula del Pantheon desde hace dos mil años o los casi sesenta y cinco metros de luz que cubre la cubierta plana de acero de la Neue Nationalgalerie, han planteado en un importante reto estructural para las posibilidades constructivas de cada momento histórico.

En la dificultad mecánica que lleva implícita esta ambición espacial radica la unidad espacio-estructural de estas obras. En ellas la forma espacial se identifica plenamente con la forma estructural, hasta el punto que la arquitectura se identifica con su estructura. Al margen de cualquier consideración de orden estético, conceptual o proyectual, esta identificación entre espacio y estructura deviene especialmente útil a la hora de analizar con la mayor claridad posible las implicaciones espaciales de la relación estructural de la gravedad y la luz con fines espaciales. Es por ello que las cuatro obras elegidas para el desarrollo de la investigación comparten una ambición espacial y estructural análoga.

El análisis de la estructuración lumínico-gravitatoria de cada concepción espacial se inicia con una brevísima presentación de los aspectos históricos y proyectuales que, a juicio del autor, caracterizan a cada obra. Se exponen cuestiones que conciernen al contexto histórico en el que se desarrolla el proyecto, al entorno donde se emplaza la obra, y a determinados datos biográficos del arquitecto.

25. A pesar de haber experimentado con anterioridad la inigualable sensación espacial del Pantheon y la Neue Nationalgalerie, el autor de la presente investigación ha revisitado estos dos imponentes espacios durante el desarrollo de la misma. Durante su estancia en Londres como visiting teacher and researcher de la London Metropolitan University visita en diversas ocasiones el Stonehenge. La imposibilidad de experimentar la espacialidad del desaparecido Palais des Machines se intenta soslayar con la visita reiterada a la St Pancras Station de Londres que, pese a menor tamaño y más torpe factura, se erige históricamente en el precedente proyectual del edificio francés. Sin embargo, las sucesivas modificaciones que ha experimentado esa estación obligan a complementar la experiencia con la visita reiterada a los Kew Gardens, donde existen varios edificios de hierro y cristal entre los que cabe destacar la Palm House.

Tras esta breve introducción se inicia el análisis propiamente dicho en torno a la estructuración espacial de la gravedad y de la luz. Aunque cada caso presenta sus propias particularidades, como regla general primero se analizan aquellas cuestiones más íntimamente vinculadas a la gravedad; luego se estudian aquellos temas relativos a la luz; finalmente, se analizan aquellos aspectos que conciernen a ambos fenómenos. Sin embargo, cabe advertir que esta separación de lo relativo a la gravedad y a la luz es sólo válida en un plano puramente analítico pues, de acuerdo con las conclusiones extraídas de la primera parte de la tesis, es imposible disociar ambos fenómenos en la realidad construida: la manera de encauzar la gravedad condiciona las propiedades físicas, los límites del espacio construido y, al mismo tiempo, condiciona las posibilidades de iluminación de ese espacio, es decir, la manera de introducir en él la luz y por tanto, su cualidad lumínico-espacial.

Unas veces de manera más entrelazada, otras de un modo más sincopado, a lo largo de cada uno de los cuatro capítulos se incorporan al análisis arquitectónico aquellas cuestiones relativas a la naturaleza física de la gravedad y de la luz expuestas en la segunda parte de la presente investigación doctoral. Se pretende con ello fundamentar conceptualmente la investigación arquitectónica en el conocimiento científico de las dos realidades físicas que nos ocupan; al mismo tiempo, se espera poder ilustrar así la posible influencia del desarrollo histórico de la representación física de la gravedad y la luz en la evolución de la noción de espacio.

LA RESISTENCIA A LA GRAVEDAD Y LA OPOSICIÓN A LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO EXTERIOR

III.2.1. El Stonehenge

III.2.2. La verticalidad del peso y la caída

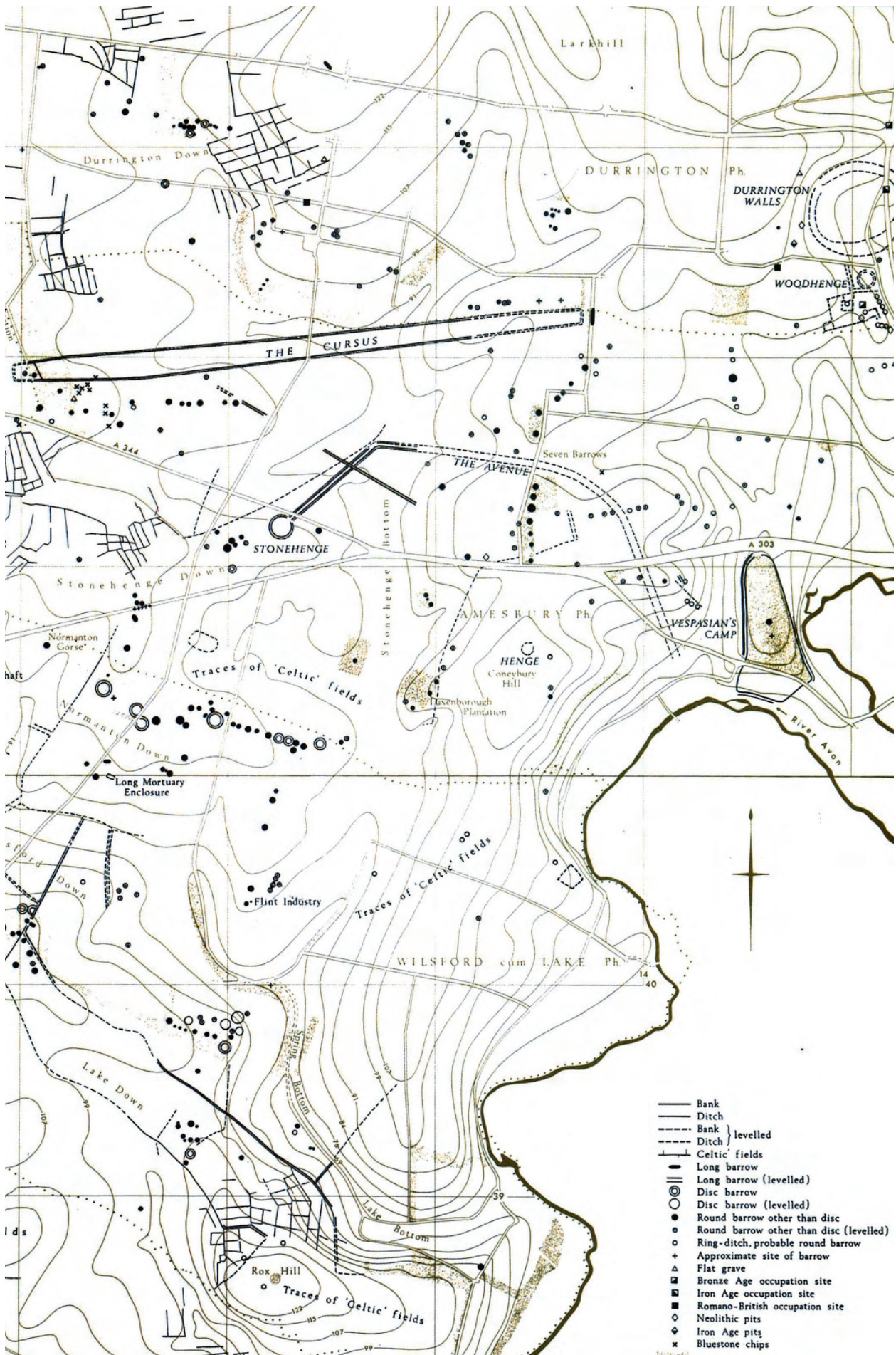
III.2.3. La orientación de la luz solar

III.2.4. Gravedad y luz como realidades contrapuestas

III.2.5. La cubrición del espacio como problema gravitatorio

III.2.6. El nacimiento de la luz estructural

III.2.7. La resistencia a la gravedad y la oposición a la luz en la estructuración del espacio exterior



F01. Construcciones megalíticas en los alrededores del Stonehenge. RICHARDS, Julian: *Stonehenge: The story so far*. Swindon: English Heritage, 2007, p. 147

III.2.1. EL STONEHENGE

“La arquitectura nació hace cinco mil años en Stonehenge. Una vez ultimada la colocación del primer arquitrabe, nació una forma de conocimiento humano cuya verdadera naturaleza consistiría en la construcción de la luz.”⁰¹

Livio Vacchini

En la primera concepción espacial el espacio arquitectónico se identifica con la noción de *espacio exterior*. Con independencia del refinamiento técnico y artístico de cada época, desde el menhir prehistórico hasta el templo clásico, la arquitectura se centra en las relaciones espaciales que los volúmenes establecen entre sí y con su entorno. Tanto en las construcciones megalíticas más sencillas como en las más refinadas arquitecturas greco-romanas es posible observar, al margen de refinamientos estilísticos y avances técnicos varios, una misma manera de entender y plantear la relación arquitectónico-estructural entre la gravedad y la luz. Sin embargo, la elementalidad de la técnica constructiva del Stonehenge permite centrar el análisis en la esencia de las cuestiones arquitectónicas relacionadas con la gravedad y con la luz sin temor a perderse por los caminos de la técnica estructural. En las piedras que conforman la megalítica estructura del Stonehenge están ya contenidas las cuestiones fundamentales sobre la relación espacio-estructural entre la gravedad y la luz que, durante varios milenios, han estado invariablemente presentes en toda arquitectura construida.

El Romanticismo imaginó el Stonehenge como un monumento formado, esencialmente, por unos solitarios trilitos de grandes dimensiones rodeados de un entorno natural bucólico. Sin embargo, lo cierto es que en la llanura de Salisbury, donde fue erigida esta imponente estructura, el ser humano prehistórico dejó numerosas muestras de su presencia. El Stonehenge está, pues, rodeado de una gran cantidad de construcciones del Neolítico y la Edad del Bronce⁰², algunas de importantes dimensiones. Hay que advertir también que, en contra de lo que mucha gente cree, el Stonehenge



F.02. Vista aérea del estado actual del conjunto.

www.englishheritageimages.com

01. VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): Obras maestras. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 17. Stonehenge.

02. “El Stonehenge no está solo. Es una estructura única, pero estuvo rodeado de actividad. Cerca hubo varios sitios que pudieron haber sido contemporáneos o más antiguos, y que quizá estuvieron relacionados culturalmente. Estos sitios, en una aproximada secuencia cronológica, fueron los túmulos alargados, el Cursus, el Woodhenge, el Santuario, los Durrington Walls, Avebury, los túmulos circulares y la monstruosa y misteriosa Silbury Hill”. HAWKINGS, Gerald S.: Stonehenge decoded. Fontana: Collins, 1977, p. 103



F03. El Stonehenge en la planicie de Salisbury. www.nationalgeographic.com

no está formado únicamente por las grandes estructuras megalíticas arquitrabas que hallan en su centro, sino que lo conforman una gran cantidad de partes distintas.

Muchas son las incertidumbres arqueológicas que se ciernen sobre el Stonehenge y que han dado lugar a un sinfín de hipótesis e interpretaciones. Los arqueólogos no se ponen de acuerdo ni en la datación de sus fases de construcción ni en el orden exacto de aparición, remodelación y desaparición de sus distintas partes. Sin embargo, sí es unánime la opinión de que la construcción del Stonehenge tuvo que prolongarse mucho en el tiempo, quizá a lo largo de uno o dos milenios⁰³. Así pues, a pesar de que el conjunto megalítico hoy en día visible pueda parecer fruto de una concepción unificada, no todos los elementos que lo conforman fueron contruidos al mismo tiempo. Es, más bien, el resultado de una sucesión de distintas fases de construcción que se desarrollaron a lo largo de un dilatado periodo de tiempo. A pesar de las diferencias entre las distintas hipótesis de construcción existentes, todas ellas coinciden en apuntar que la primera fase, conocida como *Stonehenge I*, consistió en la manipulación del terreno natural a fin de delimitar un espacio circular mediante la construcción de un foso y un terraplén. Durante esta fase y la siguiente, conocida como *Stonehenge II*, el ser humano prehistórico erigió verticalmente algunos grandes monolitos estratégicamente dispuestos sobre el terreno. Por último, fue durante la fase conocida como *Stonehenge III* cuando se erigieron las grandes estructuras arquitrabadas⁰⁴. Estas tres fases constructivas coinciden con las tres modalidades fundamentales del construir: la modificación de la corteza terrestre, la elevación del suelo y la cubrición espacial⁰⁵.

Conviene apuntar también que la imposibilidad de establecer con seguridad la función prehistórica del Stonehenge ha incentivado la aparición de múltiples especulaciones sobre su desconocida utilidad. Por su carácter singular, muchos le han otorgado algún tipo de función ritual. Otros, a la vista de los restos humanos hallados, se inclinan más por la hipótesis de que hubiera podido ser algún tipo de monumento mortuorio o cementerio. También los hay que, a la vista

03. No existe consenso sobre las posibles fechas de construcción del Stonehenge pues, según el método de datación empleado aparecen oscilaciones importantes. Se considera que el inicio de su construcción tuvo que producirse entre el 3.100 y el 2.200 a.C. y su fin entre el 1.600 y el 1.100 a.C.

04. Este breve apunte de las posibles fases de construcción del Stonehenge se basa en la hipótesis formulada por Richard John Copland Atkinson, la más ampliamente aceptada entre los arqueólogos. Ver ATKINSON, Richard John Copland: *Stonehenge*. London: Hamish Hamilton, 1956, autor de referencia sobre el Stonehenge.

05. "En el Stonehenge (...) vemos aparecer con prepotencia las tres modalidades fundamentales del construir: cómo se modifica la corteza terrestre, cómo se alza y cómo se cierra hacia el cielo". VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 17. Stonehenge



F.04. El Stonehenge en la planicie de Salisbury. Fotografía de Christopher Holt.

de la orientación del conjunto hacia la dirección de la salida del sol en el solsticio de verano, lo vinculan a algún tipo de culto solar. Algunos van más allá de esta hipótesis solar y sostienen que el Stonehenge pudo haber servido para establecer con precisión el cambio de estación a lo largo del año, un hecho realmente importante para una población ya iniciada en la práctica de la agricultura. También hay quien, a la luz de un sinfín de alineaciones astronómicas que es posible establecer entre las distintas partes que conforman el conjunto del Stonehenge, afirma que pudo ser una suerte de observatorio astronómico y que, incluso, pudo llegar a servir para predecir eclipses de Sol y de Luna⁰⁶.

Pero todas estas incertidumbres no merman, en absoluto, el interés arquitectónico del Stonehenge pues, a diferencia del historiador o del arqueólogo, el arquitecto no necesita reconstruir el tiempo para ahondar en las cuestiones fundamentales de la Arquitectura. Considerado por muchos como la obra cumbre de la cultura arquitectónica megalítica desarrollada en el Mediterráneo occidental y la Europa atlántica durante el Neolítico tardío y la Edad de Bronce, el Stonehenge se erige como un magnífico referente sobre el que poder analizar la primigenia importancia de la gravedad y de la luz en la arquitectura.

III.2.2. LA VERTICALIDAD DEL PESO Y LA CAÍDA

“Nada hay tan congénito en la arquitectura de todos los tiempos como (...) la verticalidad de la gravedad”⁰⁷

Eduardo Torroja Miret

Durante milenios el ser humano no tuvo conciencia de lo que actualmente llamamos *gravedad*. Desde la prehistoria hasta la Grecia clásica, ésta fue identificada y confundida con la manifestación de sus dos fenómenos más elementales: el peso y la caída libre.

En efecto, Aristóteles, el filósofo griego más influyente en el desarrollo de la física durante el milenio y medio siguiente, explicó

06. *A lo largo del último siglo han proliferado una gran cantidad de hipótesis astronómicas en torno al Stonehenge. No obstante, y con independencia de sus postulados, ninguna de ellas puede ser probada y, por tanto, universalmente aceptada como cierta.*

“La creencia en el propósito astronómico de los círculos de piedras se ha ido reforzando desde el siglo XIX y quizás recibió su más ferviente defensa en el *Stonehenge and Other British Stone Monuments Astronomically Considered* de Lockyer (1906). Uno de sus principios fue que después de encontrar un sitio adecuado, la gente erigía un círculo de piedras que debería establecer su eje mayor hacia un lugar del horizonte donde un cuerpo celeste –el sol, la luna o una estrella- cruzara el horizonte en un día particular. Otros escritores dieron credenciales similares a las orientaciones axiales: alineaciones desde los círculos a los centros (Hylsop and Hylsop, 1912); desde una piedra del círculo a otra (Somerville, 1923; Thom, 1965, Hawkins, 1966); a piedras periféricas (Wilson and Garfitt, 1920); a formaciones montañosas lejanas (A. L. Lewis, 1883, Thom 1967); o incluso a piedras enhiestas distantes y tumbas cuya contemporaneidad con el círculo no fue nunca demostrada”. *BURL, Aubrey: The Stone circles of the British Isles. New Haven: Yale University Press, 1976, p. 50*

“Ha sido largamente reconocido que el axis del Stonehenge III apunta hacia la salida del sol en el solsticio de verano y, en su dirección opuesta, a la puesta de sol en el solsticio de invierno; y es sabido que estas alineaciones se remontan al periodo II sino antes. Recientemente ha sido aclamado que el Stonehenge incorpora otras alineaciones astronómicas significativas, y que fue usado para predecir eclipses de sol y de luna. Algunas de estas reclamaciones son tan extravagantes que no pueden ser tomadas en serio, y ninguna de ellas es fácil de verificar, porque el estado ruinosos del Stonehenge hace casi imposible recuperar, con la suficiente precisión, la dirección original de cualquiera supuesta alineación”. *ATKINSON, Richard John Copland: Stonehenge. New York: MacMillan, 1956, p. 27*

07. *TORROJA MIRET, Eduardo: Razón y ser de los tipos estructurales (3a Ed). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007, p. 275*

08. *Para una completa explicación de la física aristotélica, ver apartado II-2.1. Aristóteles: gravedad telúrica y luz etérea.*



F.05. Piedra número 96, menhir bautizado popularmente con el nombre de *Heel Stone*. Fotografía del autor.

ambos fenómenos sin recurrir a la por entonces desconocida noción de “gravedad”⁰⁸. Para el estagirita, los fenómenos del peso y la caída libre representaban casos particulares de una explicación mucho más amplia sobre los *movimientos naturales*, descritos en su *Física* como una *tendencia natural* de los cuerpos a dirigirse hacia su *lugar propio*. En efecto, la física aristotélica se basa en la idea de que los cuatro elementos -la tierra, el agua, el aire y el fuego- tienden a ocupar en el mundo esferas concéntricas de acuerdo con su “*pesantez*”, siendo la tierra el elemento más pesado y el fuego el más ligero. De acuerdo con su constitución elemental, todo cuerpo ubicado fuera de su lugar propio tiende a volver a él. Es por esta razón que una roca en el aire tiende a dirigirse naturalmente hacia la tierra y que, por el mismo motivo, el humo tiende a ascender.

Así pues, en el sistema aristotélico el fenómeno de la caída libre se explica como la tendencia de la materia térrea a dirigirse hacia la tierra misma, su lugar propio, siendo el peso la consecuencia fenoménica del impedimento de esta tendencia natural. La caída y el peso se constituyen, entonces, como dos estados distintos y excluyentes de un mismo fenómeno⁰⁹ que, además, se manifiesta siempre en una misma dirección, la vertical¹⁰.

Si el peso y la caída son fenómenos que se excluyen mutuamente -pues un cuerpo que pesa no cae y un cuerpo que cae no pesa-, será misión de la arquitectura garantizar una correcta transmisión del peso a fin de evitar su propia caída. Y, por supuesto, la manera más fácil de transmitir el peso es siguiendo la vertical. No debe sorprender, entonces, que una vez el hombre prehistórico hubo tomado conciencia de que toda construcción debía hacer frente a los efectos de la gravedad sobre la materia con la finalidad última de soportar su propio peso y evitar así su caída, su más elemental construcción, el *menhir*¹¹, se dispusiera precisamente en vertical, la dirección natural de la gravedad¹². Desde entonces, con independencia de si el elemento tiene o no que soportar otras cargas además de su peso, la posición vertical ha sido considerada como una garantía de estabilidad gravitatoria. El menhir, el elemento arquitectónico más primitivo y elemental erigido por el hombre, se constituye todo

09. *La relación entre el peso y la caída libre ha sido objeto de análisis en la primera parte del presente trabajo de investigación. A tal efecto, ver los apartados I-2.1.1.2. Piezas de gravedad (Juan Navarro Baldeweg) y I-3.3.1. La arquitectura como manifestación de la luz y de la gravedad (Arthur Schopenhauer).*

10. *A lo largo de la historia el ser humano ha construido diversas concepciones del mundo, unas veces imaginado como una realidad plana y otras como un cuerpo sensiblemente esférico. En una concepción plana del mundo, la vertical gravitatoria se constituye como una dirección única y absoluta. En cambio, en una concepción esférica esta dirección deja de tener carácter absoluto, pues la atracción gravitatoria se manifiesta en una dirección que se corresponde con la línea que une el cuerpo sobre el que actúa la gravedad y el centro de la Tierra. En este caso, existen para la gravedad infinitas direcciones “verticales”, tantas como radios esféricos.*

11. *La palabra menhir procede del bretón, idioma en el que significa “piedra larga”, de men, que significa “piedra”, e hir, que significa “larga” (ver GIEDION, Sigfried: El Presente eterno: los comienzos de la arquitectura. Madrid: Alianza, 1981, p. 416). Así pues, el menhir es un monolito más o menos alargado dispuesto en posición vertical con su parte inferior enterrada en el suelo.*

12. *“Giedion afirma que nuestra actitud hacia la vertical se ha convertido en automática y está anclada en nuestro subconsciente. (...) Constata como un hecho consecuencia de la experiencia, que entre todas las posibilidades que el hombre ha tenido de percepción arquitectónica, de entre toda la serie ilimitada de direcciones y ángulos, la elegida, la más cargada semánticamente y convertida en modelo, fue la vertical. (...) Lo intuitivo se aproxima a lo primario, así la gravedad, como fuerza física natural marca una dirección principal, la primera de todas, la más elemental percibida por el ser humano. Las cosas caen”. MONTERO FERNÁNDEZ, Francisco Javier: El Panteón: imagen, tiempo y espacio: proyecto y patrimonio. Sevilla: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2004, pp. 117-120. Montero se refiere aquí a GIEDION, Sigfried: Supremacía de la vertical, en El Presente eterno: los comienzos de la arquitectura. Madrid: Alianza, 1981, pp. 411-426*



F.06. La posición horizontal de la Slaughter Stone, cuya función se desconoce, contrasta con la estructura megalítica erigida en el crómlech.
www.flickr.com. Fotografía de Robbie Austrums.

él como una primigenia *estructura* y, aún sin soportar más que su propio peso, se erige como un ancestral predecesor del pilar.

Durante varios milenios, la intuida necesidad de disponer los elementos en vertical careció de explicación científica. Fue Arquímedes quien, mediante la invención del concepto geométrico de *centro de peso* (llamado posteriormente *centro de gravedad*)¹³, sentó las bases necesarias para un elemental análisis estructural. La invención de dicho concepto en combinación con la posterior creación de la noción de *fuerza*¹⁴ permitió demostrar que, en ausencia de acciones exteriores horizontales, cualquier elemento vertical apoyado en el suelo permanecería en equilibrio estático siempre y cuando la proyección de su centro de gravedad se encontrara dentro del perímetro de su base de apoyo.

Si hubiera sido posible encontrar piedras enhiestas por la sola acción de la naturaleza, el hombre prehistórico no se hubiera esforzado en erigir ni uno solo de estos monolitos. Además de reconocer la naturaleza de los fenómenos de la gravedad, la erección del menhir expresa la voluntad del arquitecto prehistórico de transgredir, o superar, estos mismos principios¹⁵. Desde un punto de vista gravitatorio el menhir aparece como un acontecimiento inverosímil y antinatural que, sin embargo, al mismo tiempo debe reconocer como ineludibles unas leyes de la gravedad que pueden llevar a la ruina a cualquier construcción. Esta actitud hacia la gravedad, a la vez temerosa y desafiante, ha sido una constante en la arquitectura de todos los tiempos.

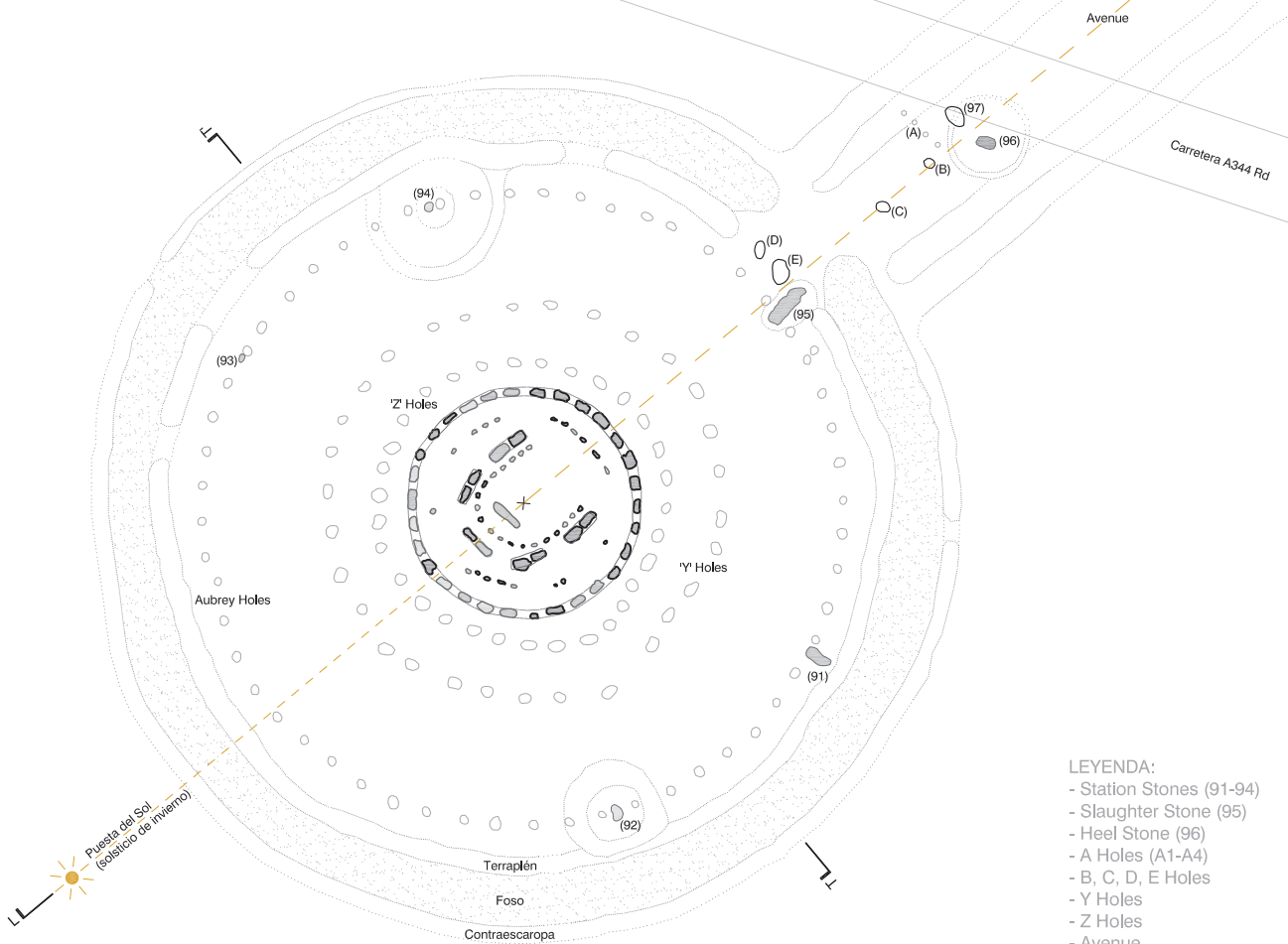
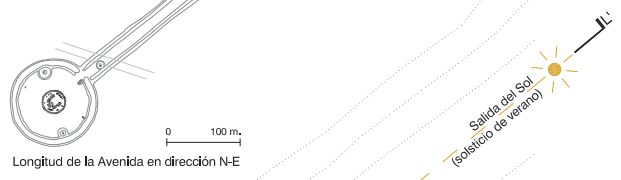
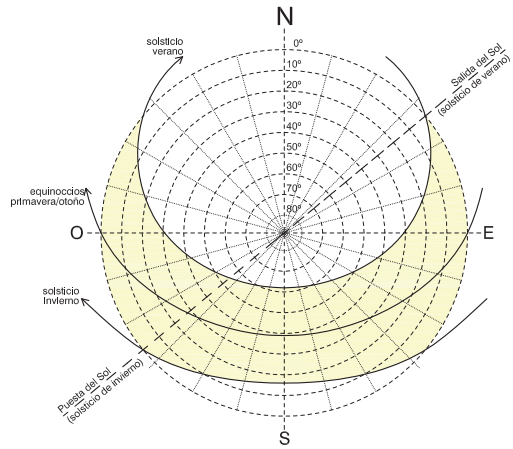
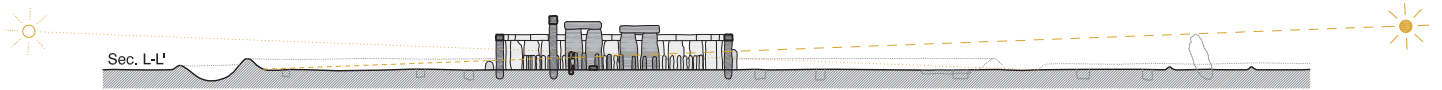
Es evidente, pues, que a pesar de su elementalidad megalítica, en la erección del menhir se manifiestan ya las primeras intuiciones del ser humano en torno a la importancia del fenómeno gravitatorio en la arquitectura. A pesar de que por acción del tiempo o por causa de la mano del hombre algunas hayan caído ya o se encuentren en una posición amenazadoramente inclinada, todas y cada una de las piedras enhiestas del Stonehenge fueron erigidas en posición vertical¹⁶, reconociendo la dirección natural de los fenómenos más evidentes de la gravedad: el peso y la caída libre.

13. Sobre la invención de la noción de centro de gravedad por Arquímedes, ver apartado II-2.2.2. La "gravedad" geométrica de Arquímedes.

14. Corresponde a Hooke y Wren el mérito de redactar el primer tratado sobre análisis y cálculo estructural, basado en la noción arquimedea de centro de gravedad y la newtoniana noción de fuerza. Ver apartado I-3.2.1. Wren, arquitecto: la belleza de la luz y la estática estructural.

15. De manera similar al efecto conseguido por las piezas de gravedad de Navarro Baldeweg (ver apartado I-2.1.1.2. Piezas de gravedad), la aparente imposibilidad gravitatoria del menhir tuvo que despertar en el hombre prehistórico la conciencia de pertenencia al fenómeno gravitatorio.

16. A continuación se enumeran las piedras enhiestas del Stonehenge de acuerdo a la nomenclatura establecida por W. F. M. Petrie y haciendo referencia, también, a los nombres con que algunas de ellas han sido popularmente bautizadas (para una referencia planimétrica de las mismas ver los dibujos de F.07 y F.08): la piedra número 96, más conocida como Heel Stone, de algo menos de 5 metros de altura sobre el nivel actual del suelo y unas 35 toneladas de peso; los hoyos 97, B y E, que se cree que pudieron albergar alguna piedra erecta, así como los hoyos D y E, que quizá alojaron sendos monolitos a modo de puerta de acceso al recinto circular; las cuatro piedras número 91-94 situadas en el perímetro interior del reborde que construye el recinto circular, más conocidas como Station Stones, de entre 1,2 y 2,7 metros de altura; las piedras enhiestas numeradas del 31 al 49, de entre 1,8 y 2,4 metros de altura que conforman el Bluestone Horseshoe y las que conforman el Bluestone Circle (las piedras de arenisca gris son localmente llamadas Bluestone), numeradas del 61 al 72, de unos 2 metros de altura; la piedra número 95, más conocida como Slaughter Stone, de 6,3 metros de largo, y la piedra número 80, más conocida como Altar Stone, de unos 4,8 metros de longitud, ambas en el suelo en la actualidad.



- LEYENDA:
- Station Stones (91-94)
 - Slaughter Stone (95)
 - Heel Stone (96)
 - A Holes (A1-A4)
 - B, C, D, E Holes
 - Y Holes
 - Z Holes
 - Avenue

Sec. T-T'



F.07. Planimetría del conjunto del Stonehenge (ver F.07-08. NOTA en la página siguiente)

E 1/1.000 0 5 10 20 m.

III.2.3. LA ORIENTACIÓN DE LA LUZ SOLAR

“El conjunto de Stonehenge representa una prueba irrefutable de la existencia de formas solares en el ámbito de la arquitectura nórdica durante la Edad de Bronce. La relación con el Sol se establece, sobre todo, mediante la “orientación”, por tanto también mediante la planta circular. Pero también cada uno de los elementos que componen el círculo de piedra, los trilitos, son probablemente, en virtud de su configuración en forma de puerta, formas solares. (...) Este lugar sagrado expresa su luminosidad gracias al hecho de que el conjunto no está delimitado por paredes compactas sino por marcos diáfanos y ‘claros’”.¹⁷

Hans Sedlmayr

En el oeste del Reino Unido, donde la tierra es lo suficientemente blanda como para poder ser trabajada, el hombre primitivo delimitó, mediante la excavación de una zanja y el terraplenado de su perímetro, recintos circulares llamados *henges*. En el este, en cambio, allí donde la tierra es demasiado dura como para ser trabajada de esta manera, el constructor prehistórico optó por construir *crómlechs*, espacios circulares delimitados por piedras enhiestas. Sin embargo, existen construcciones megalíticas que aúnan, en un solo monumento, estas dos maneras de delimitar el espacio. Este es el caso de los yacimientos de Ring of Broadgar, Balfarg, Long Meg and Her Daughter, Bull Ring, Arbor Low, Devil’s Quoits, Avebury y, también, Stonehenge¹⁸.

El *henge* del Stonehenge es aproximadamente circular y tiene unos 95 m. de diámetro interior y unos 120 m. de diámetro exterior. Está formado por una zanja central, un terraplén interior y una pequeña contraescarpa exterior, resultado los dos últimos del apilamiento de la tierra sustraída por la excavación de la primera. El terraplén interior, de algo más de metro y medio de altura, se constituye como un límite visual del espacio circular que sólo permite la visión del horizonte lejano. La zanja, el terraplén y la contraescarpa sólo se interrumpen

F.07-08. NOTA: La planimetría aquí representada ha sido elaborada por el propio autor del presente trabajo de investigación a partir de la información gráfica y escrita recopilada en diversas fuentes (entre las que cabe destacar a Atkinson y Chippindale). Dada la disparidad y las diferencias entre las fuentes consultadas, es necesario hacer algunas apreciaciones que ayuden a entender los criterios aquí adoptados:

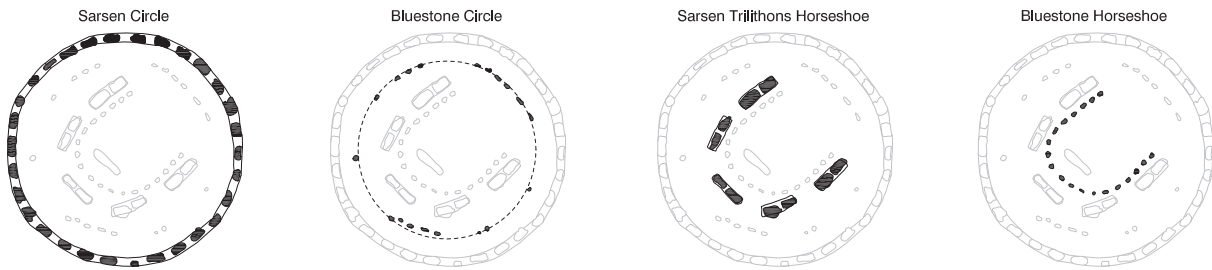
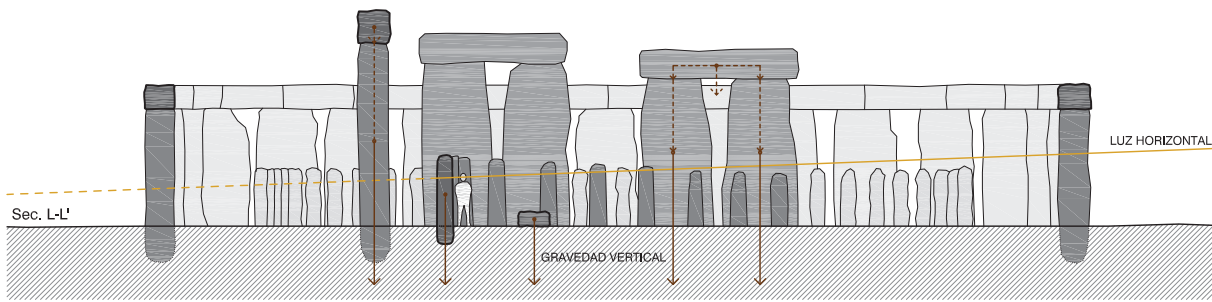
- Dado que el objetivo de tal planimetría es arquitectónico y no arqueológico, no se han representado las piedras en su disposición actual, sino en su supuesta ubicación, distinguiendo entre las actualmente enhiestas, las caídas y las desaparecidas.
- En las fuentes consultadas existen diferencias textuales y gráficas en las dimensiones de algunos elementos, como los diámetros de algunos de los anillos de piedras u hoyos, las profundidades de las zanjas, etc. Se han aquí adoptado las dimensiones más comúnmente compartidas.
- La piedra 89 (*Altar Stone*) se ha representado en horizontal aunque hay autores que creen que estaba dispuesta verticalmente.
- El terreno donde se asientan los anillos de piedras presenta una perceptible inclinación hacia el este, pero al no existir información topográfica que ilustre tal pendiente, se ha optado por representarlo plano.
- El diagrama solar ha sido extraído de la página web www.gaisma.com. Frente a la imposibilidad de conseguir el diagrama preciso del Stonehenge, el aquí representado corresponde al de Southampton, localidad situada a unos 60 kilómetros al sureste del Stonehenge.

17. SEDLMAYR, Hans: La luz en sus manifestaciones artísticas. Madrid: Lampreave, 2012, pp. 27-28

18. Ver BURL, Aubrey: *The Stone circles of the British Isles*. New Haven: Yale University Press, 1976, pp. 24-28

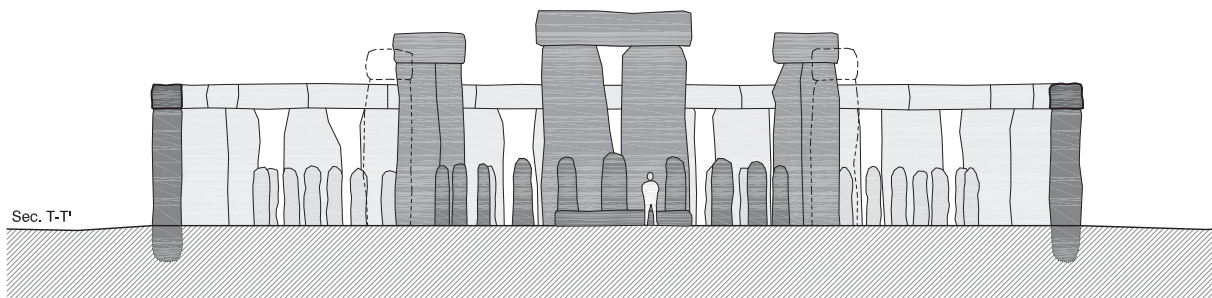
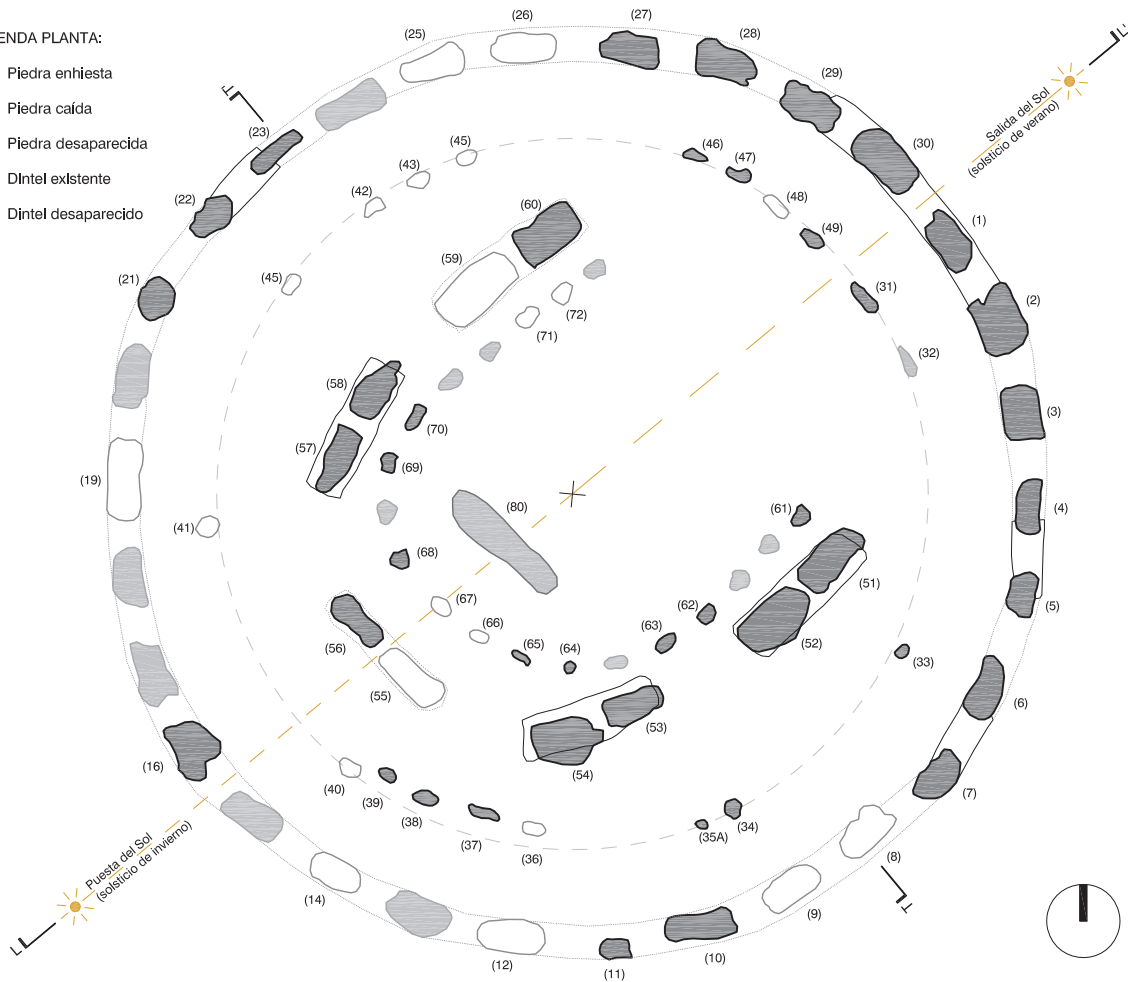
19. Aunque por mor de la brevedad aquí se considere estos anillos megalíticos aproximadamente concéntricos y dispuestos sobre el eje de la avenida, hay que señalar que los arqueólogos han determinado importantes desviaciones en la posición de los centros de estas figuras y su relación con el eje de la Avenue.

20. Según la numeración de W. F. M. Petrie, los trilitos del Sarsen Trilithons Horseshoe están formados por diez piedras enhiestas numeradas del 51 al 60, mientras que los números 152, 154, 156, 158 y 160 corresponden a sus dinteles.



LEYENDA PLANTA:

- Piedra enhiesta
- Piedra caída
- Piedra desaparecida
- Dintel existente
- Dintel desaparecido



F.08. Planimetría de los anillos megalíticos del Stonehenge (ver F.07-08. NOTA en la página anterior)

E 1/250 0 1 5 m.

en el noreste, donde se produce el acceso al recinto. De este acceso nace un camino de tierra bordeado a lado y lado por una zanja y un reborde de baja altura que recibe el nombre de *Avenue* y que se prolonga medio kilómetro también en dirección noreste. A algo más de veinte metros del acceso, sobre la *Avenue*, se erige solitaria la gran *Heel Stone* una piedra de casi cinco metros de altura y treinta y cinco toneladas de peso. Es así como se dota de una mayor importancia a uno de los infinitos radios del henge, de modo que éste pierde su adireccionalidad circular y adquiere una determinada *orientación*.

Los diversos anillos de piedras que conforman el *crómlech* del Stonehenge, construido en fases posteriores al henge, se disponen concéntricamente¹⁹ en su interior y siguen, mediante estrategias distintas, su orientación hacia el noreste. Así, las dos formaciones megalíticas situadas más cerca del centro del henge son el *Bluestone Horseshoe* (las piedras de arenisca gris reciben localmente el nombre de *Bluestone*), constituido por diecinueve piedras enhiestas de unos dos metros de altura, y el *Sarsen Trilithons Horseshoe* (las piedras de arenisca silíceas son llamadas localmente *Sarsen*), formado por cinco trilitos²⁰ de entre seis y siete metros y medio de altura. Tal como anuncian sus nombres, ambos conjuntos adoptan una disposición similar a la de una herradura orientada hacia la *Avenue*. Dicha orientación no sólo se manifiesta en planta, sino también en sección, pues en ambos casos se produce un aumento progresivo de altura de los megalitos desde la parte abierta de la herradura hacia su centro, donde se sitúa el trilito de mayor envergadura²¹. Un poco más hacia fuera se encuentra el *Bluestone Circle*, formado por unas sesenta piedras que describen un círculo unos veinticuatro metros de diámetro. Finalmente se encuentra el *Sarsen Circle*, un círculo megalítico de unos treinta metros de diámetro exterior compuesto por treinta piedras enhiestas cubiertas por otros tantos arquivadros²². Este anillo perfectamente circular, cuyas piedras enhiestas se disponen entre ellas a una distancia constante, reconoce la orientación del conjunto mediante un leve aumento en la separación, a modo de puerta, de las dos piedras verticales situadas a ambos lados del eje hacia la *Avenue*²³. Es evidente, pues, que todos los anillos de piedras del Stonehenge reconocen en su forma la orientación previamente señalada por el *henge*.



F.09. Cromlech adintelado del Stonehenge. RICHARDS, Julian: *Stonehenge: The story so far*. Swindon: English Heritage, 2007, p. 21

21. La altura total, incluyendo los dinteles y tomada desde el actual nivel del suelo del Sarsen Trilithons Horseshoe, es de un poco más de 6,0 m. para los trilitos 51-52 y 59-60, 6,6 m. en los trilitos 53-54 y 57-58 y 7,9 m. para el trilito central formado por las piedras 55-56. Con sus 6,6 metros de altura sobre el nivel del suelo, la piedra 56, el único vestigio aún en pie del gran trilito, se erige como el mayor monolito enhiesto de todas las Islas Británicas. Las piedras del Bluestone Horseshoe aumentan en altura en el mismo sentido, desde 1,8 m. hasta los 2,4 m.

22. Según la numeración de W. F. M. Petrie, las 30 piedras enhiestas están numeradas del 1 al 30 y sus 30 dinteles, del 101 al 130.

23. "Los montantes no son todos de la misma anchura, pero están situados de forma que sus centros guarden la misma distancia unos de otros, razón por la cual hay ligeras variantes en los espacios intermedios. Los dos montantes situados a ambos lados del eje, número treinta y número uno, están emplazados a una distancia un poco mayor de la normal, lo que hace pensar que se trate de una entrada, y los espacios entre éstos y sus vecinos fueron reducidos para compensar esto". CHIPPINDALE, Christopher: *Stonehenge: en el umbral de la historia*. Barcelona: Destino, 1989, p. 21

24. "La palabra 'orientación' deriva de 'oriente', la dirección del sol naciente". NORBERG-SCHULZ, Christian: *Existencia, Espacio y Arquitectura*. Barcelona: Blume, 1975, p. 26



F.10. Vista aérea del Stonehenge desde el noreste, dirección hacia donde se orienta la *Avenue*.
Fotografía de Hamish Fenton, modificada por el autor.

Advertida la orientación de las distintas partes del Stonehenge, tanto en planta como en sección, cabe preguntarse sobre el motivo por el cual el conjunto fue orientado sobre ese eje en concreto. El físico y arqueólogo Lincoln William Stukeley (1687-1765), miembro de la Royal Society en contacto directo con los más eminentes astrónomos y matemáticos británicos de la época, fue el primero en advertir, en *Stonehenge: a Temple restor'd to the British Druids* (1740), que esta orientación coincide con la salida del Sol en el solsticio de verano²⁴. El propio Stukeley apuntó, además, la posibilidad de que la *Heel Stone* hubiera sido dispuesta de tal manera que su parte superior marcara de manera más o menos precisa el punto exacto del lejano horizonte donde se produce la salida del Sol en el día más corto del año²⁵. Gracias a su opacidad, la *Heel Stone* se erige como un primitivo *gnomon*²⁶, un solitario menhir cuya forma y posición están directamente vinculadas al movimiento cíclico anual de la luz del Sol.

Durante más de un siglo, mientras algunos creyeron que la orientación del Stonehenge hacia la salida del Sol en el solsticio de verano podía deberse a la casualidad, otros consideraron el Stonehenge como una construcción megalítica excepcional y superior al resto por esa misma razón. Sin embargo, gracias a un extenso y meticuloso trabajo de campo sobre los círculos de piedra británicos²⁷, Alexander Thom descubrió que todos ellos se disponían en figuras geométricas -círculos, círculos aplanados, elipses, formas ovales y otras formas híbridas- sensiblemente orientadas hacia la salida del Sol en el solsticio de verano. Se demostró entonces que, lejos de ser un hecho casual o excepcional, la orientación solar del Stonehenge era un hecho compartido por tantos otros conjuntos megalíticos.

La orientación solar del henge, del crómlech y de la *Heel Stone* del Stonehenge se constituye como una magnífica prueba de que, desde hace varios milenios, la arquitectura ha intentado vincularse, de algún modo, a la cambiante luz del Sol. Esta relación distante con el Sol se ha producido, siempre, reconociendo la proyección rectilínea de la luz -propiedad lumínica que toda teoría científica sobre la luz ha tenido que ser capaz de explicar de manera satisfactoria²⁸- y la posición cambiante de su fuente inalcanzable. Desde sus inicios, las grandes obras de arquitectura de la historia, sin excepción, se han esforzado por establecer relaciones conscientes, lo más precisas posibles, entre la forma construida y la luz solar, entre la arquitectura y el cosmos²⁹.

25. Actualmente la *Heel Stone* está inclinada unos 24° con respecto a la vertical en dirección suroeste, es decir, sobre el eje principal del Stonehenge, pero se cree que originalmente tuvo que estar erguida y vertical. Este hecho, junto a la variación de la eclíptica a lo largo de los siglos, podría ser el motivo por el cual, en la actualidad, el disco solar no aparece justo por encima de la *Heel Stone*, sino a su izquierda. También cabe la posibilidad de que en el hoyo 97 hubiera otra piedra enhiesta, de modo que el disco solar apareciera entre ambas. En cuanto a las fotografías sobre la *Heel Stone* y el amanecer, explica Christopher Chippindale que muchas "parecen mostrar la mitad del disco solar bien encajada en la parte superior de la *Heel Stone*, pero todas han sido "ajustadas": a medida que el sol comienza a subir, el fotógrafo se mueve hacia un lado -un pie o dos es más que suficiente- a fin de captar al sol sobre la *Heel Stone*, y se yergue o se inclina más o menos para que sus fotografías salgan en la relación vertical que necesita" (CHIPPINDALE, Christopher: *Stonehenge: en el umbral de la historia*. Barcelona: Destino, 1989, p. 154). Existen varias hipótesis arqueo-astronómicas sobre el motivo de tal desviación.

26. Edward Duke afirmó, en *Druidical Temples of the County of Wiltshire* (1846), que la *Heel Stone* "era un gnomon para observar la salida del Sol en la mañana del solsticio de verano" (citado en NORTH, John: *Stonehenge: a new interpretation of prehistoric man and the cosmos*. New York: The Free Press, 1996, p. 401). La palabra "gnomon" viene del griego γνόμων (gnōmōn) y se refiere al antiguo instrumento de astronomía, compuesto de un estilo vertical y de un plano o círculo horizontal, con el cual se determinaban el acimut y altura del Sol observando la dirección y longitud de la sombra proyectada por el estilo sobre el expresado círculo. También se utilizaba para referirse a personas sabias, "guía" o "maestro". El gnomon fue un elemento importante en las civilizaciones antiguas, desde Egipto hasta Roma. Para más información, ver el apartado I-3.1. Marco Vitruvio: *gnomónica y mecánica*.

27. THOM, Alexander: *Megalithic sites in Britain*. Oxford: Clarendon, 1967.

28. Ver apartado II- 5.2. Sobre las sucesivas teorías en torno a la luz.

29. La importancia de la orientación queda ya reflejada en el tratado de Vitruvio sobre arquitectura, el más antiguo conservado. El tratadista romano dedica el capítulo XVII del libro sexto a esta cuestión: "De las partes del cielo a que deben mirar los edificios para su buen uso". Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): *Los Diez libros de arquitectura*. Madrid: Akal, 1987, pp.151-152



F.11. Vista de la salida del Sol en el solsticio de verano sobre la *Heel Stone* a través de las piedras 1 y 31 del *Sarsen Circle*.
www.sciencelibraryphoto.com / Fotografía de Robin Scagell

III.2.4. GRAVEDAD Y LUZ COMO REALIDADES CONTRAPUESTAS

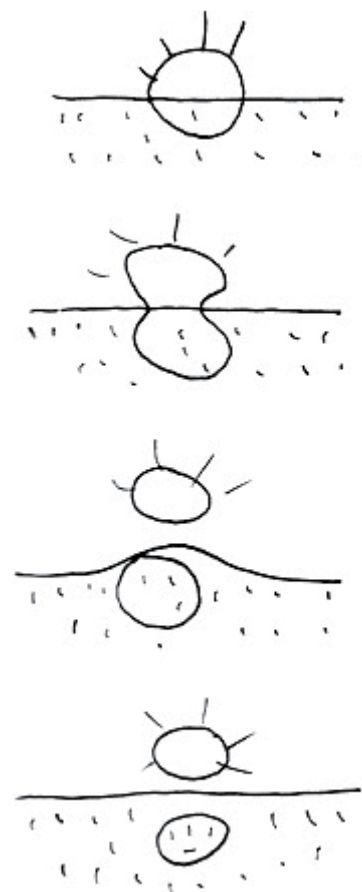
*“El crecimiento de todo ser vivo es una lucha contra la gravedad, buscando la luz. Por tanto parece lógico que, como espacio para vivir que es, la arquitectura haya surgido contra la gravedad y buscando la luz, desde Stonehenge hasta la Ópera de Sydney”.*³⁰

Jesús María Aparicio Guisado

Como se ha señalado anteriormente, en la Grecia clásica aún no existía la noción de gravedad como tal. Es por ello que en el sistema aristotélico ésta se identifica con el peso, una propiedad privativa de los cuerpos formados principalmente de tierra, el más pesado y opaco de todos los elementos, cuyo lugar propio se encuentra en la esfera central del mundo. A lo largo de la historia, la vinculación de la gravedad con la *tierra* se ha referido al mismo tiempo a doble acepción, como elemento material y como cuerpo celeste. Incluso cuando Galileo Galilei demostró que la gravedad afectaba por igual a todos los cuerpos del universo, con independencia de su constitución material y su peso³¹, se siguió considerando a la gravedad como un fenómeno exclusivamente terrestre, es decir, propio de la Tierra. Fue gracias a la teoría gravitatoria de Isaac Newton que se comprendió, finalmente, que la gravedad era un fenómeno universal³².

Siguiendo con el sistema aristotélico, la luz está vinculada al éter (constitutivo del medio diáfano en el que se da la luz) y al fuego (agente capaz de modificar el estado del diáfano a fin de que se manifieste la luz), los más sutiles y transparentes elementos, carentes por completo de peso y situados, por lo tanto, en las esferas más externas del universo. La luz es considerada, pues, como un fenómeno natural que, en tanto que etéreo, queda al margen de la materialidad propia del planeta Tierra.

Así pues, la gravedad se relaciona con el peso y la oscuridad de lo telúrico, mientras que la luz se concibe como un elemento absolutamente ligero relacionado intrínsecamente con la diafanidad. En una cosmología esférica como la de Aristóteles, la gravedad



F.12. Mediante este sencillo y elocuente esquema gráfico, el arquitecto Alejandro de la Sota (1913-1996) plasma la génesis del proyecto de la Casa Domínguez. (Pontevedra, 1976), basada en la contraposición ontológica entre la gravedad y la luz. AA. VV.: *Alejandro de la Sota. Arquitecto*. Madrid: Pronaos, 1989, pág. 129.

30. APARICIO GUISTADO, Jesús María: *Construir con la razón y los sentidos*. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 79

31. Ver apartado II-3.3.1. La gravedad terrestre como repulsión desigual de la materia.

32. Ver apartado II-3.5.1. La gravedad, una fuerza universal.



F.13. La verticalidad del menhir enhiesto se contrapone a la posición horizontal de los monolitos que yacende manera natural en el suelo. Aunque en la actualidad se perciba como un solitario menhir, el monolito 16 del *Sarsen Circle* formabaparte de una estructura arquitrabada más compleja. Fotografía del autor.

telúrica tiende a desplazar los cuerpos sometidos a su acción *hacia abajo* o, más bien dicho, hacia el centro del mundo, mientras que el lugar natural propio de la luz está *arriba*, fuera del mundo. La gravedad y la luz se plantean, pues, como dos cuestiones antitéticas. En lo telúrico, donde reina el peso y la oscuridad, no hay lugar para la luz. En los cielos, precisamente donde no hay lugar para la pesada materia inerte, se hace presente la liviana luz.

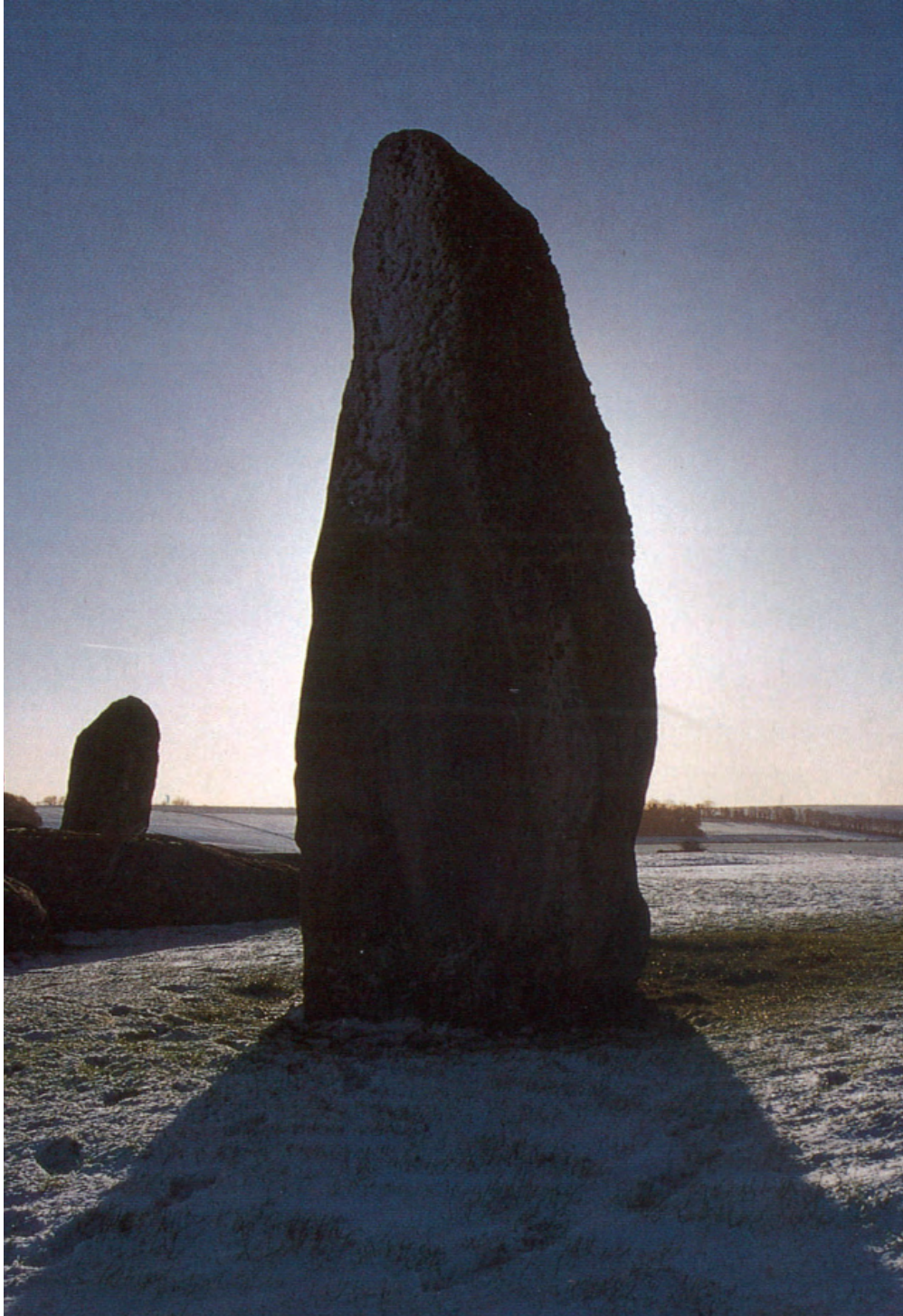
En efecto, desde un punto de vista gravitatorio el menhir reconoce tanto la verticalidad inherente al peso y la caída libre como la naturaleza telúrica de la gravedad, manifestada en la necesidad de un profundo contacto del monolito con la tierra³³, mientras que desde el punto de vista de la luz, aspira a relacionarse con la distante luz del Sol venida de lo alto, elevándose del suelo en un acto de desafío a las leyes de la gravedad. En la *Heel Stone*, como en otros tantos menhires, esta tensión arquitectónica entre lo gravitatorio y lo lumínico se formaliza, principalmente, en la progresiva variación en altura de su sección transversal, mayor en la parte inferior y menor, hasta el extremo de desaparecer, en la parte superior. Debido a esta diferencia de sección, se concentra más materia en la parte inferior del monolito que en su parte superior, hecho que conlleva un acercamiento del centro de gravedad de la piedra a la tierra, su lugar natural. Al mismo tiempo, la disminución de la sección en altura supone la progresiva sustitución de la pétreo y opaca materia pesante del menhir por la ligereza y la diafanidad de la luz. Se advierte, entonces, que ya en la elemental arquitectura del menhir se manifiesta la relación inversamente proporcional entre la gravedad y la luz descrita, milenios más tarde, por Aristóteles³⁴.

Sin embargo, no todos los monolitos responden a este esquema formal. En un intento de desprenderse de las imposiciones constructivas de la gravedad, algunos menhires -como los que componen las estructuras arquitrabadas del Stonehenge- fueron cuidadosamente trabajados con la intención de que no se produjera esta disminución transversal de la sección en altura, sino que ésta se mantuviera constante³⁵. También, aunque no se da el caso en el Stonehenge, existen en otros lugares megalitos enhiestos que

33. *Todas las piedras enhiestas del Stonehenge tienen entre una quinta y una tercera parte de su longitud enterrada bajo tierra a fin de asegurar su estabilidad.*

34. *Tal como apunta Aparicio en la cita que abre ese apartado, en los seres vivos también se manifiesta esta relación contrapuesta entre la luz y la gravedad. En las plantas se llama gravitropismo al crecimiento hacia abajo de las raíces en respuesta a la aceleración de la gravedad y fototropismo a la respuesta del vegetal frente al estímulo luminoso que induce a los tallos y a las hojas a crecer hacia arriba (ver HANGARTER, R. P. "Gravity, light and plant form" en Plant, Cell and Environment (1997) 20, pp. 796-800). No es de extrañar la sensibilidad de Aristóteles en relación a la dicotomía entre la luz y la gravedad si se tiene en cuenta que su física fue concebida por analogía con el funcionamiento de los seres vivos.*

Conviene no pasar por alto los comentarios de Vitruvio sobre esta cuestión cuando se refiere a las columnas que delimitan los foros: "Las columnas superiores se harán un cuarto menores que las de abajo, porque para sostener peso deben los cuerpos inferiores ser más firmes que los superiores, como también, porque debemos imitar la naturaleza de las plantas: por ejemplo, los árboles como el abeto, el ciprés o el pino, de los cuales ninguno deja de ser más grueso en su pie, y luego arriba se adelgazan y contraen con una disminución natural de la raíz hasta su copa. Luego si lo pide así la naturaleza de los vegetales, con razón los cuerpos superiores de un edificio deben ser menores que los de abaco, tanto en altitud como en grueso" (en nota al pie, el traductor apunta que "Vitruvio debería disminuir sus columnas desde su pie hasta el sumoscapo: y es probable que el éntasis o hinchazón de las columnas no fuera muy de su gusto, aunque lo dopta como cosa de los Griegos, maestros del Arte"). Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez libros de arquitectura. Madrid: Akal, 1987, pp. 108-109



F.14. Sombra proyectada por el monolito 16 del *Sarsen Circle* al oponerse al paso de los rayos solares sobre el paisaje natural.
RICHARDS, Julian: *Stonehenge: The eternal mystery in pictures*. London: English Heritage Guidebooks, 2011

fueron erigidos de tal manera que la parte de mayor sección se dispone, precisamente, en la parte superior del monolito, invirtiendo las relaciones lumínico-gravitatorias anteriormente apuntadas. Esta inversión se constituye como un paso más en el desafío gravitatorio que supone la propia erección de un menhir, pues altera de manera sustancial la relación entre *el arriba* y *el abajo*, entre la luz y la gravedad, pues la materia grave se encuentra en la parte superior, donde debería estar la luz, y la luz encuentra su espacio en la parte inferior, donde debería ser obstaculizada por la materia opaca.

Además de despertar en el espectador la conciencia de pertenencia al fenómeno gravitatorio, la disposición una gran piedra en una posición gravitatoriamente antinatural como es la vertical, introduce en el paisaje una singularidad artificial en la que está contenido el germen de la conciencia arquitectónica del *espacio*. Al oponerse con su masa opaca al paso de determinados rayos de luz, la sombra cambiante proyectada por el menhir despierta la conciencia de la naturaleza cíclica del tiempo y otorga, al espacio circundante, un sentido y una orientación. Cada momento del día y cada día del año esta sombra tiene unas proporciones y una orientación distintas y barre únicamente una determinada porción del espacio que rodea al monolito³⁶.

De la mañana a la noche la luz solar no cesa de modificar su dirección relativa con respecto a la Tierra aunque, en realidad, esta variación se debe al movimiento de la Tierra respecto al Sol. En la latitud donde se emplaza el Stonehenge la inclinación del rayo solar va desde los cero hasta los sesenta y dos grados con respecto al suelo, no alcanzando en ningún caso una inclinación totalmente vertical³⁷. Esta autonomía con respecto a la ineludible dirección vertical de la gravedad, evidentemente manifiesta en el Stonehenge, donde se rinde culto a un rayo solar prácticamente horizontal como es el de la salida del Sol en el solsticio de verano, presenta a la luz como un hecho natural no sujeto a la acción gravitatoria. En efecto, durante milenios esta autonomía direccional de la luz con respecto a la vertical gravitatoria indujo a los más eminentes científicos de la historia a concebir la luz como una realidad física ingrátida, es decir, carente de peso y con una rara constitución material³⁸. Por supuesto, la arquitectura no ha sido refractaria a esta idea

35. Algunos arqueólogos han observado que, a fin de enfatizar la verticalidad de los menhires, "los lados de los montantes del círculo exterior no son paralelos, sino que se van ahusando hacia arriba. Este ahusamiento no es siempre recto, sino curvado convexamente de una manera tal que recuerda la *éntasis*, nombre que recibe la ligera curvatura que se daba deliberadamente a las columnas de los templos griegos clásicos, y cuyo objeto, según se piensa, era dar una ilusión óptica de verticalidad" (CHIPPINDALE, Christopher: Stonehenge: en el umbral de la historia. Barcelona: Destino, 1989, p. 21). *En base a la supuesta existencia de éntasis en los soportes del Stonehenge, algunos han aventurado una posible influencia de la arquitectura de la Creta Minoica o la Grecia Micénica, únicos lugares donde se puede encontrar por las mismas fechas una arquitectura tan sofisticada* (ver CHIPPINDALE, Christopher: Stonehenge: en el umbral de la historia. Barcelona: Destino, 1989, pp. 230-244). *Sin embargo, esta supuesta éntasis, clara en la piedra enhiesta número 56 del Sarsen Trilithons Horseshoe, no se muestra de manera tan evidente en otras piedras enhiestas del conjunto.*

36. "La primera imposición de la voluntad del espíritu frente a la naturaleza, la primera oposición de un elemento construido por el hombre frente al Sol, quedó simbolizada en la erección del menhir y su grandeza reside en la concentración de toda la fuerza de la luz bajo una forma esencial. Es bastante improbable, sin embargo, que en este testimonio primigenio, surgido de la necesidad de trascender y manifestar su presencia en este mundo, existiera alguna intención de relacionarse conscientemente con la luz del sol". DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, vol. 1, p.95

"El sol determinó el ángulo ortogonal como el ángulo de la supremacía ya que lo ponía en relación con el hombre a través de su sombra. El hombre observó su sombra arrojada contra el plano del suelo y de esta manera aprendió de manera intuitiva la relación entre ambos y el ángulo ortogonal se hizo el más inmediato a la propia condición del hombre. El plano se constituyó en lugar, en una zona cualificada por la propia sombra". MONTERO FERNÁNDEZ, Francisco Javier: El Panteón: imagen, tiempo y espacio: proyecto y patrimonio. Sevilla: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2004, p. 118



F.15. Estructuras adinteladas del Stonehenge: a la izquierda, estructura del *Sarsen Circle*; a la derecha, trilito del *Sarsen Trilithons Horseshoe*. Fotografía del autor.

y, lo largo de la historia y con mecanismos proyectuales diversos, se ha esforzado en subrayar y contraponer la posible horizontalidad de la luz con la inevitable verticalidad gravitatoria.

En el menhir aparece ya la tensión arquitectónica provocada por el ineludible enfrentamiento con lo gravitatorio y la conveniente aspiración a lo lumínico. A lo largo de la historia el arquitecto ha mantenido una constante asimetría en la manera de trabajar con ambos fenómenos. Desde siempre, el arquitecto ha tenido la sensación de que contra la gravedad hay que luchar, de que se la debe intentar dominar y vencer. En cambio, la relación con la luz ha sido siempre mucho más amable, considerando que con ella hay que jugar y dialogar. Quizá esta diferencia de actitud pueda deberse al hecho de que la gravedad supone para la obra construida una constante amenazada de ruina, mientras que la aportación de la luz parece ser siempre positiva.

III.2.5. LA CUBRICIÓN DEL ESPACIO COMO PROBLEMA GRAVITATORIO

“Mientras reflexiono, mi mirada se pasea desde los monolitos verticales a los arquivadas: entre lo portante y lo portado se construye una relación plena. Esto es construir.”³⁹

Livio Vacchini

Hasta aquí el análisis del Stonehenge se ha centrado en los menhires, elementos monolíticos estructurales en equilibrio gravitatorio autoestable capaces de permanecer en pie. Pero la arquitectura precisa de algo más que de elementos verticales.

Parece ser que la palabra “Stonehenge” proviene de las raíces anglosajonas *stone*, que significa “piedra”, y *hang*, que significa “colgar”⁴⁰, en alusión a las piedras dispuestas a modo de entablamiento de la estructura arquivada continua del *Sarsen Circle* y de los cinco grandes trilitos del *Sarsen Trilithons Horseshoe*. Estas estructuras, sin parangón en la arquitectura megalítica europea⁴¹, se erigen como la constatación más elemental de que la arquitectura, en tanto que realidad material sometida a la acción de la gravedad terrestre, está

37. *Sólo en los trópicos, cerca del Ecuador, la luz solar llega a incidir ortogonalmente contra la superficie del globo terráqueo. Tal como se ha apuntado en el apartado II-5.4. La relación física entre la gravedad y la luz, la intensidad de la luz solar en la Tierra es mayor en el ecuador que en los polos, mientras que la intensidad de la gravedad en la Tierra es un poco mayor en los polos que en el ecuador, hecho que no hace más que reforzar la relación de contraposición entre la luz y la gravedad.*

38. *No es hasta finales del siglo XVIII que los científicos Michell, Laplace, Cavendish y Soldner se atrevieron a contemplar seriamente la posibilidad de que la luz pudiera realmente gravitar (ver apartado II-3.6. La interacción luz-gravedad después de Newton), hecho que demostró Einstein en su teoría de la relatividad general (ver apartado II-4.2.2. La gravitación de la luz en la relatividad general). Ver también el apartado II-5.4. La relación física entre la gravedad y la luz.*

39. VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 19. Stonehenge.*

40. *“El nombre ‘Stonehenge’, que es de origen sajón, viene de las raíces ‘stone’, que significa piedra, y ‘henge’ o ‘hang’, con el sentido de colgar. Se trata, pues, del lugar de las ‘piedras colgantes’, o sea, de los dinteles de piedra del círculo de arenisca silícea y herradura”. CHIPPINDALE, Christopher: Stonehenge: en el umbral de la historia. Barcelona: Destino, 1989, p.12. Esta apreciación parece entrar en contradicción con la idea defendida por Aubrey Burl, según la cual el nombre de Stonehenge vendría a referirse a la existencia en un mismo monumento megalítico de un henge y un crómlech de piedra (ver apartado III-2.3. La orientación de la luz solar).*

41. *“Tales trilitos son únicos entre los círculos de piedras de Gran Bretaña (...) No hay nada como esto. Es un verdadero templo megalítico, de piedras adinteladas de tamaño incomparable en Gran Bretaña”. BURL, Aubrey: The Stone circles of the British Isles. New Haven: Yale University Press, 1976, p. 314*

42. *La palabra dolmen procede del bretón, idioma en el que significa “mesa de piedra”, de dol, que significa “mesa”, y men, que significa “piedra”.*



F.16. Vista del trilito 53-54 desde el interior del Sarsen *Trilithons Horseshoe*. Fotografía del autor.

formada por cuerpos pesantes que, en algunas ocasiones, tienen la misión de soportar también el peso de los demás. Entre lo portante y lo soportado se establece entonces una relación gravitatoria totalmente arquitectónica. La trilitica estructura del Stonehenge se erige como el preludio de la clásica unidad estructural sobre la que se ha construido gran parte de la arquitectura de toda la historia: el entablamento soportado por dos columnas.

Si la disposición vertical de una piedra de proporciones alargadas hace del menhir un objeto arquitectónico gravitatoriamente inverosímil, la colocación horizontal de una pesada roca sobre otras verticalmente dispuestas -es decir, la construcción de un *dolmen*⁴²- aumenta notablemente la magnitud del artificio. Al no colocarse esta piedra de acuerdo con la natural dirección vertical de la gravedad, sino sobre su perpendicular, aumenta considerablemente la dificultad de transmitir su peso a la tierra⁴³ (con la que ya no mantiene contacto directo) y, con ello, aumentan también las expectativas de caída⁴⁴. En la resolución de un problema de tal *gravedad* reside, precisamente, el principal fin y la mayor dificultad de la arquitectura: la construcción del espacio arquitectónico mediante su cubrición.

Las primeras estructuras con las que la arquitectura se inició en la conquista del espacio cubierto fueron gravitatoriamente concebidas como *estructuras resistentes*. En efecto, las piedras enhiestas que forman las estructuras arquitebadas del Stonehenge deben encauzar, y al mismo tiempo resistir, el peso de la piedra a la que sirven de apoyo. El soporte estructural evoca el esfuerzo vertical hacia abajo del peso y la reacción resistente en sentido contrario. El monolito horizontal, por su parte, debe ser capaz de transmitir horizontalmente su peso a las dos que le sirven de sustento, resistiendo mediante la cohesión interna de la materia que la conforma la deformación y los esfuerzos de flexión⁴⁵ provocados por la atracción gravitatoria sobre la parte libre de apoyos.

Es a causa de la gravedad que aparece en la arquitectura la distinción fundamental entra lo vertical y lo horizontal⁴⁶. Mientras que en la primera se produce una variación en la intensidad de la atracción gravitatoria que induce a los cuerpos a desplazarse en esa misma

43. "La labor de transmisión de las cargas en una edificación plantea un problema especialmente complejo: el desplazamiento horizontal de las cargas desde los elementos que cubren el espacio hasta la perpendicular de los cimientos que son periféricos al mismo. La cobertura del espacio introduce pues un problema especialmente difícil porque sus piezas deben apoyarse en elementos que, en planta, están alejados de ellas". *PARICIO ANSUATEGUI, Ignacio: La Construcción de la arquitectura. Los elementos (3ª ed). Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, 1996, p.11*

44. *Tal como se puede ver en el esquema inferior (RICHARDS, Julian: Stonehenge: The story so far. Swindon: English Heritage, 2007, p. 23), tanto en el Sarsen Circle como en el Sarsen Trilithons Horseshoe "la posición de los dinteles se asegura mediante el sistema de caja y espiga propio de la carpintería. En la parte superior de cada una de las piedras verticales ha sido dejada una pequeña protuberancia. En la parte inferior de cada dintel, situado cerca del final de la pieza y con una forma en negativo de la protuberancia antes mencionada, hay una hendidura. Este sistema es más propio de los carpinteros que de los trabajadores de la piedra, hecho que indica una cierta familiaridad con las técnicas de la carpintería por parte de los constructores de la Edad de Bronce que construyeron esta estructura. (...) Este sistema de ensambladuras en caja y espiga (...) evita el deslizamiento del dintel". HAWKINGS, Gerald S.: Stonehenge decoded. Fontana: Collins, 1977, p. 78*



45. "Allí donde se disponía de materiales naturales en piezas de ciertas dimensiones fue posible siempre recurrir a su cohesión para encomendarles ciertos esfuerzos de tracción: los que se derivan de su uso como elementos flectados". *PARICIO ANSUATEGUI, Ignacio: La Construcción de la arquitectura. Los elementos (3ª ed). Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, 1996, p.14*



F.17. Vista del trilito 57-58 desde el interior del Sarsen Trilithons Horseshoe. Fotografía del autor.

dirección, en la segunda la variación de la intensidad de dicha fuerza es nula, y esta diferencia ha tenido una importancia capital en el diseño de las estructuras resistentes. No debe de extrañar, pues, que en el sistema estructural el arquitrabado se produzca una distinción tan clara entre los elementos verticales y los horizontales⁴⁷. En el Stonehenge, donde la factura técnica de los monolitos es muy superior a la del resto de monumentos megalíticos de Europa, se establece una precisa relación entre lo horizontal y lo vertical. Es por ello que, como contrapunto a la verticalidad de los soportes, se exige a los arquitrabes del *Sarsen Circle* una absoluta horizontalidad⁴⁸, cuestión de una gran dificultad técnica si se tienen en cuenta los treinta metros de diámetro de dicha estructura y la inclinación del terreno sobre el que fue construida.

La combinación de la dificultad gravitatoria que plantea la cubrición del espacio y las limitaciones de la técnica estructural de la prehistoria es, sin duda, la responsable de la desproporcionada relación entre la carga y el soporte que se puede observar en las estructuras arquitrabadas del Stonehenge. Tanto en la estructura continua del *Sarsen Circle* como en los trilitos del *Sarsen Trilithons Horseshoe*, la masa portante supera, con mucho, a la masa soportada⁴⁹, una relación que a lo largo de la historia, y de manera especial durante el último siglo y medio, se ha invertido notablemente.

III.2.6. EL NACIMIENTO DE LA LUZ ESTRUCTURAL

*“El trilito aparece en este caso en toda su expresividad primigenia, con los enormes pilares y los poderosos arquitrabes; el muro se ha abierto finalmente a la luz, transformándose en columna. Cuesta creer que sólo hayan pasado cinco mil años desde esta invención, la invención que captura la luz”.*⁵⁰

Livio Vacchini

Los materiales con que la arquitectura ha transmitido los efectos de la gravedad, es decir, los materiales estructuralmente resistentes,



F.18. Dintel curvo del *Sarsen Circle*. RICHARDS, Julian: *Stonehenge: The story so far*. Swindon: English Heritage, 2007, p. 24

46. “A causa de la fuerza gravitatoria aparece el concepto de lo horizontal y lo vertical. (...) Si el espacio gravitatorio se ve polarizado por el arriba y por el abajo, por lo horizontal y lo vertical, un espacio sin gravedad, leve, es adireccional. (...) Dicho de otra manera, el espacio arquitectónico horizontal y el vertical es el resultado y la expresión de la gravedad”. APARICIO GUIASADO, *Jesús María*: *Construir con la razón y los sentidos*. Buenos Aires: Nobuko, 2008, pp. 76-79

“Nada hay tan congénito en la arquitectura de todos los tiempos como la horizontalidad de los pisos y la verticalidad de la gravedad”. TORROJA MIRET, *Eduardo*: *Razón y ser de los tipos estructurales (3a Ed)*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007, p. 275

“Todo para dar a la construcción toda la solidez posible, para conformarla a las leyes de la gravedad, para asegurar la estabilidad de las partes verticales y proporcionar un soporte sólido a las horizontales”. HEGEL, *Georg Wilhelm Friedrich*: *La Arquitectura (3a Ed)*, Barcelona, Kairós, 2001, p. 88

“La estructura ortogonal puede interpretarse como la simbolización de la inteligencia organizativa humana en relación con la experiencia de la superficie horizontal de la tierra y de la fuerza de la gravedad”. NORBERG-SCHULZ, *Christian*: *La arquitectura romana, en Arquitectura occidental: la arquitectura como historia de formas significativas*. Barcelona: Gustavo Gili, 1983, p. 27

“Las actividades del hombre se desarrollan fundamentalmente sobre un plano horizontal y necesitan que el espacio delimitado se extienda, sobre todo, en horizontal. La sustancia de la envolvente espacial, debido a la atracción de la gravedad, desarrolla en cada elemento una dinámica vertical que tiende a anular el volumen espacial. El conflicto entre las dos direcciones, la de la atracción gravitatoria y la de las actividades del hombre, es la causa primigenia de la necesidad de estructuras en edificación. Mediante las estructuras se redirigen los pesos propios en dirección horizontal y, de acuerdo con los requisitos del volumen espacial, se transmiten al suelo”. ENGEL, *Heino*: *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001, p. 38

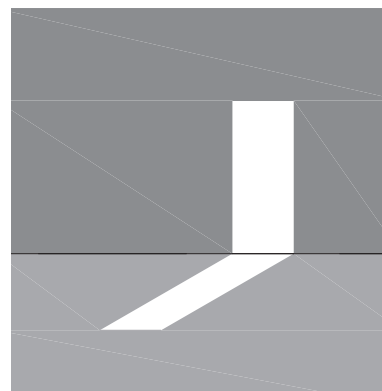
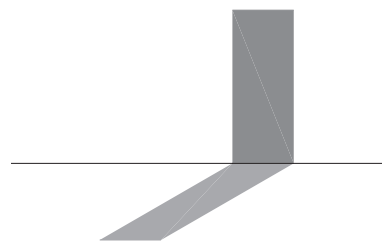


F.19. Trilito 21-22 de la estructura adintelada del Sarsen *circe*: sombra proyectada y luz estructural. www.flickr.com

han sido siempre opacos, hecho que ha inducido a la idea de que allí donde la gravedad manifiesta sus efectos no hay lugar para la luz y viceversa. Si el ser humano hubiera tenido a su alcance materiales estructurales translúcidos la historia de la arquitectura hubiera sido muy distinta ⁵¹.

Como se ha apuntado anteriormente, la materia opaca del menhir impide el paso de determinados rayos de luz y provoca la creación de una sombra arrojada. Éste es, sin duda, el acto arquitectónico más elemental en lo concerniente a la luz: la construcción de una sombra rodeada de luz. Pero, con la erección del trilito, el arquitecto prehistórico dio un paso más. La sombra de la viga con que se cubre el espacio libre entre los dos soportes une las sombras de los dos monolitos que le sirven de apoyo. Así construida y a pesar de estar rodeada de luz, la sombra aísla una pequeña porción de luz que ilumina el espacio cubierto por la materia grave. Esta luz atrapada entre las sombras adquiere, entonces, un carácter muy distinto al del resto de la luz natural: es ya una luz arquitecturizada. Se evidencia, pues, que la construcción de esta luz arquitectónica, inherente a la espacialidad de toda obra de arquitectura, necesita previamente la construcción de una sombra ⁵². El arquitecto prehistórico del Stonehenge no se contentó con señalar la luz naciente del solsticio de verano mediante la sombra de la *Heel Stone*, sino que además erigió la estructura arquiteada del *Sarsen Circle* para construir una sombra que aislara esa luz de su entorno.

Sólo por el hueco formado por los dos soportes y el elemento de cubrición, es decir, sólo por allí donde no hay estructura, ni masa, ni peso... penetra la luz. Es entonces cuando la distancia libre de gravedad entre dos soportes estructurales recibe, en nuestro idioma, el nombre de "luz estructural" ⁵³. Mientras que la construcción muraria parece obedecer únicamente a las leyes de la gravedad, la construcción arquiteada reconoce también el papel fundamental de la luz. Supuesta la opacidad de la cubrición espacial, el soporte estructural se convierte, entonces, en un elemento arquitectónico importantísimo que, además de transmitir la gravedad, libera el espacio y permite el paso de la luz.



F.20. Arriba el menhir: sombra en la luz.

Abajo el trilito: luz en la sombra.

Esquemata del autor.

47. "La estructura arquiteada es la forma estructural más clara, sencilla y autosuficiente de relacionar en equilibrio pesos y soportes. Una estructura que se limita a utilizar horizontales y verticales frente al extenso y aparentemente caótico mundo formal existente en la Naturaleza" *INIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p.27*

48. "La profundidad a que las piedras están hincadas en la tierra se ajustó de modo que la línea formada por su parte superior se acerque mucho a la horizontal, aun cuando la longitud real de las piedras varíe algo y el terreno en que están hincadas tenga un poco de pendiente". *CHIPPINDALE, Christopher: Stonehenge: en el umbral de la historia. Barcelona: Destino, 1989, p. 21*

49. En el caso de la estructura porticada del Sarsen Circle, se estima el peso de las piedras enhiestas en unas 25 toneladas y se calcula que los dinteles pesan otras 7. Sobre cada soporte se apoya a lado y lado un dintel, de manera que la relación entre la masa portada y la portante es de $7t / 25t = 0,28$. En el caso de los trilitos del Sarsen Trilithons Horseshoe, se estima el peso medio de las piedras enhiestas en unas 45 toneladas y el de los dinteles en unas 16. Sin embargo, aquí cada dintel está soportado por dos menhires que no soportan otra carga, de modo que la relación entre la masa portada y la portante es de $16t / 45x2t = 0,18$. En ambos casos, el valor es inferior a 1, lo que significa que la masa de soporte es mayor que la soportada.



F.21. Sombras proyectadas durante el solsticio de verano. Visión de la Heel Stone a través de los monolitos 31 y 1 del *Sarsen Circle*. www.flickr.com

Cada una de las estructuras arquitecónicas del Stonehenge están constituidas únicamente por tres megalitos y, precisamente por ello, Stukeley las denominó “trilitos”⁵⁴. Esta decisión, que obligó a los constructores del Stonehenge a traer grandes monolitos desde las lejanas Prescelly Mountains (situadas a más de doscientos kilómetros del Stonehenge), garantiza el correcto funcionamiento mecánico de los distintos elementos estructurales confiando en la cohesión interna de la piedra. El uso de un único monolito capaz de resistir por sí mismo los efectos de la gravedad es al mismo tiempo la solución al problema de la cubrición y su principal inconveniente, pues la luz estructural queda entonces restringida a la longitud del monolito utilizado⁵⁵. En combinación con la desproporción ya comentada entre lo portado y lo portante, este hecho supone que la relación entre el soporte estructural y la luz liberada en las estructuras del Stonehenge sea tal que la opacidad del soporte supere ampliamente la luz de la estructura⁵⁶. Sin embargo, a lo largo de la historia la relación entre el soporte y la luz estructural se ha optimizado de tal manera que ha llegado a cotas inimaginables.

En tanto que gravitatoriamente ineludible y lumínicamente opaca, la estructura resistente se convierte en un elemento importantísimo en las posibilidades de construir la luz y, por tanto, en la manera de cualificar el espacio arquitectónico. Así ha sido durante toda la historia de la arquitectura, desde sus inicios hasta hoy.

III.2.7. LA RESISTENCIA A LA GRAVEDAD Y LA OPOSICIÓN A LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO EXTERIOR

El Stonehenge es una obra maestra de la arquitectura en la que se pueden apreciar las más elementales intuiciones arquitectónicas en torno a las cuestiones fundamentales sobre la relación espacio-estructural entre la gravedad y la luz que, durante varios milenios, han estado invariablemente presentes en toda obra construida.

La construcción del Stonehenge demuestra que, en realidad, la arquitectura es un artificio gravitatorio pues, solamente desafiando

50. VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): Obras maestras. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 18. Stonehenge.

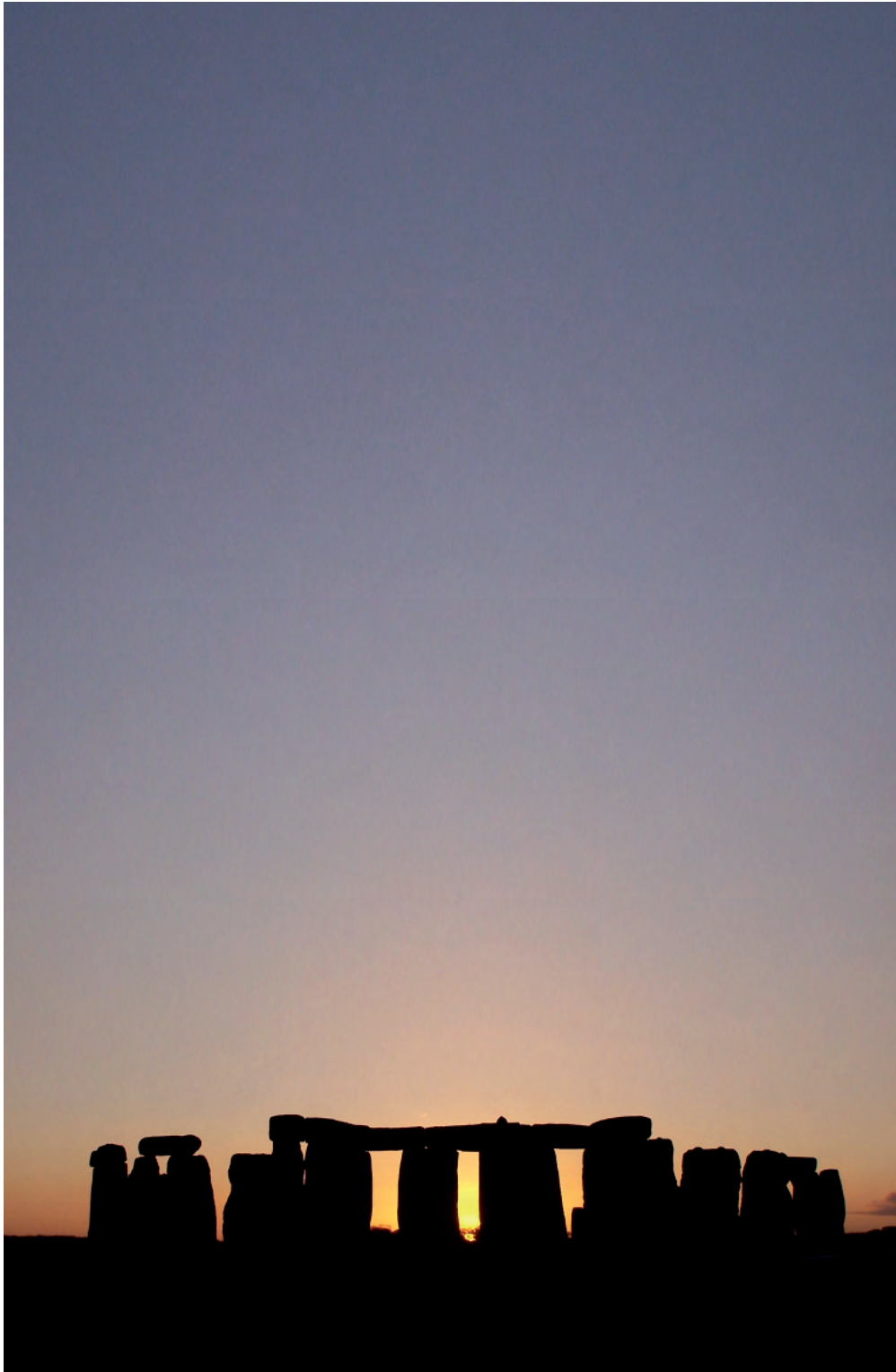
51. A mediados del siglo XX empieza a parecer realizable la utopía de las estructuras traslúcidas.

52. “Aunque construyan con luz y con peso, los arquitectos son constructores de sombras.” MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís: Intersecciones. Alcorcón (Madrid): Rueda, 2004, p. 68

“Si no existiesen las sombras, viviríamos en la insoportable aridez de la superficie devorada por la luz. Para contrarrestar este efecto cegador debemos construir sombras, arrojar sombras sobre la superficie completamente iluminada y absolutamente uniforme, y, de esta forma, paradójicamente, sacar de la luz todos aquellos objetos contenidos bajo su manto homogenizador. Por tanto, de la interacción entre la luz y los elementos creados para generar sombra depende, en gran medida, la configuración del espacio. Es inevitable la utilización de la sombra, sea ésta positiva o negativa, y, en muchos casos, comprobamos cómo extrae de los paramentos el armazón sobre el que se sustentan nuestras propuestas”. DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, vol.1, p. 82

53. “Me gusta que en nuestra lengua se confunda la luz natural con la luz estructural, la luz natural con ese salto que cualquier construcción realiza al hacer posible el milagro de un techo”. MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís: La luz es el tema: la luz humana, en Revista Diagonal nº 31, marzo 2012, p. 32

54. “El término ‘trilito’ fue acuñado por William Stukeley (de la palabra griega ‘tres’ y ‘piedras’), y simplemente designaba un par aislado de piedra enhiestas cubiertas por un dintel”. NORTH, John: Stonehenge: a new interpretation of prehistoric man and the cosmos. New York: The Free Press, 1996, p. 419



F.22. Conjunto del Stonehenge durante la puesta de Sol del solsticio de invierno. www.panoramio.com

unas leyes físicas a las que ineludiblemente debe obedecer, el ser humano es capaz de tomar conciencia de su pertenencia a los efectos de la gravedad. En sus megalitos enhiestos se percibe la conciencia de la caída y el peso, los dos fenómenos fundamentales de la gravedad.

Estos elementos estructurales, siempre pesantes, en ocasiones deben soportar también el peso de otros elementos que conforman la estructura, estableciéndose entre lo portante y lo portado una relación gravitatoria totalmente arquitectónica. Dado que los fenómenos gravitatorios del peso y la caída son autoexcluyentes, se descubre que, pese a las dificultades que plantea el peso, la finalidad última de la arquitectura es procurar su correcta transmisión a fin de evitar su propia caída.

En estas estructuras arquitecadas se manifiesta la verticalidad inherente a la gravedad y la ineludible horizontalidad de la cubrición espacial. Desde el Stonehenge hasta el Partenón, estas primigenias estructuras fueron concebidas como *estructuras resistentes*, pensadas para oponer resistencia a los efectos de la gravedad sobre la materia construida. Son éstas estructuras pesadas y masivas que, con el paso del tiempo, la arquitectura ha pretendido aligerar, no sólo para optimizar la relación entre lo portante y lo portado, sino para construir más espacio con menos estructura.

En el Stonehenge se evidencia también cómo a lo largo de la historia la arquitectura ha intentado establecer algún tipo de relación consciente y precisa con la luz, reconociendo su proyección rectilínea y cambiante, orientándose hacia el Sol. La importancia arquitectónica de la luz solar radica en su capacidad para cualificar el espacio. Pero esta luz arquitectónica sólo puede conseguirse construyendo, previamente, una sombra. En tanto que gravitatoriamente ineludible y lumínicamente opaca, la estructura resistente se convierte en un elemento importantísimo en las posibilidades de construir esta luz y, por tanto, en la manera de cualificar el espacio arquitectónico. Nace así la noción de *luz estructural* como intersticio material sin gravedad inundado por la luz. Desde entonces, en su deseo de construir el

55. En elementos sometidos a flexión el esfuerzo máximo y la deformación no dependen tanto del peso del elemento de cobertura, sino de la distancia a cubrir. El cálculo del momento flector responde a una expresión del tipo $M=Q \cdot L^2/X$ y el de la deformación es $F=X \cdot Q \cdot L^4/E \cdot J$ (siendo M el momento flector, F la deformación, Q la carga, L la distancia, E el módulo de elasticidad longitudinal del material, J el momento de inercia de la sección resistente y X un valor variable en función de la casuística de los apoyos). Se evidencia en ambas expresiones que la incidencia de la longitud en el valor del momento flector y la flecha es mucho mayor que la de la carga. De ahí que la dificultad de la cubrición espacial no aumente proporcional sino exponencialmente de acuerdo con el aumento de la distancia a cubrir. Así, a la restricción que supone para el deseado aumento de la luz estructural la dependencia de la dimensión máxima del elemento empleado (sea un tronco o un monolito), debe sumarse también el aumento exponencial de los esfuerzos y las deformaciones. Es por ello que en la antigüedad la arquitectura tuvo que conformarse con estructuras que, pese a mostrar una gran robustez, no podían aspirar a grandes luces.

56. En el caso de la estructura porticada del Sarsen Circle, el soporte mide unos 2 metros de ancho y se consigue 1,3 metros de luz, obteniendo una relación luz/soporte de $1,3/2,0=0,65$. En los trilitos del Sarsen Trilithons Horseshoe, el soporte mide unos 2,3 metros de ancho y se liberan solamente unos 30 centímetros de luz, obteniéndose una relación de tan sólo $0,3/2,3=0,13$, muy inferior a la del círculo adintelado. En ambos casos, el valor es inferior a 1.

espacio mediante la luz, la arquitectura se ha esforzado en construir estructuras cada vez de mayor *luz estructural*.

En el Stonehenge se manifiesta de manera elemental el carácter contrapuesto y excluyente que se ha atribuido siempre a la gravedad y a la luz. La gravedad ha sido siempre relacionada con el peso, la oscuridad y el descenso hacia lo telúrico. La luz ha sido vinculada siempre a la levedad, la diafanidad y el ascenso hacia lo etéreo. Y, desde siempre, el arquitecto ha tenido la sensación de que para minimizar la oposición estructural a la luz no solamente hay que resistir los efectos de la gravedad sino que, además, hay que superarla.

EL ENCAUZAMIENTO DE LA GRAVEDAD Y LA INTERIORIZACIÓN DE LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO INTERIOR

III.3.1. El Pantheon de Roma

III.3.2. La luz y la sombra como secuencia espacial

III.3.3. La forma de la gravedad clásica

III.3.3.1. La tectónica de la estructura arquiteada

III.3.3.2. La ligereza inclinada como mecanismo de cobertura espacial

III.3.4. El espacio estructurado por la curvatura de la gravedad

III.3.4.1. Del dintel al arco: la gravedad como necesidad estructural

III.3.4.2. La curvatura intrínseca de la gravedad

III.3.4.3. La mecánica gravitatoria del espacio estructural

III.3.4.4. La tectónica aparente de la estructura

III.3.5. La luz como presencia espacial y ausencia gravitatoria

III.3.5.1. La estructura física de la luz ocular

III.3.5.2. La ingravidez de la luz reflejada

III.3.6. El encauzamiento de la gravedad y la interiorización de la luz en la estructuración del espacio interior



F.01. Imagen aérea del entorno actual del Pantheon de Roma. www.maps.google.com

III.3.1. EL PANTHEON DE ROMA

*“La imponente masa del Panteón, cuya forma esférica ideal hace patente la potencia aplastante de ese espacio al conjuro del sol que atraviesa el óculo magnífico, se levanta en inefable movimiento como si de una levitación se tratara. La Luz venciendo a la Gravedad convoca a la Belleza sublime.”*⁰¹

Alberto Campo Baeza

En el Pantheon de Roma se descubre una nueva manera de comprender la naturaleza de la gravedad que, en conjunción con el uso de una tecnología estructural sin precedentes, inaugura un modo de cubrición espacial en el que la luz se convierte en el elemento esencial de una nueva concepción del espacio arquitectónico. Así pues, el Pantheon se constituye, al mismo tiempo, como origen y paradigma de una importante serie de cuestiones invariablemente presentes en buena parte de la historia de la arquitectura.

El primer Pantheon fue edificado entre el 29 y el 19 a.C. por Marco Vipsanio Agripa (63 a.C.-12 a.C.), un influyente político y militar a las órdenes del emperador Cayo Julio César Augusto. Este templo dedicado a todos los dioses del panteón romano⁰² fue erigido en el Campo de Marte, un área por entonces prácticamente libre de edificaciones situada en la parte occidental de la ciudad de Roma. El edificio estaba orientado hacia el norte, en dirección al Mausoleo de Augusto, un edificio circular construido también por Agripa. Se cree que ambos edificios quedaron visualmente unidos mediante una línea de árboles que atravesaba una vasta extensión verde a modo de parque⁰³. Aunque en la actualidad se poseen muy pocos datos sobre este primer Pantheon, parece ser que pudo haber estado constituido por un pórtico exterior que servía de acceso a un volumen cilíndrico probablemente cubierto con un techo de madera⁰⁴.

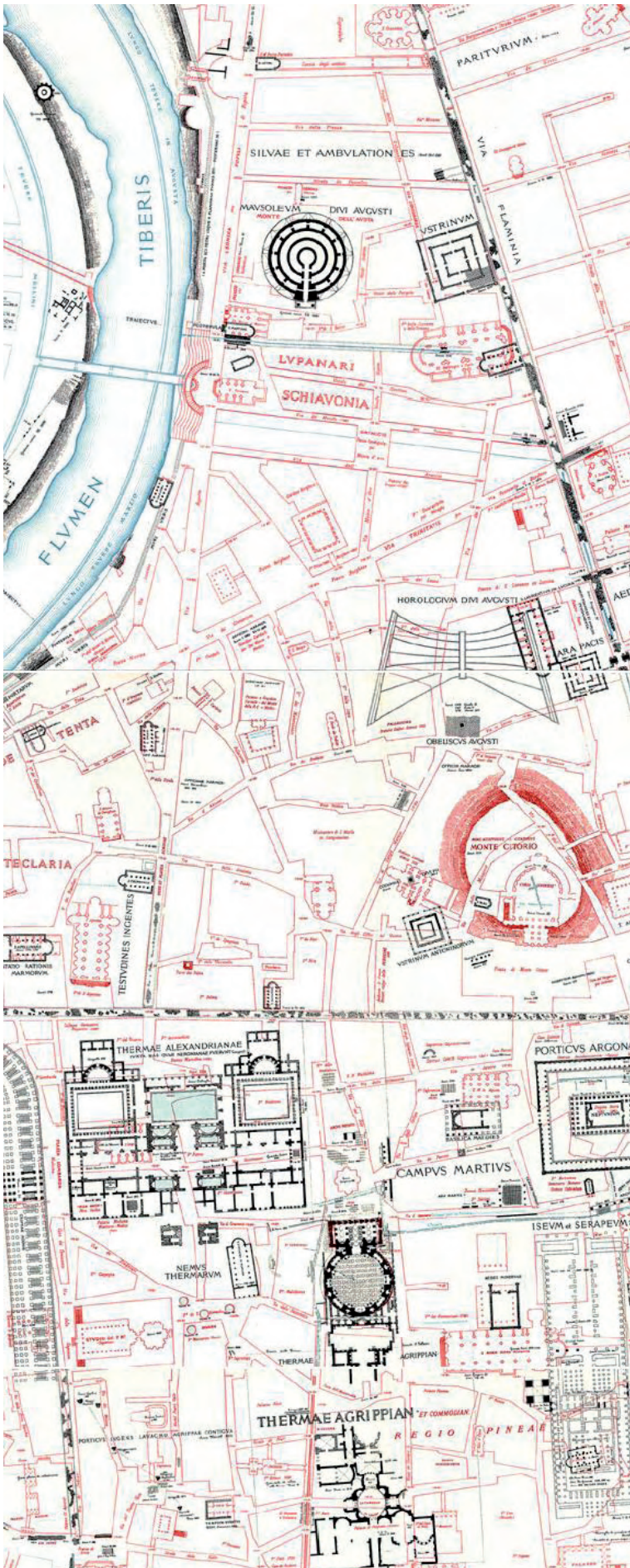
El Pantheon de Agripa sufrió varios incendios y fue reconstruido parcialmente en diversas ocasiones siguiendo el modelo original, hasta que finalmente, entre los años 118 y 128 d.C.⁰⁵, el emperador

01. CAMPO BAEZA, Alberto: La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996, p.79. Idea, luz y gravedad Idea, luz y gravedad, bien temperadas. Sobre las bases de la arquitectura (1995).

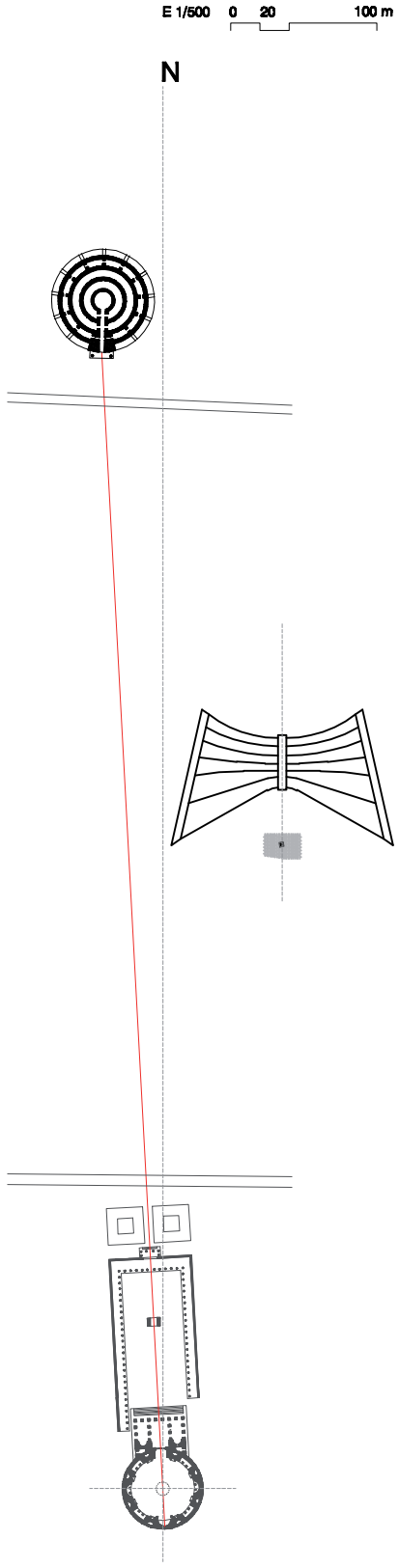
02. El término “panteón” es utilizado tanto para referirse a un conjunto de dioses -en este caso, los romanos-, como al templo consagrado al culto conjunto de estas divinidades.

03. “El edificio original de Agripa fue uno de los tres edificios cívicos y religiosos por él erigidos en esta área del Campus Martius. Los tres estaban alineados sobre el eje nortesur, con el Pantheon al norte, entonces la basílica de Neptuno y, finalmente, las Termas de Agripa, extendiéndose hacia el sur hacia el Largo Argentina. El Pantheon de Agripa se abría a una vasta extensión del Campus Martius que fue desarrollada en tiempos de Augusto con construcciones en sus lados norte y noreste: el Mausoleo de Augusto, el Ara Pacis, y el Horologium. El espacio entre el Pantheon y el Mausoleo pudo estar configurado por una línea de árboles plantados por Agripa con la finalidad de formar un parque real que conectara visualmente los dos monumentos”. STAMPER, John W.: The Architecture of Roman temples: the republic to the middle empire. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, p. 186

04. “El pronaos original estuvo en la misma situación que el actual, y la cela podría haber sido circular, posiblemente cubierta con un techo de madera”. STAMPER, John W.: The Architecture of Roman temples: the republic to the middle empire. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, p. 128. Existe también la teoría de que la planta del Pantheon de Agripa tuvo que ser rectangular.



F02. Entorno urbano del Pantheon con ubicación de las antiguas construcciones del Campo de Marte.
LANCIANI, Roberto: *Forma Urbis Romæ* (1893-1901), láminas VIII y XIV.



F03. Esquema de la desviación con respecto al norte.
Dibujo del autor.

Adriano (76-138 d.C.) mandó erigir, en el mismo emplazamiento, un nuevo y renovado Pantheon. En base al reconocido interés de Adriano por la arquitectura, hay quien señala al propio emperador como posible autor del diseño del nuevo templo aunque, a fecha de hoy, no existe ninguna información que permita establecer con certeza la autoría de esta obra maestra de la arquitectura.

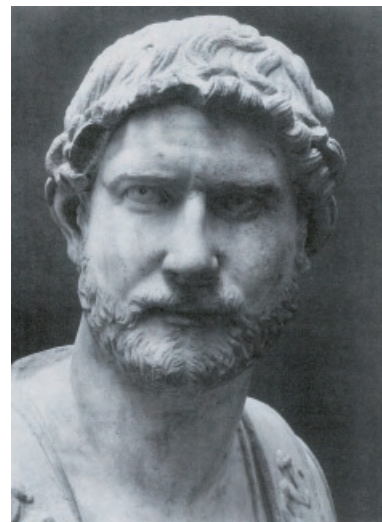
En lo esencial, puede considerarse el Pantheon original de Adriano constituido por un patio o plaza de aproximación, un pórtico de acceso y un espacio interior cubierto por una gran cúpula. A lo largo de sus casi diecinueve siglos de vida, tanto las distintas partes del edificio como su entorno han sufrido todo tipo de modificaciones y transformaciones⁰⁶ que, sin embargo, no han logrado alterar, en lo fundamental, su cualidad arquitectónica. Considerado por muchos lugar de culto y celebración de la espacialidad interior asociada al hecho arquitectónico, el Pantheon se constituye como una obra de indiscutible valor para el estudio de la intrínseca relación espacio-estructural entre la gravedad terrestre y la luz solar.

III.3.2. LA LUZ Y LA SOMBRA COMO SECUENCIA ESPACIAL

“La adecuada combinación de luz y sombra suele despertar en la arquitectura la capacidad de conmovernos en lo más profundo, suele arrancarnos las lágrimas y convocar a la belleza y al silencio.”⁰⁷

Alberto Campo Baeza

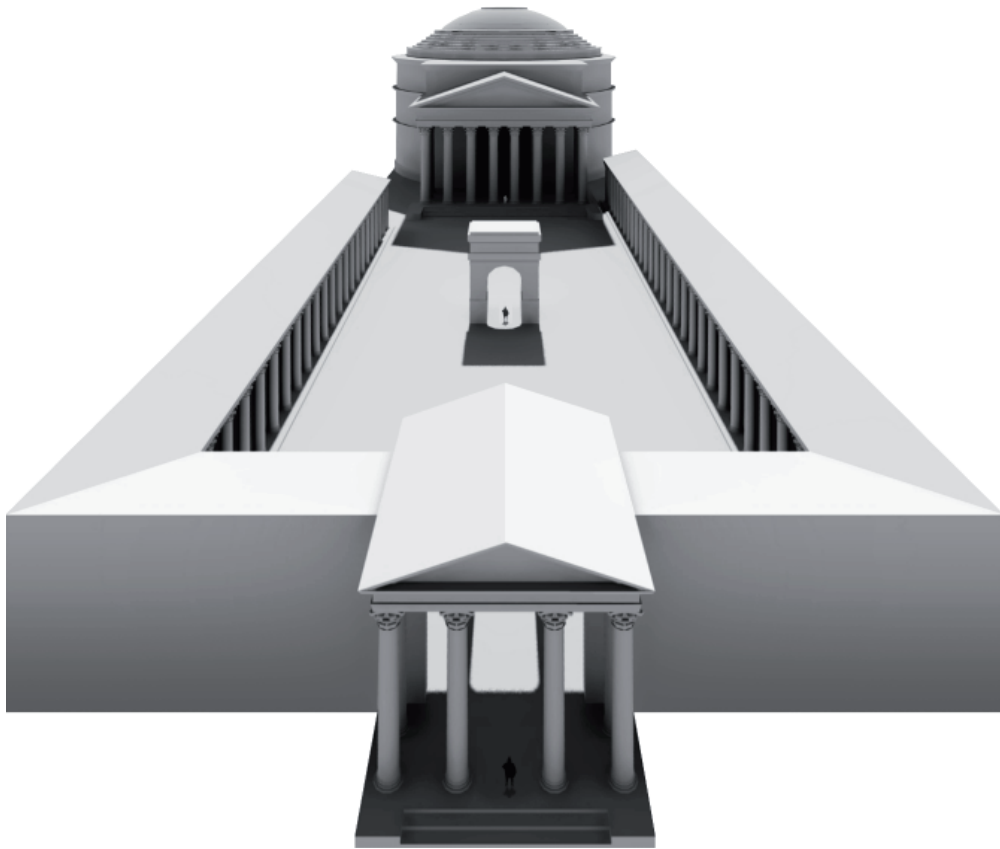
Aunque en todos los trabajos de investigación sobre el Pantheon se incide en la importancia arquitectónica y simbólica de la luz del Sol en la configuración de su espacio interior, prácticamente en ninguno de ellos se presta atención alguna a la secuencia espacial y lumínica que, con toda seguridad, debía producirse durante la aproximación al templo a lo largo de su eje principal. A la luz de las evidencias arqueológicas, es unánime la opinión de que originalmente el Pantheon de Adriano no estuvo formado únicamente por el templo que ha llegado hasta nuestros días sino que, además, existió un gran



F.04. Busto del emperador Adriano (76-138 d.C.). STAMPER, John W.: *The Architecture of Roman temples: the republic to the middle empire*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, p. 185

05. La obtención de esta fecha viene determinada por los sellos de los ladrillos con que fue construido el Pantheon actual, que datan de entre el 120 y el 125, de manera que las obras tuvieron que empezar un poco antes. Por otro lado, se sabe que Adriano estuvo en Roma entre el 125 y el 128, de modo que la consagración se debió producir hacia finales de este periodo. Para más información, ver STAMPER, John W.: *The Architecture of Roman temples: the republic to the middle empire*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, p. 186, y MONTERO FERNÁNDEZ, Francisco Javier: *El Panteón: imagen, tiempo y espacio: proyecto y patrimonio*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2004, p. 94, nota 20

06. Eduardo De Miguel expone las transformaciones que ha sufrido el Pantheon, ordenándolas en cuatro categorías: transformaciones de uso, de aislamientos, de adición y de “mejora” (ver DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, pp. 118-139). Por su parte, Francisco Javier Montero dedica un capítulo a exponer cronológicamente estas transformaciones hasta el año 1993 (ver MONTERO FERNÁNDEZ, Francisco Javier: *El Panteón: imagen, tiempo y espacio: proyecto y patrimonio*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2004, pp. 71-100).



F.05. Vista frontal elevada de la hipotética reconstrucción del conjunto del Pantheon. Infografía del autor.



F.06. Fotografía de la maqueta Zona di Campo Marzio, realizada por Italo Gismondi y expuesta en el Museo della cività romana en el E.U.R.

WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 305

espacio exterior de acceso en su lado norte. La práctica desaparición de los elementos arquitectónicos que configuraban este espacio no parece motivo suficiente para eludir la posibilidad de analizar, también, el papel que debió tener la luz en la configuración de este arquitectónico recorrido exterior.

Agripa orientó el primer Pantheon hacia el Mausoleo de Augusto, situado a unos ochocientos metros en dirección norte, con la intención de relacionar visualmente ambos edificios. Sin embargo, cuando Adriano decide reedificar el templo, el emplazamiento se encuentra inmerso ya en un entorno urbano mucho más denso y consolidado en el que el espacio verde y la arboleda de Agripa han sido sustituidas por la masa construida de la ciudad de Roma, quedando impedida la relación visual que se establecía con anterioridad entre el Mausoleo y el Pantheon. A pesar de ello, el templo de Adriano reconoce y mantiene la orientación original de su predecesor y queda perfectamente encarado hacia el acceso del Mausoleo de Augusto. Así pues, por motivos simbólicos y urbanos, la orientación del templo fue para el arquitecto una variable proyectual inamovible⁰⁸.

Como respuesta a la densidad urbana donde se circunscribe el nuevo Pantheon, se decide dotar al templo de una gran plaza alargada a modo de recinto de aproximación⁰⁹ orientado hacia el norte. Este espacio se delimita en tres de sus lados por una *stoa*, un pórtico cubierto formado en su lado interior por una sucesión de columnas y en su cara exterior por un muro. En el lado norte de la *stoa*, sobre el eje longitudinal de la plaza y del Pantheon, se construye una puerta monumental de acceso al recinto a modo de *propileo*. El lado sur del patio, en cambio, está delimitado por el gran pórtico de acceso al interior del templo. Sobre el eje de la plaza se yergue solitario el *Arcus Pietatis*, un arco de triunfo de un solo vano.

El eje longitudinal del Pantheon se alinea de acuerdo con la orientación del conjunto del Campo de Marte, una dirección que se desvía aproximadamente unos cinco grados hacia el oeste con respecto al norte¹⁰. Aunque se han aventurado varias teorías, lo cierto es que se desconoce el motivo de esta desviación.

07. CAMPO BAEZA, Alberto: Pensar con las manos. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 69. Light is much more: Sobre la luz, 2008

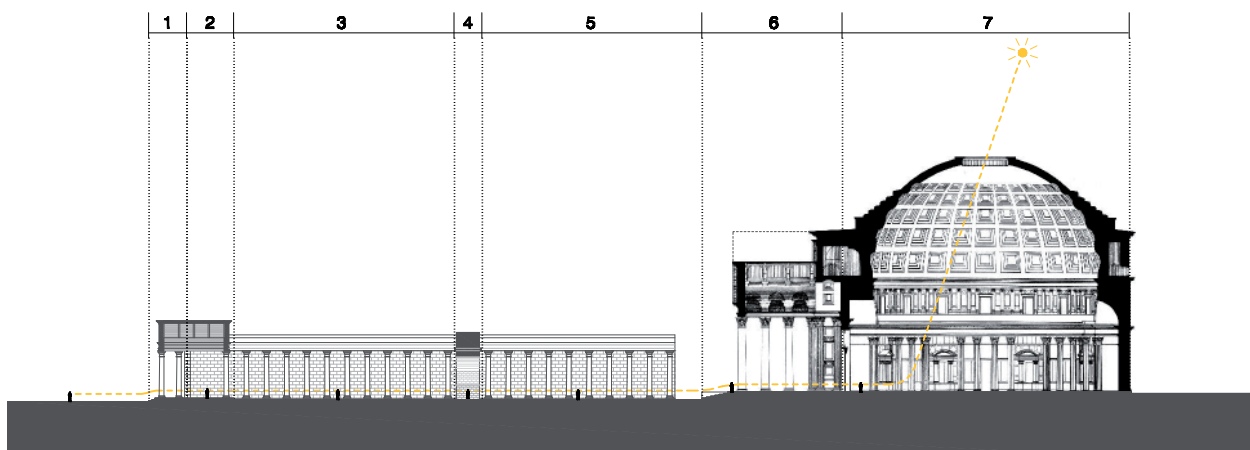
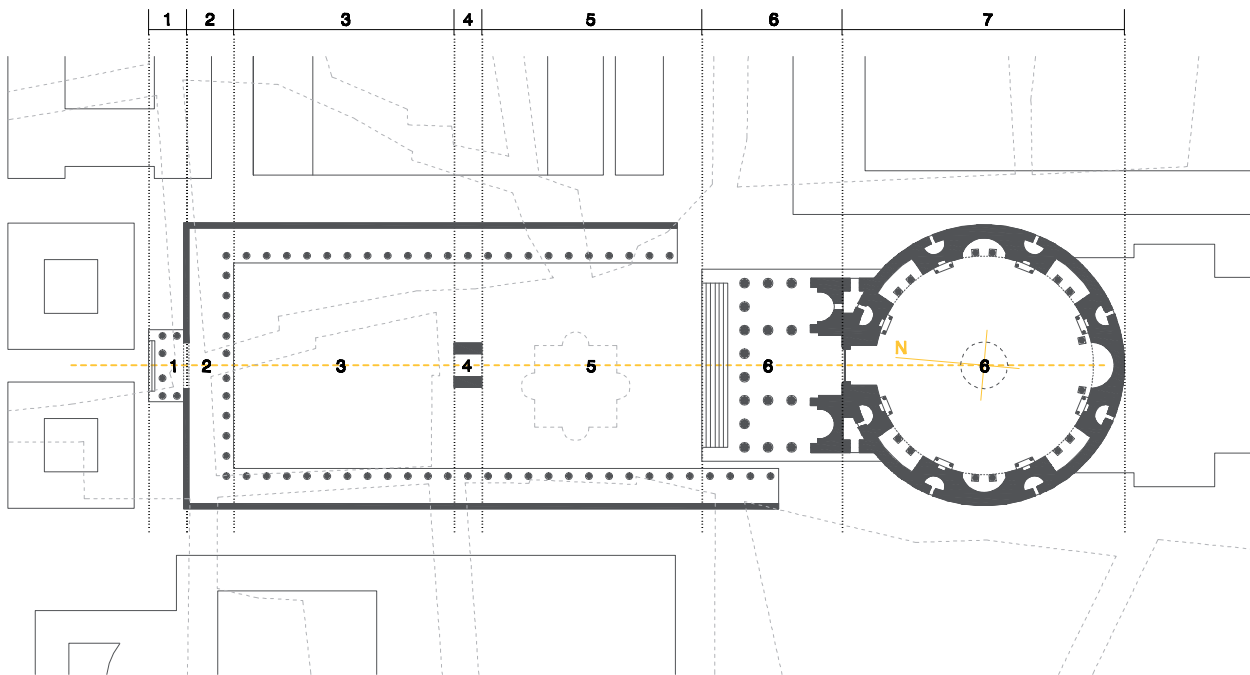
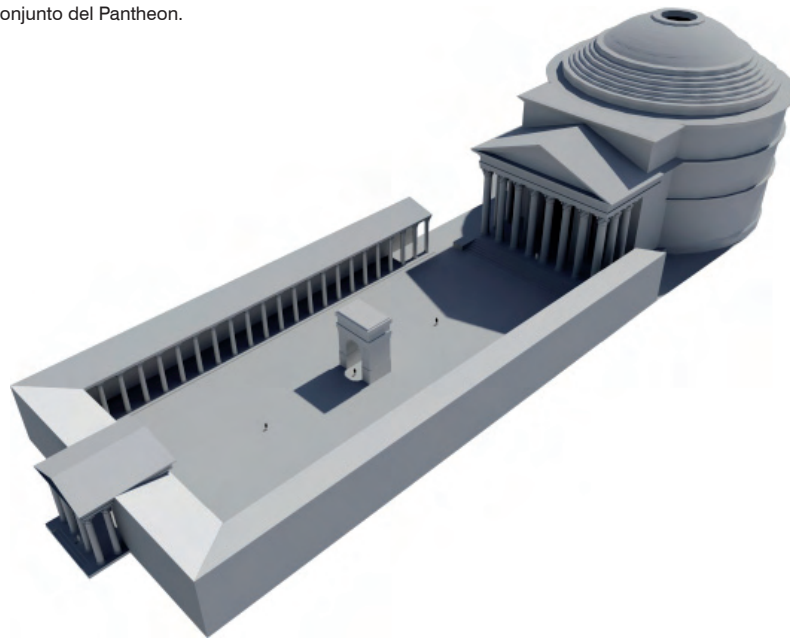
08. En el capítulo V del libro cuarto (De la situación de los Templos respecto a las regiones celestes) Vitruvio establece la orientación de los templos de la siguiente manera: "Las regiones a que deben mirar los Templos de los Dioses inmortales se procurarán en esta forma. Si no hubiera algún impedimento, y el sitio fuera libre, la deidad que en la nave se colocase estará de cara al occidente, para que así, los que ofrecen y sacrifican sus aras, miren hacia el oriente (...). Pero si el lugar no lo permitiera, se situarán de modo que de su área se descubra la mayor parte de la ciudad. También si se construyen Templos junto a los ríos, como en Egipto junto al Nilo, parece que deben mirar hacia el margen. Y finalmente, si se sitúan cerca de los caminos públicos, se pondrán de suerte que los pasajeros vean la puerta". (VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez libros de arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p.98). Así pues, aunque Vitruvio establece una orientación preferible para los templos, ésta debe corregirse según las condiciones del lugar. Así ocurre en el Pantheon de Roma.

09. A pesar de que el espacio público que en la actualidad se extiende delante del Pantheon, la Piazza della Rotonda, poco tiene que ver con el que se cree que concibió Adriano, existen evidencias arqueológicas que permiten esbozar sus principales cualidades formales. No obstante, algunas cuestiones aquí tratadas no pueden ser más que conjeturas arqueológicas y arquitectónicas. Ver MACDONALD, W. L.; The Pantheon: design, meaning and progeny. Cambridge: Harvard University Press, 1976 y STAMPER, John W.: The Architecture of Roman temples: the republic to the middle empire. Cambridge: Cambridge University Press, 2005

10. "Es a partir del siglo XVIII cuando sistemáticamente se orienta la planta de la ciudad de Roma según la convención actual, con el Norte perpendicular a la parte superior del plano, pudiéndose comprobar que el eje principal del Pantheon sufre una desviación aproximada de 5° N/NO [Nota del Autor: comprobado en LANCIANI, Rodolfo, Forma Urbis Romae, Quasar, Roma, 1990, tav XV y XXI]. Prácticamente la totalidad de la planimetría específica del Pantheon consultada no da pie a suponer esta desviación, ya que, o bien por aproximarlos a una orientación ideal, o bien por despreciar el dato, la gran mayoría de ellos, incluso los estudios más recientes, o no dicen nada o presuponen una orientación perfecta norte-sur". DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 127

F.07. Reconstrucción hipotética del conjunto del Pantheon.

Infografía del autor.



F.08. Reconstrucción hipotética de la planta y la sección del conjunto del Pantheon. Dibujos del autor.

E 1/160 0 5 10 30 m.

1. Propileo / 2. Stoa / 3. Patio / 4. Arcus Pietatis / 5. Patio / 6. Pronaos o Pórtico / 7. Cella

Hautecoeur mantiene que esta desviación fue conscientemente diseñada para que el Sol incidiera simbólicamente sobre determinados paramentos del interior del templo¹¹. Aunque se carga así de significado simbólico a la orientación de la luz en el interior del templo, se hace difícil aceptar que las directrices de una área urbana tan amplia como el Campo de Marte, establecidas por Agripa siglo y medio antes de que Adriano construyera su Pantheon, respondan a este tipo de cuestiones simbólicas, especialmente si se tiene en cuenta que, según parece, el primer Pantheon poco tuvo que ver con el de Adriano. Este planteamiento desvincula cualquier significado simbólico y cualquier motivación consciente de los cinco grados de desviación del eje e induce a pensar en que, tal como defiende Waddell, pudo tratarse de un error de replanteo en el momento de trazar las dos directrices principales del Campo de Marte¹² -los cardo y los decumano- pues, tal como era habitual en el urbanismo romano, éstas debían estar perfectamente alineadas con los eje norte-sur y este-oeste respectivamente. Sin embargo, parece extraño un error de tal magnitud en una cultura como la romana, donde era habitual que la fundación de templos y ciudades se supeditase a la orientación solar obtenida mediante el estudio de la sombra proyectada por un *gnomon*¹³. Además, en el 13-10 a.C. Agripa erigió también en el Campo de Marte el *Horologium Solare*¹⁴, un enorme obelisco de treinta metros de altura a modo de *gnomon* que, sin ninguna duda, requería un conocimiento preciso y exacto del movimiento solar. Probablemente quedó patente entonces el incorregible “error”, que el Pantheon de Adriano tuvo que asumir por razones ideológicas y urbanas.

En cualquier caso, parece razonable pensar que la orientación del templo responde a la voluntad de establecer una estrecha relación entre la arquitectura y la luz del Sol a través de la orientación. El acceso al interior del templo da lugar a una compleja y variada secuencia espacial y lumínica que se desarrolla sobre el eje longitudinal del conjunto en dirección norte-sur, hecho que provoca que, en todo momento, los elementos que configuran los distintos espacios no sean percibidos nunca con luz directa, sino a contraluz o con luz indirecta.

NOTA: La planimetría y las infografías del conjunto del Pantheon, elaboradas por el autor de la presente tesis doctoral con la finalidad de analizar visualmente distintos aspectos del Pantheon, se constituyen como una reconstrucción hipotética de su forma en tiempos de Adriano. Se hace necesario señalar, pues, algunos aspectos relativos al criterio empleado:

- En tanto que el *propileo* y la *stoa* ha desaparecido totalmente, no es posible tener datos precisos sobre sus detalles formales concretos. Las dimensiones relativas a su altura y anchura, la forma de la cubierta, el intercolumnio y la forma de las columnas son hipótesis basadas en las consideraciones textuales y gráficas de diversos autores.

- Lo mismo ocurre con el *arcus pietatis*. Sus proporciones han sido establecidas en base a otros arcos de triunfo de un solo vano conservados. En cuanto a su posición concreta dentro del patio, con toda seguridad debía estar situado sobre el eje del conjunto, pero no hay consenso sobre su ubicación exacta sobre éste. Aquí se ha optado por una posición central, a medio camino entre el *propileo* y la *pronaos*.

- Tal como se expone en el apartado 3.3. *La forma de la gravedad clásica* existe una teoría ampliamente extendida según la cual en el diseño original la altura del pórtico de la *pronaos* debía ser más alta que la que finalmente fue construida. Aquí se acepta esta hipótesis y, aunque se representa el pórtico actual, se marca con línea discontinua esta supuesta altura.

- Aunque ha quedado enterrado debajo del actual nivel del pavimento de la plaza, hay constancia de que el templo se asentaba sobre un podio. Sin embargo, no existe consenso sobre su altura precisa, aunque las diferencias son mínimas y no afectan al análisis aquí realizado.

- Dado el esquematismo de la representación gráfica, se ha obviado cualquier información relativa a la decoración que, con toda seguridad, debió existir.

11. “Dedicado a la familia de los Julios, el Pantheon posee un eje orientado a 175°, porque el nacimiento de Cesar fue marcado por la aparición de un cometa en este sector del cielo. Este eje corresponde con la salida del sol del 1 de Abril, día de la fiesta de Venus, diosa madre de los Julios, y el 16 de Septiembre, día de los juegos romanos”. HATECOEUR, Louis, *Mystique et Architecture*, A. et J. Picard et Cie, Paris, 1954, p. 167. Citado en DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 127



F.09. Vista hipotética del Arcus Pietatis y del templo del Pantheon desde la stoa durante los equinoccios de primavera-otoño. Infografía del autor.

El análisis de esta secuencia lumínico-espacial se ha estructurado aquí en siete momentos o tramos -el *propileo*, la *stoa*, la parte norte de la plaza, el *Arcus Pietatis*, la parte sur de la plaza, el pórtico y la *cella*- en cuyas especificidades se ahonda a continuación:

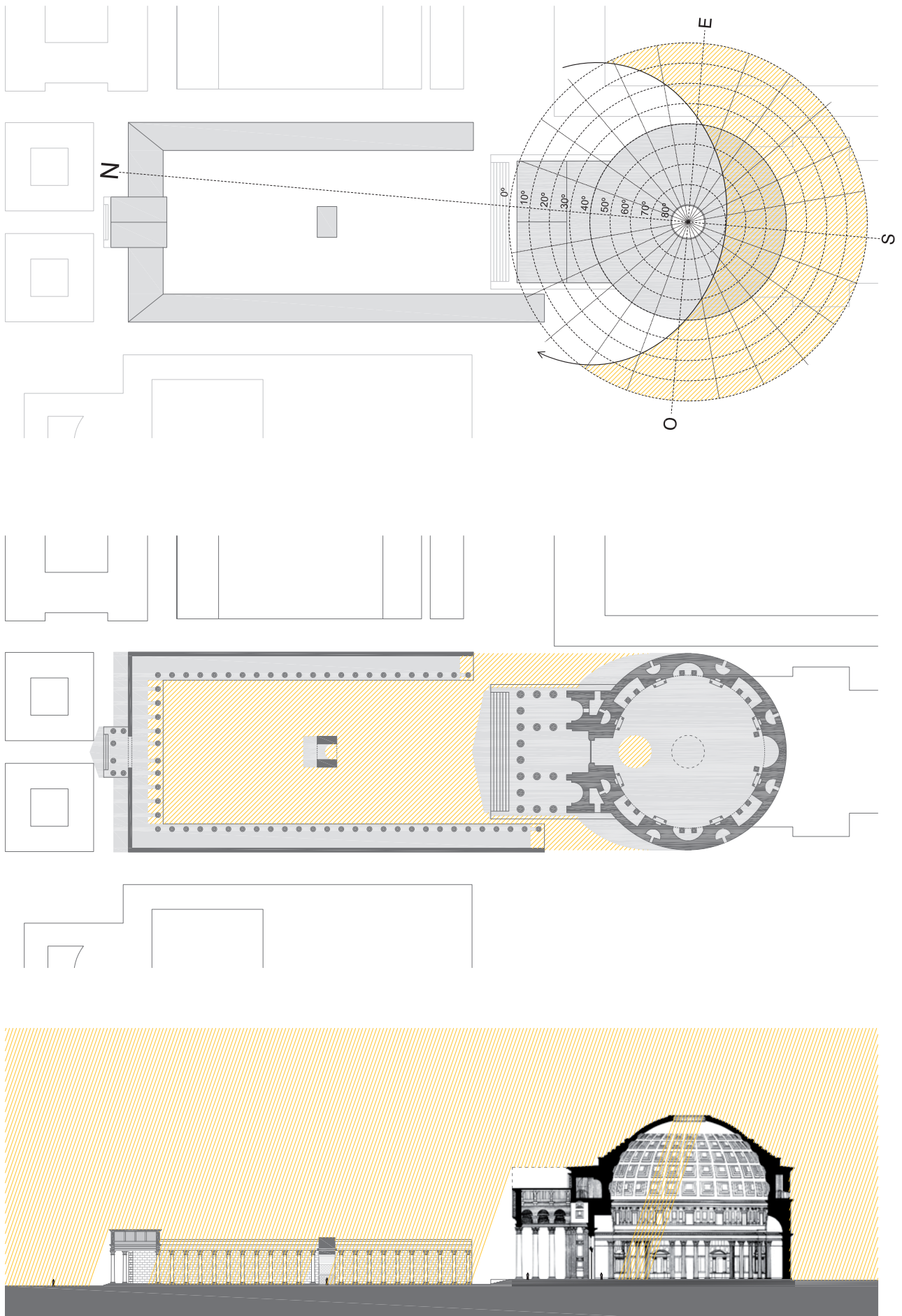
(1) El primero momento del recorrido axial de aproximación hacia el interior del Pantheon se produce en el *propileo*, la puerta de acceso a la plaza. Desde una estrecha calle parcialmente ensombrecida por la sombra proyectada por el propio acceso, se ingresa en este espacio cubierto y sombrío a modo de umbral entre la ciudad de Roma y el conjunto del Pantheon. Se produce aquí la primera transición lumínica, desde la luz solar de la calle hasta la sombra propia del propileo, pasando previamente por la sombra proyectada por la puerta monumental. Para ello es necesario subir algunos peldaños hasta alcanzar la cota superior del podio y, luego, atravesar una primera línea de columnas. El espacio aquí se comprime en altura, pues la bóveda celeste es sustituida por una cubierta seguramente de madera cuya cota inferior se eleva algo menos de diez metros.

(2) Unos pasos más adelante, al atravesar el muro trasero de la *stoa*, se accede al porche porticado que delimita la plaza. A partir de este momento se tiene la sensación de estar ya “dentro” del recinto de acceso delimitado visualmente por la sombra de la propia *stoa*. Desde este punto se ve el arco de triunfo enmarcado por el entablamento y las dos columnas situadas a ambos lados del eje longitudinal del conjunto. La visión del arco en primer plano obstaculiza la visualización del templo, que en gran parte queda oculto. Bajo la cubierta de la *stoa* se produce la transición entre la luz solar exterior y la sombra estructural del interior del porche, que arranca en la base de la columna y se cierra en el entablamento. Desde el espacio cubierto y sombrío de la *stoa* se visualiza, a través del umbral constituido por las columnas y sus sombras arrojadas, un espacio exterior descubierta -el patio- que, aún estando delimitado por la sombra, se percibe como un espacio de luz.

(3) Al cruzar la línea formada por las columnas de la *stoa* el espacio

12. “Cuando el lugar o la topografía lo permitían, los edificios imperiales y las nuevas ciudades se orientaban axialmente sobre el eje norte-sur. El prácticamente plano Campo de Marte permitía una orientación norte-sur verdadera y el Mausoleo de Augusto había sido orientado directamente a sur. Sin embargo, la Saepta Julia de César, el Pantheon de Agripa, las Termas de Agripa, y las Termas de Nerón tenían su eje principal desviado cinco grados hacia el oeste con respecto la dirección norte. Evidentemente, el topógrafo que orientó la Saepta Julia cometió un error que el resto de edificaciones construidas posteriormente, incluido el Pantheon de Adriano, siguieron”. WADDELL, Gene: Creating the Pantheon: design, materials and construction. Roma: “L’Erma” di Bretschneider, 2008, p. 68

13. “Colóquese en el centro del giro de los muros un pedestal de mármol, perfectamente anivelado a la horizontal, o bien pavimentese un lugar allí mismo y allánese a nivel y regla, de modo que no se necesite pedestal alguno. En el medio de dicho lugar fíjese un gnomon de bronce índice de la sombra, llamado *sciatberas*. Unas cinco horas antes de mediodía se notará con un punto el extremo de la sombra del gnomon y, poniendo un pie del compás en el centro y alargando el otro al punto referido -extremo de la sombra del gnomon-, se describirá un círculo. Obsérvese por la tarde el extremo de la sombra del gnomon, que va creciendo, y cuando toque la circunferencia del círculo, haciendo igual sombra a la que hizo por la mañana, se notará con otro punto. Desde estos dos puntos se hará con el compás una decusación, y por ésta y el centro se tirará una línea hasta la parte opuesta del círculo, y se tendrán hallados el mediodía y el septentrión. (...) Con esta disposición parece deberán señalarse las calles maestras y las menores”. De Architectura, Libri Decem, Libro I, Capítulo VI. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, pp.21-22. Sobre la gnomónica de Vitruvio ver apartado I-3.1. Marco Vitruvio: Gnomónica y mecánica. (Continúa en la página siguiente)



F.10. Asoleamiento del conjunto del Pantheon durante del solsticio de verano. Dibujos del autor.

E 1/160 0 5 10 30 m.

Diagrama solar y esquemas en sección y en planta de la relación entre la luz y la sombra con el Sol alineado con el eje longitudinal del conjunto.

vuelve a descomprimirse en altura y las condiciones lumínicas varían ostensiblemente. A lo largo de los aproximadamente cuarenta metros que distan entre las columnas y el arco de triunfo se produce una aproximación desde la luz hacia la sombra, repitiéndose así la secuencia previa al ingreso al *propileo*. Se pasa entonces de un espacio donde la luz es rodeada por la sombra a un espacio donde la sombra es rodeada por la luz. Esto es lo que ocurre en la sombra arrojada por el *Arcus Pietatis*.

(4) Desde la luz exterior se atraviesa la sombra arrojada por el arco y se penetra, otra vez, en la luz. Esta pequeña porción de luz, tan diferente a la luz que inunda el resto del patio, recibe el nombre de “luz estructural”¹⁵. Desde ella, debajo del arco, se produce otra compresión espacial que, una vez más, se configura en un umbral desde el que se puede contemplar, por vez primera en toda su magnitud, el pórtico de acceso al templo.

(5) De manera análoga a lo que ocurre durante la aproximación desde la *stoa* hacia el arco de triunfo, se recorren otros cuarenta metros bajo la luz del Sol hacia una sombra arrojada, en este caso la del gran pórtico del Pantheon. Durante este trayecto se percibe ya la *pronaos* en toda su magnitud, completamente en sombra, solamente iluminada por la luz indirecta reflejada en los elementos que delimitan la plaza de la plaza. Cuando se avanza lo suficiente como se ingresar en la sombra proyectada por el pórtico¹⁶ el disco solar queda definitivamente oculto tras el edificio y, entonces, el fuerte contraste entre la luz y la sombra desaparece. La oscura sombra deja paso a una suave penumbra donde la luz difusa rebotada en los paramentos que configuran la plaza permite percibir, en detalle, la profundidad espacial del pórtico.

(6) Una vez en la *pronaos*, la secuencia espacial del propileo se repite, aunque a una escala mucho mayor. Después de subir unos cuantos peldaños se alcanza la cota superior del podio del Pantheon. Avanzando unos pocos pasos se traspasa la línea de columnas que sustenta el perímetro de la cubierta del pórtico, momento en que, de nuevo, el espacio se comprime por efecto

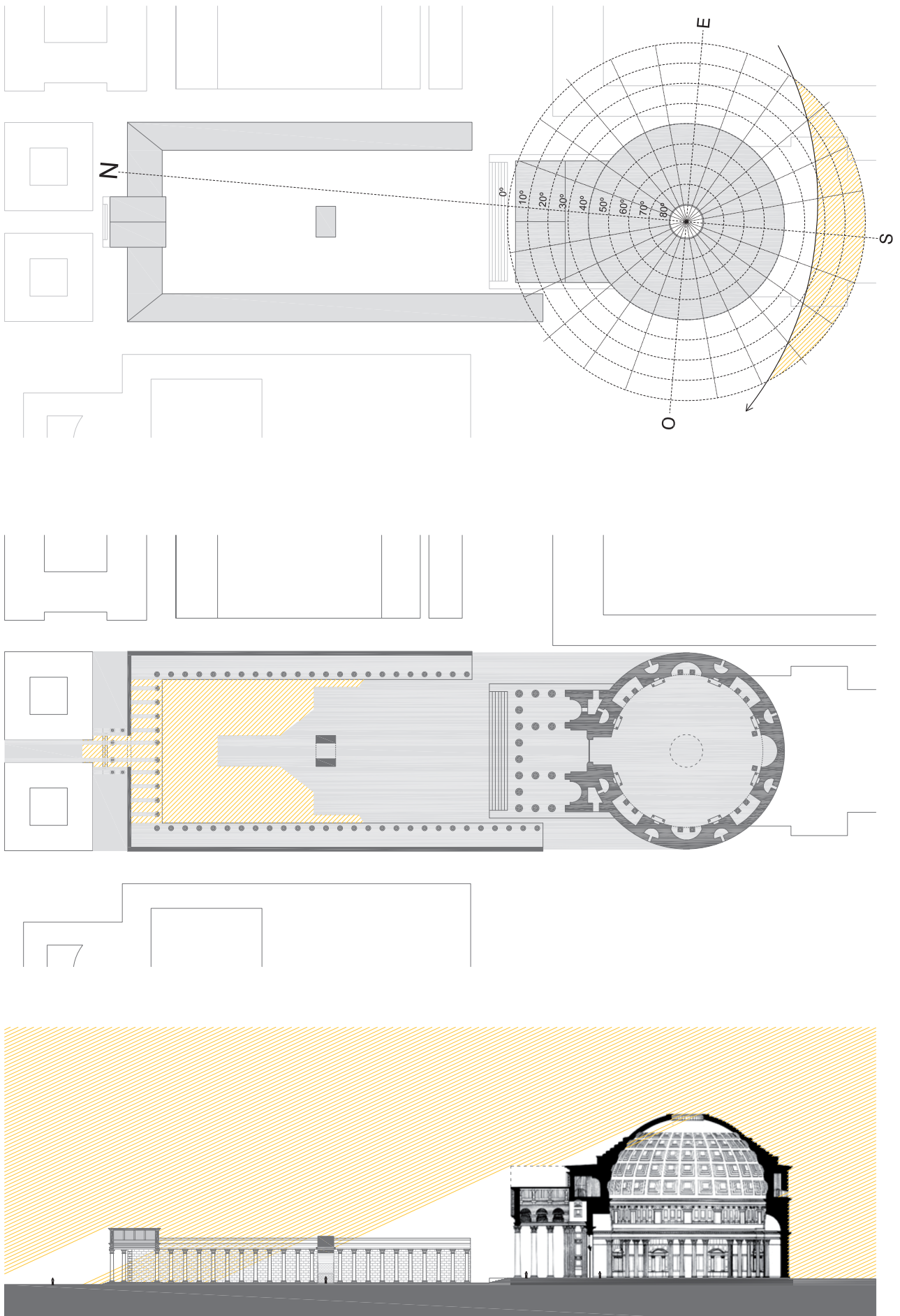
NOTA: Cabe destacar especialmente el exhaustivo estudio gráfico del movimiento del Sol en el interior del Pantheon realizado por Eduardo De Miguel (DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo II). Sin embargo, el análisis gráfico de la relación entre la sombra y la luz tanto en el interior del templo como en el espacio de aproximación se constituye como una aportación específica del presente apartado.

(13. Cont.) “Cuando se consagraba un “sitio”, el “augur” se sentaba en el centro y con su vara, o “lituus”, determinaba dos ejes principales a través del centro, dividiendo así el espacio en cuatro áreas: izquierda y derecha, adelante y atrás. Esta división no era arbitraria sino que representaba los puntos cardinales y se ajustaba asimismo a las formas del paisaje circundante. El espacio así definido dentro del límite del horizonte era llamado “templum”. Los romanos tomaban, pues, una imagen espacial general como punto de partida de sus planificaciones, en vez de recurrir a un carácter específico simbolizado en formas plásticas. Todo lugar romano es una manifestación de este orden básicamente cósmico. También el “castrum” y la ciudad se basaban en el mismo esquema: la superficie cuadrada o rectangular dividida en cuatro partes mediante dos calles principal es que se cortan en ángulo recto. La principal, “cardo”; la secundaria, “decumanus”. El “cardo”, con un recorrido norte a sur, representaba el eje del mundo, y el “decumanus” la carrera del sol de oriente a occidente”. NORBERG-SCHULZ, Christian: *La arquitectura romana, en Arquitectura occidental: la arquitectura como historia de formas significativas*. Barcelona: Gustavo Gili, 1983, pp. 44-45.

14. “El Horologium Solare, erigido en el 13-10 a.C., fue un largo reloj de sol cuyo suelo de mármol cubría una área de unos 160 metro de ancho por 75 metros de profundidad. Este gnomon era un obelisco de granito rojo traído de Heliópolis, cuya altura era de unos 100 pies romanos”. STAMPER, John W.: *The Architecture of Roman temples: the republic to the middle empire*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, p. 128. Actualmente este obelisco está situado en la Piazza de Montecitorio de Roma.

15. Sobre la importancia espacial de esta luz estructural, ver apartado III-2.6. El nacimiento de la luz estructural, a propósito del Stonehenge.

16. La longitud de la sombra arrojada por el pórtico del Pantheon varía sensiblemente a lo largo del año: en invierno, al estar el Sol tan horizontal, todo el trayecto se realiza en sombra; en verano, en cambio, la verticalidad del Sol hace que prácticamente todo el recorrido de aproximación se efectúe bajo la luz. Entre estas dos situaciones extremas existe, evidentemente, todo un gradiente de situaciones intermedias.



F.11. Asoleamiento del conjunto del Pantheon durante el solsticio de invierno. Dibujos del autor.

E 1/160 0 5 10 30 m.

Diagrama solar y esquemas en sección y en planta de la relación entre la luz y la sombra con el Sol alineado con el eje longitudinal del conjunto.

de la cubrición. Siguiendo por el eje, pasada la primera línea de columnas, se accede a la crujía central que dirige hacia la puerta de acceso al interior del Pantheon. Al ingresar en el volumen donde se realiza la transición entre el pórtico y la rotonda, la celosía situada encima de la puerta permite establecer un primer contacto visual con la luz del interior del templo. En efecto, aún con la puerta cerrada y a través de la celosía, se puede percibir la claridad del gran óculo de la cúpula del Pantheon. Este efecto lumínico se enfatiza cuando, en determinados momentos del día y del año, la inclinación de los rayos solares hace posible que algunos de ellos atraviesen la celosía y se proyecten sobre el pavimento de la cella. Así pues, el entramado de la parte superior de la puerta permite anticipar, con gran sutileza, la luz que configura el espacio interior del templo antes de acceder a él ¹⁷.

(7) Al abrir la puerta y cruzar el umbral se descubre, en toda su inmensidad, el gran espacio interior iluminado cenitalmente. Aunque en planta parece que el punto final del eje longitudinal de acceso se produce en el ábside opuesto a la puerta, desde un punto de vista espacial y lumínico el final de este eje se eleva del suelo hasta el gran óculo de luz de la cúpula. Evidentemente, la secuencia de la percepción de la luz dentro de este espacio varía sensiblemente a lo largo del año: durante los meses más próximos al solsticio de verano, cuando el Sol ocupa una posición más elevada con respecto al horizonte, en primer lugar se percibe, justo delante de la puerta, el disco de luz solar proyectado en el pavimento e, inmediatamente, se alza la mirada hacia la fuente de esa luz circular, el óculo de la cúpula; en cambio, durante los meses más cercanos al solsticio de invierno, cuando la posición del Sol es más horizontal, la secuencia se invierte y primero se descubre la fuente ocular de luz para, luego, dirigir la mirada en busca de la luz proyectada sobre el intradós de la propia cúpula. En cualquier caso, se advierte que el interior del Pantheon se configura como un espacio cubierto donde la luz solar proyectada es envuelta por la sombra construida por la estructura, situación lumínicamente inversa a la del patio de acceso, donde es la luz la que envuelve a las sombras proyectadas.

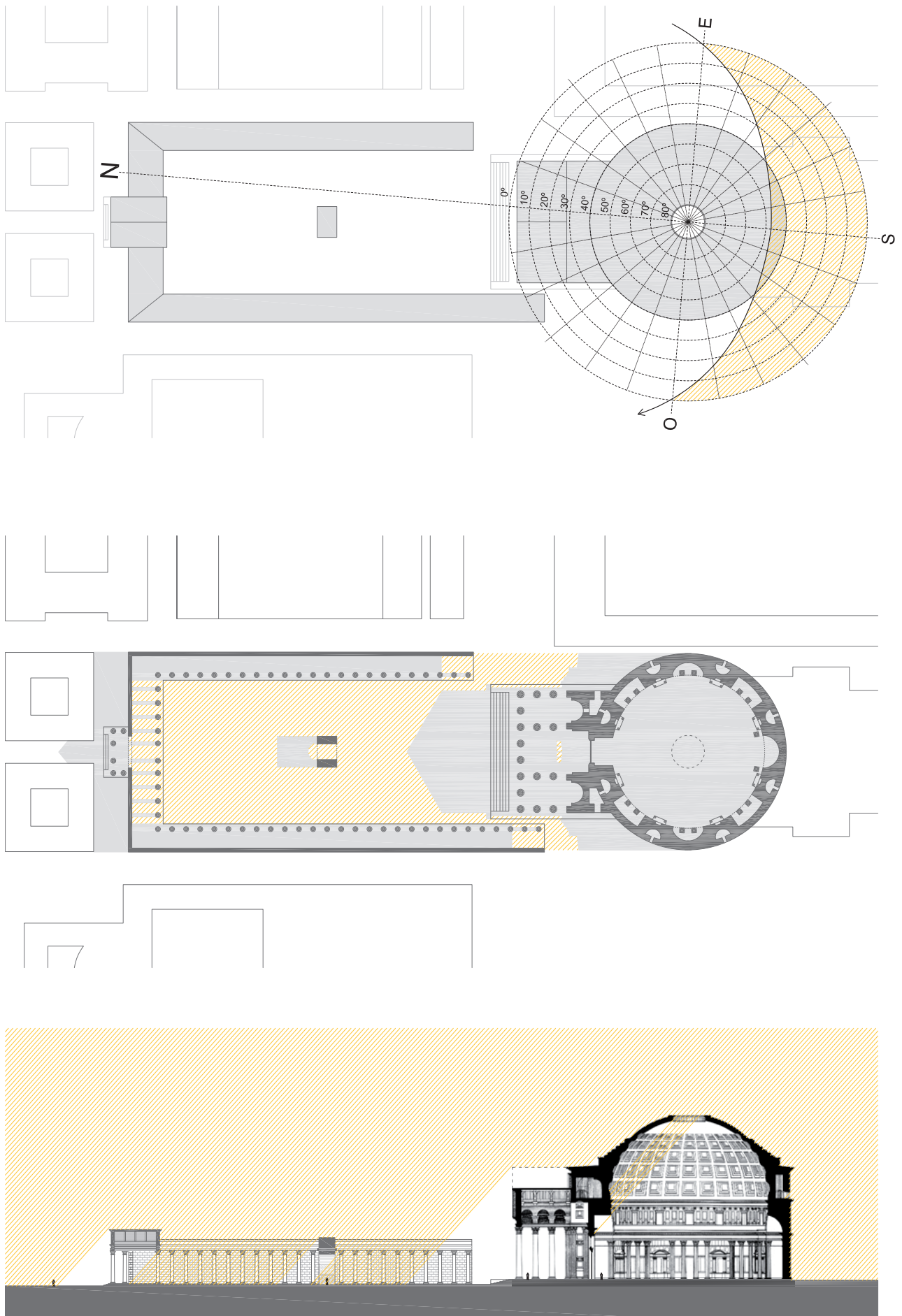
17. "Advertimos la puerta de ingreso en la penumbra del pórtico (...). Este primer espacio de acogida y antesala del espacio interior, funciona como filtro entre la luz absoluta y natural del exterior, y la luz transformada y trascendente del interior. (...) Descubrimos a través de la celosía ubicada en su parte superior, la existencia de un espacio inundado de luz. (...) En la dirección del acceso y a través de la celosía, lo único que se llega a vislumbrar es un fragmento del óculo. Aproximadamente durante un mes, del 21 de marzo al 21 de abril, y su homónimo correspondiente, del 21 de agosto al 21 de septiembre, al interponerse la trayectoria del sol con la dirección del eje de acceso, los rayos traspasan los rigurosos límites del espacio interior, primero a través de la celosía y después a través de la puerta". [El 21 de Abril, cuando se conmemora la fundación de Roma, a mediodía el disco solar se sitúa e invade con extraordinaria precisión la cavidad del ingreso]. "Es uno de los pocos días del año que los rayos se filtran por la puerta de bronce permanentemente semiabierta y salen al exterior; la luz del sol te envuelve y te purifica antes de introducirte de soslayo en el espacio divino." DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, pp.143-145.



F.12. Rayos de luz atravesando la celosía de la puerta del Pantheon desde el interior hacia el pórtico (marzo-septiembre). DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, tomo I, p.235



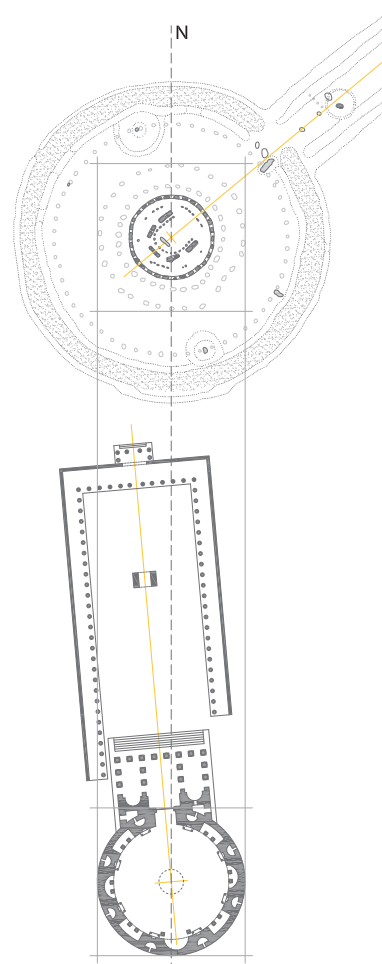
F.13. Puerta de acceso al interior del templo, abierta. En la parte superior de la puerta, a través de la celosía, puede percibirse la claridad del óculo de la cúpula. BELARDI, Giovanni: *Il Pantheon: storia, tecnica e restauro*. Roma: Betagamma, 2006, p. 194



F.14. Asoleamiento del conjunto del Pantheon durante los equinoccios de primavera y otoño. Dibujos del autor. E 1/160 0 5 10 30 m.
 Diagrama solar y esquemas en sección y en planta de la relación entre la luz y la sombra con el Sol alineado con el eje longitudinal del conjunto.

Del análisis aquí desarrollado se desprende que, más allá de las especificidades lumínicas del interior del templo, analizadas en el último apartado del presente capítulo, todo el conjunto del Pantheon se constituye como una forma arquitectónica íntimamente vinculada a la luz del Sol. La forma, disposición y orientación de las distintas partes del conjunto, así como la complejidad espacial y lumínica de la secuencia de aproximación desde la calle hacia el interior del Pantheon, induce a considerar que tanto el conjunto arquitectónico como el recorrido de acceso tuvieron que ser conscientemente proyectados en relación a la luz solar. El espacio se comprime y descomprime en diversas ocasiones en planta y en sección y, a lo largo del eje, se suceden distintas situaciones en las que la sombra, la opacidad y la visión, fenómenos todos ellos íntimamente relacionados con la luz, se constituyen como los auténticos protagonistas de un recorrido que conduce de un espacio exterior, configurado por *sombras en la luz*, a un espacio interior, conformado por *luz en la sombra*. Se descubre, entonces, la unívoca relación existente entre el carácter *interior* o *exterior* del espacio y la preponderancia de la luz o de la sombra en la configuración formal y visual de la arquitectura.

A lo largo de la historia, la arquitectura ha tenido que configurar y articular los distintos espacios construidos en una misma obra a través de los variados fenómenos de la luz. A tal fin, la luz, la sombra, la opacidad, la translucidez y la transparencia se han constituido, siempre, como fenómenos indispensables con los que estructurar y caracterizar el espacio arquitectónico, fuera cual fuera su forma, su carácter y su finalidad. Pero, más allá de la simple manifestación física de los fenómenos asociados a la luz, las grandes obras de arquitectura de todos los tiempos han establecido siempre relaciones precisas y conscientes entre la forma arquitectónica y la luz. Para ello, han sido cuestiones de vital importancia la orientación del edificio y la construcción precisa -en lo cuantitativo y en lo cualitativo- de las sombras a fin de configurar el espacio y de articular espacialmente la luz. Construir espacio es construir luz, y construir luz es construir también sombra.



F. 15. Tanto el Stonehenge como el Pantheon son formas arquitectónicas íntimamente vinculadas al Sol. Así lo demuestra su forma circular (notar que el diámetro del círculo de los Y Holes del Stonehenge es prácticamente el mismo que el del extradós del muro circular del Pantheon) y el hecho de que ambas obras estén orientadas hacia una dirección determinada por la posición del disco solar: en el caso del Stonehenge, esta dirección viene determinada por la salida del sol por el horizonte durante el solsticio de verano; en el caso del Pantheon, la orientación del conjunto se establece, aproximadamente, por la dirección sobre la que el disco solar alcanza su máxima altura sobre el horizonte.

En ambos casos existe un elemento -la Heel Stone en el caso del Stonehenge y el Arcus Pietatis en el caso del Pantheon- situado a una cierta distancia del recinto circular que, además de fijar y enfatizar la orientación solar de la obra, señala el acceso al recinto.

Además, a pesar de sus distintas orientaciones solares, tanto en el Pantheon como en el Stonehenge la posición relativa entre el hombre y la luz es tal que la percepción del espacio arquitectónico se produce en todo momento a contraluz, hecho que contribuye de manera decisiva a dramatizar la relación entre la luz solar y la sombra estructural.



F.16. Vista hipotética de la incidencia de la luz a través de las columnas de la stoa que rodea la plaza de acceso. Infografía del autor.

III.3.3. LA FORMA DE LA GRAVEDAD CLÁSICA

*“El espacio bien columnado y bien templado por la luz puede llegar a conmovernos”.*¹⁸

Alberto Campo Baeza

El espacio de aproximación al interior del Pantheon permite también un análisis en clave gravitatoria de los elementos que lo configuran. Los romanos utilizaron aquí el arquetipo pétreo estructural formado por un entablamento soportado por dos columnas como mecanismo de definición visual de la *pronaos* y la *stoa*, y la cubierta inclinada con estructura de madera como mecanismo de cubrición de los espacios concebidos a modo de umbral.

Las escasas evidencias arqueológicas de la *stoa* que han llegado hasta nuestros días han obligado a construir hipótesis, más o menos consensuadas, sobre sus principales rasgos formales. Debió estar constituida por una sola crujía compuesta por dos elementos sustentantes -un muro continuo y una sucesión de columnas- y otro sustentado -una techumbre-. El muro se configuraría así como un elemento portante continuo y opaco que impediría el paso de la luz, la visión y las personas. En cambio, en el lado interior, la transmisión vertical de la gravedad se concentraría puntualmente en las columnas regularmente dispuestas, hecho que permitiría liberar de toda carga al espacio construido entre estos soportes circulares, cuya forma y proporciones debió ser una versión reducida del orden utilizado en el gran pórtico de la *pronaos*. En la *stoa* se evidencian, pues, las dos formas estructurales clásicas del encauzamiento vertical de la gravedad, el muro y la columna: *“Una columna libera luz; y además de dar luz, nos ofrece el punto desde el que podemos alcanzar la gravedad. Una columna es completamente distinta de un muro, porque éste no libera luz a menos que lo perforemos, mientras que una columna dice que está entre una cosa y otra, es una gran fuente de luz o un sitio por donde se puede pasar”*¹⁹. En cuanto al elemento que cubría el espacio del porche, seguramente debió constituirse como una estructura de madera, inclinada hacia el interior del patio y apoyada en la parte superior del muro y sobre el entablamento de la línea de columnas.

18. CAMPO BAEZA, Alberto; *Pensar con las manos*, Buenos Aires, Nobuko, 2009, p.66. LA ESTRUCTURA DE LA ESTRUCTURA. Sobre la estructura que establece el orden del espacio, 2008.

19. KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid: *El Croquis*, 2003, p. 119. Sobre la forma y el diseño, 1960.

“El pilar será siempre un ser valioso por lo que salva, por el lugar o luz que trae”. MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís: *Intersecciones*. Madrid: *Rueda*, 2004, p. 67



F.17. Fotografia del pórtico de acceso al Pantheon. BELARDI, Giovanni: *Il Pantheon: storia, tecnica e restauro*. Roma: Betagamma, 2006, p. 17

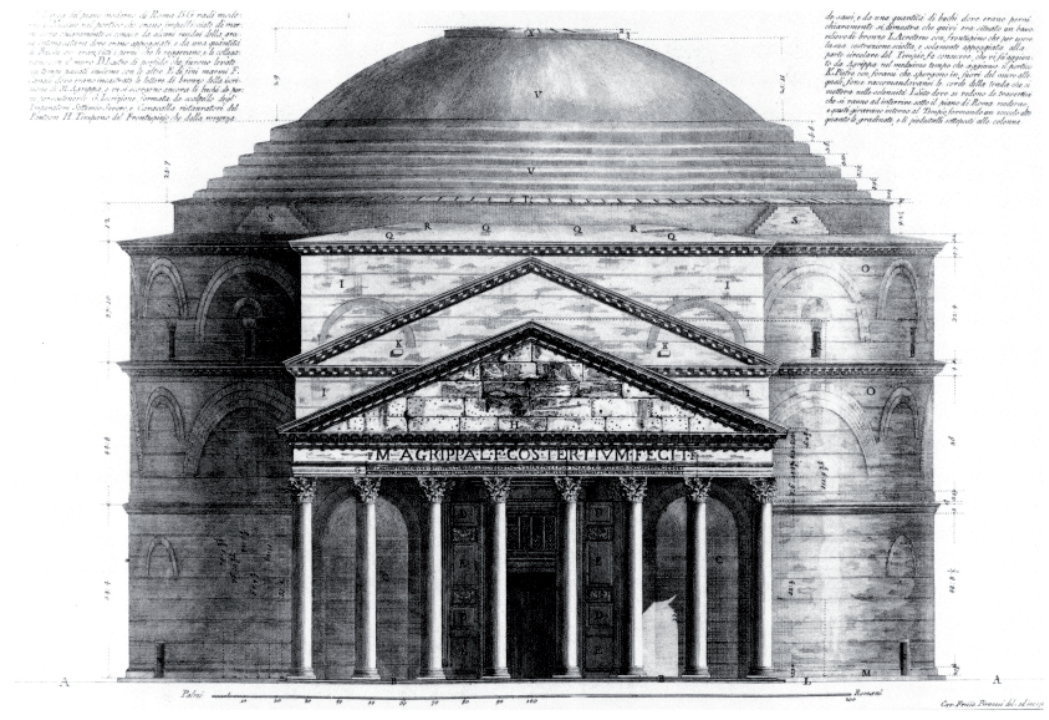
La *pronaos* del templo se constituye como un gran pórtico próstilo de orden corintio formado por un total de dieciséis columnas: ocho de ellas se disponen en hilera frontal, alcanzando una anchura total de unos treinta y cuatro metros de longitud; las otras ocho se ordenan en ángulo recto y por pares detrás de las columnas de las esquinas y de las que quedan a su lado -dejando una hilera vacía en medio-. Aunque existía la posibilidad de construir el fuste de la columna mediante la adición vertical de tambores, la élite política de la Roma imperial se decantó siempre por la erección de columnas con fustes monolíticos, pues los elevados sobrecostes y las grandes dificultades logísticas y constructivas que ello acarrea se constituían en símbolo de ostentación y poder²⁰. Sólo así puede entenderse el transporte de los dieciséis fustes monolíticos de granito -de 11,8 metros de largo y unas 45 toneladas de peso cada uno- de las columnas del pórtico del Pantheon desde las lejanas montañas egipcias de Asuán hasta Roma. El fuste carece de estrías verticales a fin de garantizar la percepción visual de su monolitismo, pues así se evita la formación de líneas de sombra que, en caso de existir, dificultarían la contemplación de la total ausencia de juntas en la lisa superficie de la columna.

En tanto que corintias, las columnas disponen de basa y capitel, aunque algunos de los capiteles originales de hojas de acanto fueron reemplazados en épocas posteriores por otros de distinta figuración. Las columnas perimetrales soportan un entablamento típicamente corintio, formado por un arquitrabe de tres platabandas, un friso donde el emperador Adriano mandó grabar la inscripción M • AGRIPPA • L • F • COS • TERTIUM FECIT (*Marco Agripa, el hijo de Lucio, tres veces cónsul, lo construyó*) en honor al autor del primer Pantheon²¹, y una cornisa cuyo nivel se encuentra entre la cornisa inferior y la media del cuerpo circular del templo.

La entrega del pórtico con el cuerpo circular de la *cella* no se produce de manera directa, sino que se realiza mediante un cuerpo paralelepípedo de transición que tiene la misma anchura que el pórtico y la misma altura que la cornisa superior del volumen cilíndrico del templo. En la parte frontal de este cuerpo macizo se encuentra adosado, a la altura de la cornisa media de la *cella*, un frontón de las mismas dimensiones

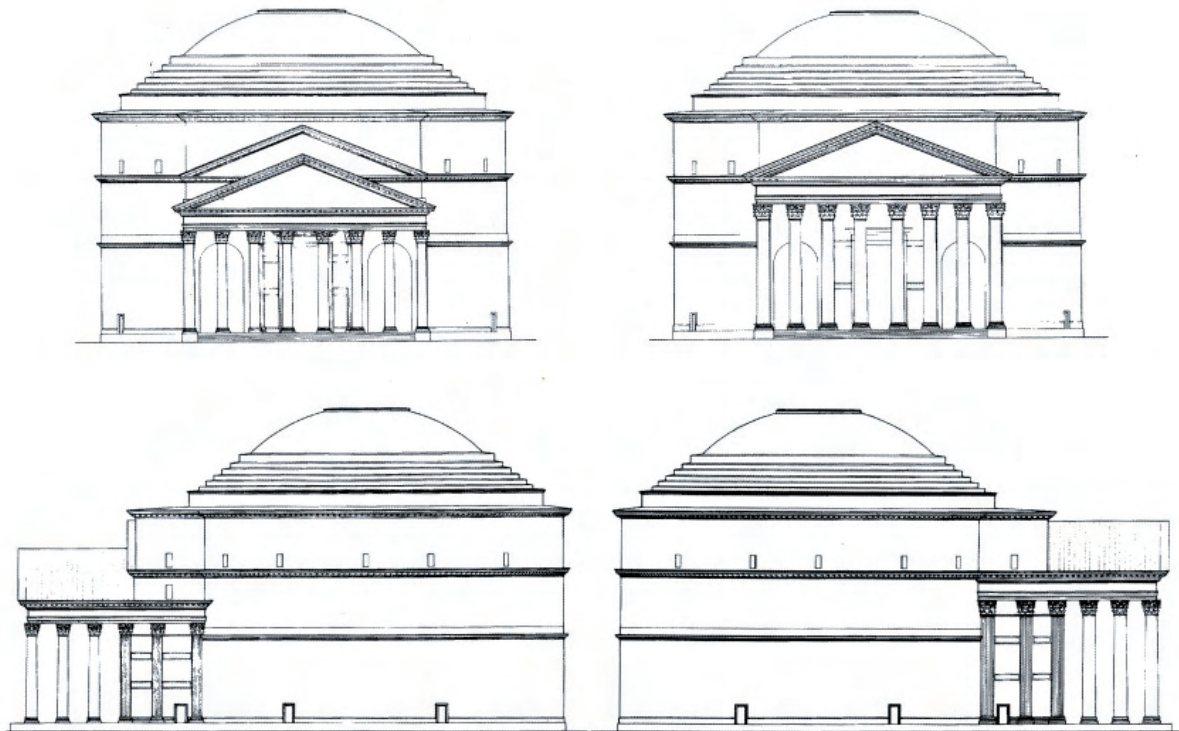
20. "Los constructores romanos prescindieron de la práctica griega de construir las columnas compuestas de tambores cilíndricos (...) colocados unos encima de otros y utilizaron columnas de fustes macizos monolíticos (...). Cualquiera que fuese la cantidad de mano de obra que se ahorra al prescindir de la columna de tambores, se gastaba con creces en las tareas relacionadas con la fabricación, transporte e instalación de los fustes monolíticos. Los propios recursos empleados en trabajar este tipo de piedras, tanto en coste de materiales como en mano de obra, contribuía directamente a su poder de expresión simbólica. (...) El suministro de mármol y granito parece haber estado determinado por una (...) lógica (...) que nada tenía que ver con la economía, sino que estaba pensada para la ostentación del poder imperial". TAYLOR, *Rabun*: Los Constructores romanos: un estudio sobre el proceso arquitectónico. *Tres Cantos*: Akal, 2006, pp. 26-27.

21. Ver STAMPER, John W.: The Architecture of Roman temples: the republic to the middle empire. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, p. 186.



F.18. Alzado norte del Pantheon, por Francesco Piranesi.

WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 258



F.19. Alzado frontal y lateral del Pantheon. En la izquierda el estado actual, a la derecha la hipótesis de su diseño original.

WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 318

que el del pórtico. La existencia de este frontón adosado al cuerpo de transición, la no coincidencia de la cornisa del entablamento del pórtico ni con la cornisa media ni con la superior del volumen de la *cella*, la desproporción visual entre el frontón del pórtico y las columnas que le sirven de apoyo (que hace que el primero tenga una apariencia en exceso pesada y las segundas parezcan de proporciones un tanto chatas) y el hecho de que éstas parezcan estar demasiado separadas entre sí, son cuestiones que han inducido a la mayoría de los estudiosos del Pantheon a especular con la posibilidad de que, por alguna razón desconocida, las columnas finalmente erigidas tuvieran una altura menor a la del proyecto inicialmente concebido. Según esta teoría, las columnas habrían sido originalmente proyectadas con una altura total de sesenta pies romanos (17,8 metros) y no de cuarenta y ocho (14,2 metros) como finalmente fueron construidas. De esta manera se hubiera podido encajar el frontón del pórtico entre las cornisas media y alta del muro circular de la *cella* y habrían aumentado las dimensiones de las columnas, lo que sin duda hubiera dado lugar a una composición mucho más proporcionada²².

III.3.3.1. La tectónica de la estructura arquivada

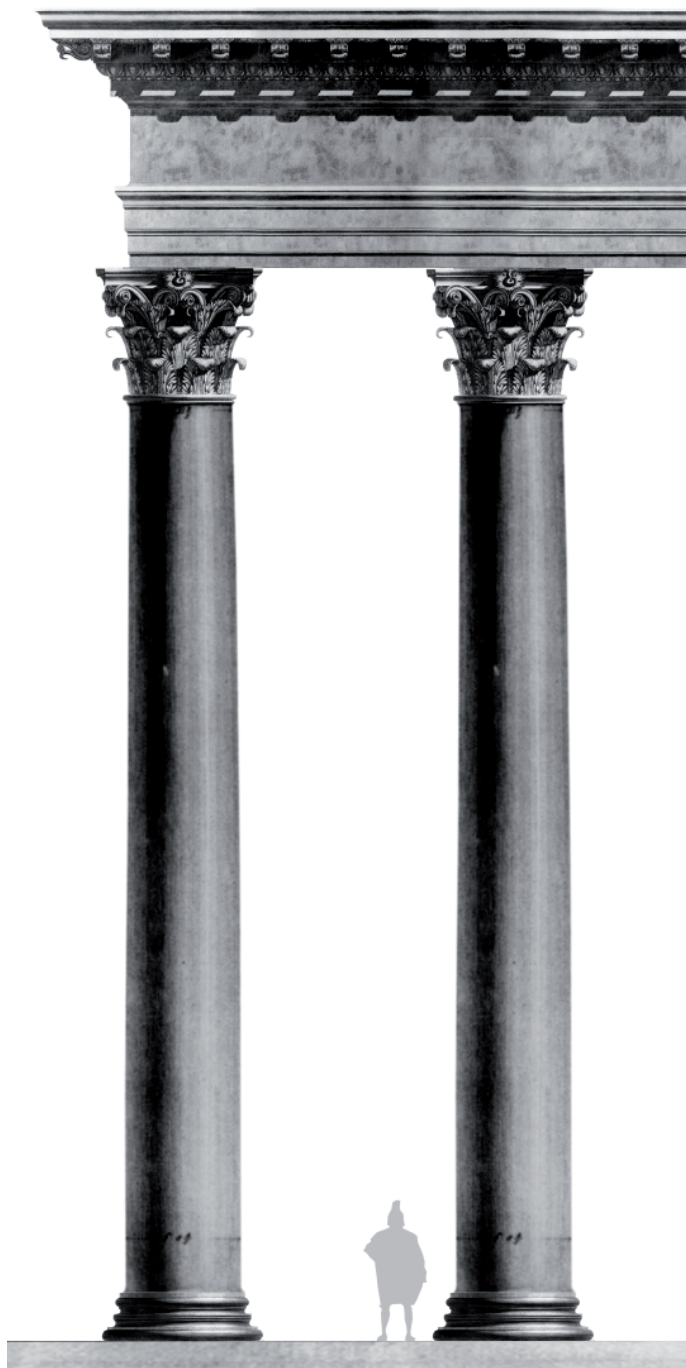
*“Aquí radica su característica más sobresaliente: la de ser expresión de su misión estructural, es decir, la de hacer de las relaciones entre cargas y soportes la idea artística de la arquitectura.”*²³

Manuel Iñiguez

La adecuada combinación de columnas y arquivadas es lo que hace posible la definición de los límites del espacio de aproximación hacia el interior del Pantheon. Sin embargo, a pesar de dar lugar a una arquitectura mucho más elaborada y refinada que la de épocas anteriores, tal y como se advirtió en la introducción del capítulo anterior centrado en el análisis del Stonehenge, los elementos estructurales clásicos greco-romanos presentan escasas novedades en cuanto a la manera de concebir arquitectónicamente la naturaleza de la gravedad.

22. Ver STAMPER, John W.: The Architecture of Roman temples: the republic to the middle empire. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, pp. 190-194 y TAYLOR, Rabun: Los Constructores romanos: un estudio sobre el proceso arquitectónico. Tres Cantos: Akal, 2006, pp. 138-140.

23. IÑIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p. 62



F.20. Unidad estructural arquitebada del pórtico del Pantheon.
Montaje del autor a partir de los dibujos de Francesco Piranesi. E 1/10

Así pues, aunque el arquetipo clásico formado por dos columnas que sostienen un entablamento se presentan como el refinamiento técnico y estilístico de la estructura trilitica primitiva, hay que señalar que desde el punto de vista de la comprensión y la manipulación arquitectónica de los fenómenos de la gravedad, las columnas y los entablamentos del Pantheon no difieren en absoluto de los trilitos del Stonehenge analizados en el capítulo anterior. En efecto, tanto los refinados órdenes greco-romanos como las estructuras megalíticas prehistóricas se constituyen como *estructuras arquitebadas*, caracterizadas por soportar y transmitir horizontalmente el peso de las cargas hasta alcanzar los soportes verticales. A pesar de sus evidentes avances técnicos, las estructuras clásicas comparten con las construcciones megalíticas la supeditación de la luz estructural al uso de arquitebadas monolíticas capaces de soportar los esfuerzos de flexión, hecho que sin duda se convierte en una importante limitación ²⁴.

Lo que verdaderamente distingue al refinado orden clásico de las anteriores estructuras arquitebadas no es, pues, ni su más avanzada tecnología estructural ni tampoco la comprensión arquitectónica sobre la naturaleza de la gravedad que subyace en su forma. La diferencia esencial reside en que sólo en la unidad clásica la expresión y la representación visual de la relación entre las cargas gravitatorias y los soportes estructurales se constituye como idea artística de la arquitectura ²⁵. El orden clásico no sólo reconoce en su forma la ineludible fuerza de la gravedad sobre la materia ²⁶ sino que, además, traduce en acciones visuales la transmisión de los esfuerzos que por ella se producen. Es por ello que, una vez garantizada la estabilidad estructural del conjunto, en el establecimiento del sistema de proporciones de las distintas partes que conforman el orden clásico pesa más la adecuada relación visual entre la carga y el soporte que su eficiencia mecánica ²⁷.

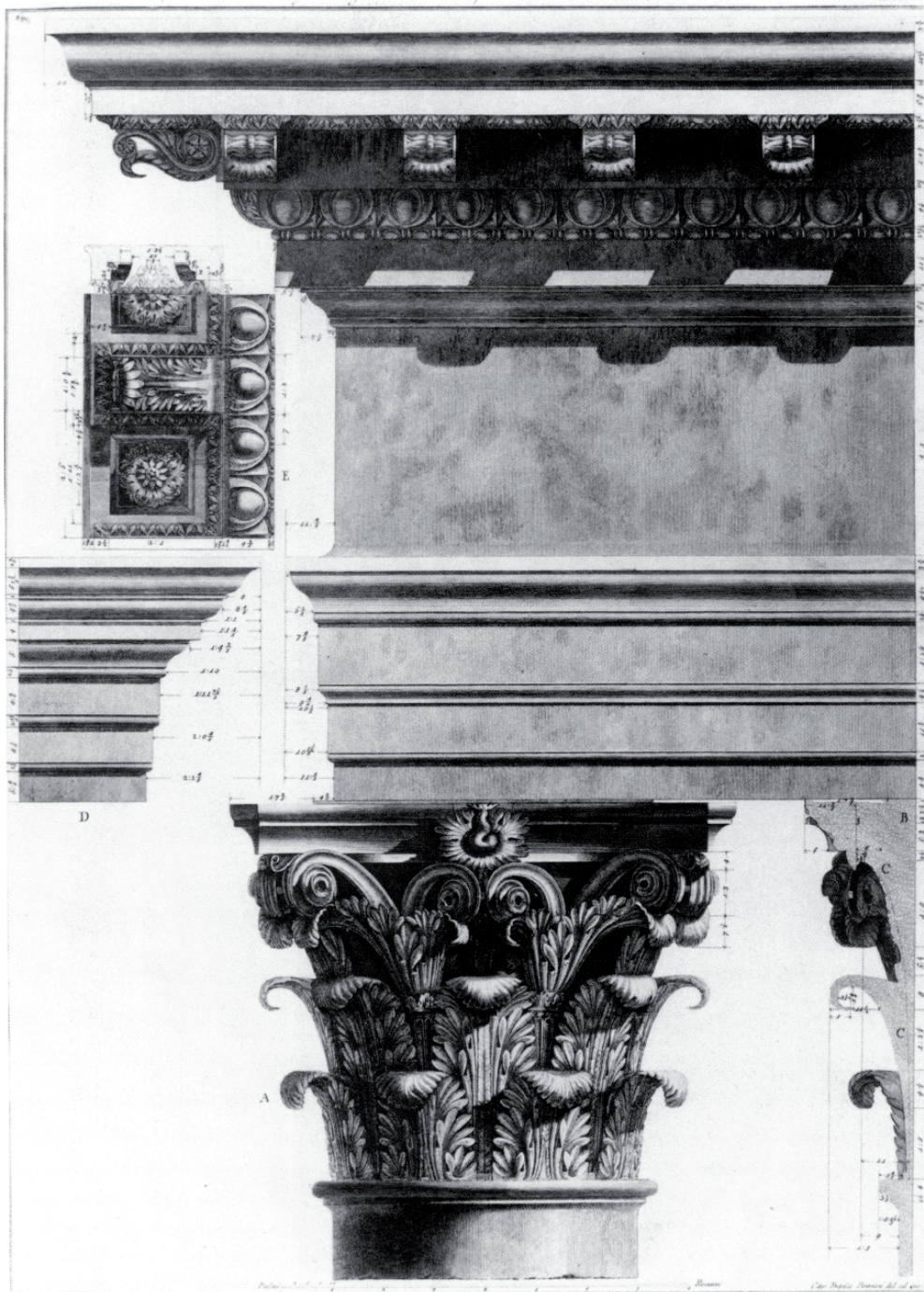
La intrínseca naturaleza sincopada de la estructura arquitebada se enfatiza en el orden clásico. Los distintos elementos que lo conforman se descomponen en diversas partes según su variado comportamiento gravitatorio con la finalidad de detener, explicar y subrayar los sucesivos momentos del descenso de las cargas hacia el suelo ²⁸. Es

24. "En las primeras épocas de la arquitectura los griegos dieron pesadas proporciones a sus edificios; la limitada luz de los intercolumnios y, sobre todo, el gran espesor de los arquitebadas garantizaban su solidez. En estas macizas construcciones la piedra estaba tan lejos de alcanzar sus límites de resistencia que no parecía necesario artificio alguno que le ayudase a salvar los vanos. Pero en el siglo VI a.C., la riqueza material y el gusto por la elegancia llevó a los griegos a construir monumentos más grandes y esbeltos. Los arquitectos vieron con inquietud cómo las posibilidades de rotura aumentaban enormemente y, cuando la luz les parecía excesiva, tuvieron la ingeniosa idea de colocar a contralecho las piedras de arquitebadas y dinteles, Los romanos adoptarían después esta misma idea". CHOISY, *Auguste*; HUERTA FERNÁNDEZ, *Santiago* (ed); GIRÓN SIERRA, *Francisco Javier* (ed): *El Arte de construir en Roma*. Madrid: CEHOPU, 1999, pp. 105-109.

"El dintel de piedra resuelve todos los problemas, pero su utilización para alcances importantes sigue limitada a algunos materiales excepcionales (mármol griego, caliza dura de Egipto), que nunca permitieron sobrepasar los 6,50 m en Grecia (Propileos) y los 8 m en Egipto (Karnak)". ADAM, *Jean-Pierre*: *La Construcción romana: materiales y técnicas*. León: *Editorial de los oficios*, 1996, p. 210.

25. *Las ideas aquí contenidas sobre el orden clásico como expresión arquitectónica del acto de sostener están basadas en el texto "El orden griego" de Manuel Iñiguez (IÑIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, pp. 55-67) que, a su vez, trasluce la influencia de los escritos de Hegel y Schopenhauer sobre la importancia del peso como cualidad gravitatoria en la arquitectura clásica. Las ideas de Arthur Schopenhauer sobre la relación entre la gravedad y la arquitectura han sido expuestas en el apartado 1-3.3.1. La arquitectura como manifestación de la luz y la gravedad.*

26. "En el orden griego (...) lo que se intentará representar son las leyes internas de la Naturaleza, entendidas como sustrato permanente más allá de su cambiante apariencia sensible, eligiendo las leyes de la materia física, las de la gravedad concretamente, en las que se considera que reside el equilibrio activo de la misma –el peso y su necesario contrarresto–, susceptible de ser manifestado a través de la forma". IÑIGUEZ, *Manuel*: *La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo*. Barcelona: *Fundación Caja de Arquitectos*, 2001, p. 43



F.21. Detalle del capitel y el entablamento del orden jónico del pórtico del Pantheon, por Francesco Piranesi. E 1/25.
WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 267

por ello que el dintel prehistórico se transforma en un entablamento constituido por una cornisa, un friso y un arquitrabe, mientras que el menhir se descompone en una columna formada por un capitel, un fuste y una basa.

Cuando los hay, los triglifos del friso representan los puntos donde las armaduras que conforman la estructura de cubrición se apoyan sobre el arquitrabe. Éste, a su vez, recoge el peso de la cubierta que sobre él recae y, por primera y única vez durante todo el descenso de las cargas hacia el suelo, transmite los esfuerzos horizontalmente hacia los soportes. A fin de enfatizar la condición horizontal del arquitrabe en oposición a la verticalidad de los soportes, se provoca la aparición de sombras horizontales mediante tres fajas resaltadas. Así pues, al mismo tiempo que permite distanciar los apoyos para construir un espacio intercolumnario transitivo a la luz, el entablamento representa y formaliza el peso como cualidad necesaria de la arquitectura.

El capitel de la columna, en cambio, da forma al acto de sostener. Se constituye como un elemento de transición entre la horizontalidad y la verticalidad, pues en él se recogen las cargas horizontalmente transmitidas por el arquitrabe y se dirigen verticalmente hacia el cuerpo de la columna. Es, por tanto, un elemento fundamental en la expresión arquitectónica de la relación entre la carga y el soporte. La condición de apoyo del ábaco del capitel queda visualmente resaltada al constituirse como un elemento horizontal cuya finalidad no es otra que aumentar, más allá de lo estrictamente necesario desde un punto de vista estructural, la superficie del cuerpo de la columna a fin de garantizar una correcta recepción de las cargas del arquitrabe. Por otra parte, la elaborada y variada figuración del ornato del capitel no hace más que señalar la singular importancia de este momento en el descenso de las cargas, al mismo tiempo que relaja visualmente las tensiones que se producen en su interior.

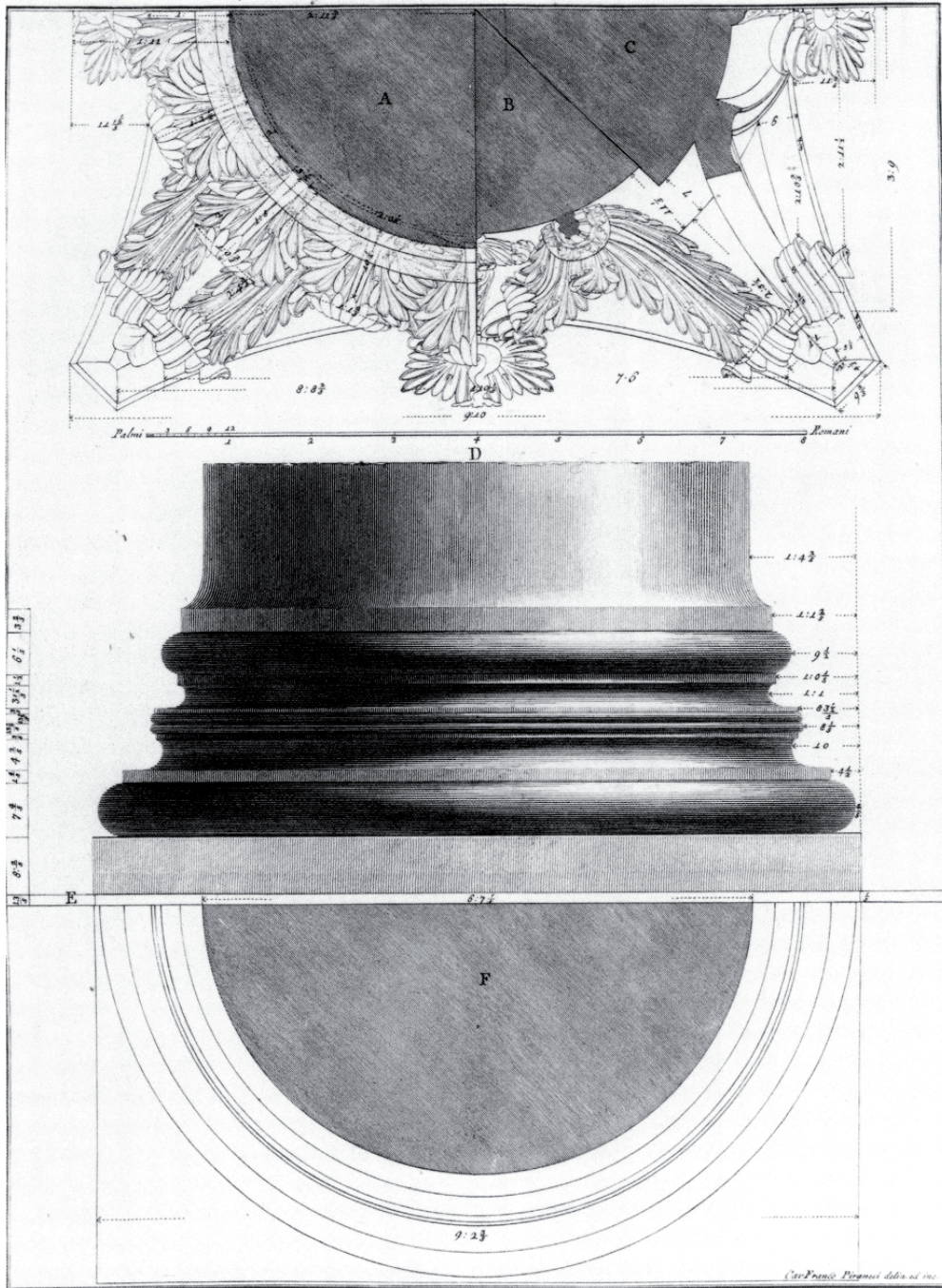
En el fuste se evoca la tensión entre la fuerza descendente del peso y la reacción ascendente del elemento de soporte. En caso de haberlas, las estrías o las acanaladuras descomponen la robustez de la sección en líneas alternadas de luz y sombra que, además de enfatizar

27. "La columna clásica da forma al acto de sostener. Una forma, la única, que hace visible la solidez, el seguro permanecer, y que quiere tranquilizar la vista. En este sentido, la primera cosa que importa es que la columna dé, con relación al peso que sobre ella apoya, la impresión de correspondencia y que, en consecuencia, no sea ni demasiado fuerte ni demasiado débil, que no parezca aplastada ni que se lance hacia lo alto con demasiada facilidad como si no debiese soportar peso alguno", *Hegel. Citado en IÑIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p. 9*

"Queriendo, pues, hacer las columnas de este Templo, como no tenían regla ninguna para sus proporciones, discurrieron el modo de hacerlas aptas para sostener peso y agradables a la vista". De *Architectura, Libro Decem, Libro IV, Capítulo I (De las tres especies de columnas, y de su invención), núm. 2. Ver VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): Los Diez Libros de Arquitectura. Madrid: Akal, 1987, p. 83*

"En tanto que en Roma las matemáticas eran un instrumento empleado en el diseño de la forma, no se utilizaba para calcular estructuras. El único recurso existente en las sociedades precientíficas anteriores a Galileo era establecer reglas prácticas fundadas en observaciones de proporción y escala". *TAYLOR, Rabun: Los Constructores romanos: un estudio sobre el proceso arquitectónico. Tres Cantos: Akal, 2006, p. 50*

28. "Lo que intenta el arquitecto griego a través de los diversos elementos componente del Orden es detener y describir en sucesivos momentos el paso de las fuerzas de peso y de soporte que actúan en su interior: trata de alargar la satisfacción inmediata de estas mismas fuerzas rompiendo su continuidad, conteniéndolas, prolongando su lucha, fijándolas en tiempos concretas de su recorrido, en los que les otorga una forma para poder observarlas y comprenderlas. Las partes así formalizadas corresponden a una precisa definición del trabajo que realizan en el conjunto. *(Continúa en la siguiente página)*



F.22. Detalle del capitel y la basa de la columna del pórtico del Pantheon, por Francesco Piranesi.

WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 268

visualmente la verticalidad intrínseca de la columna, parecen expresar los vectores de fuerza que la recorren internamente. Del mismo modo en que las proporciones de los órdenes vienen determinadas por su adecuada relación visual, la éntasis del fuste de la columna es de origen visual más que estático.

La basa, en caso de existir, se configura como el último momento del descenso de las cargas a través de la estructura antes de llegar finalmente al pavimento. Su misión es fijar visualmente la posición de la columna sobre el plano horizontal. La alternancia de luces y sombras provocada la superposición vertical de astrágalos, toros, filetes y escocías, parece simular ser el resultado del aplastamiento al que se ve sometida la basa por efecto del peso transmitido por la columna.

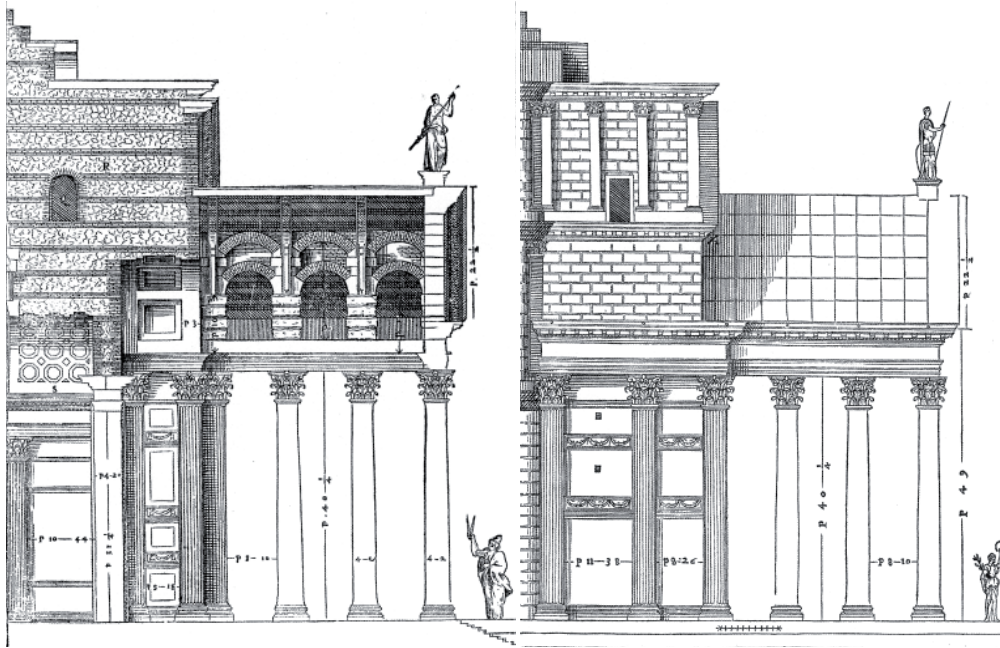
Se evidencia, pues, que lo que realmente distingue al orden clásico de las estructuras arquitecadas erigidas con anterioridad es su voluntad de expresar visualmente todos y cada uno de los momentos que suceden durante el descenso de las cargas desde la cubierta hasta el suelo. Por medio de su forma, y con la inestimable ayuda de la luz y de la sombra, cada elemento del orden clásico expresa y resalta visualmente su función para con la gravedad ²⁹. En su "Die Tektonik der Hellenen" (La Tectónica de los Helenos, 1843-1852) ³⁰, Bötticher distingue el concepto de forma-núcleo (kernform), que se identifica con la estructura estáticamente funcional y mecánicamente necesaria de cada parte del objeto arquitectónico, de la noción de forma-artística (kuntsform), que se refiere a la caracterización o expresión artística por la que la función estático-mecánica se hace aparente. Según esta distinción, la tectónica de la estructura arquitecada clásica no viene dada por la forma-núcleo, es decir, por la capacidad de la estructura para portar y soportar correctamente las cargas, sino por la capacidad de la forma-artística de transmitir y expresar una correcta correspondencia entre la construcción y la estructura, una adecuada relación visual de las partes de la componen, y una acertada articulación entre la carga y el soporte. Son éstas las cualidades que hacen del arquetipo estructural clásico un elemento puramente arqui-*tectónico*, totalmente distinto en este sentido a las estructuras arquitecadas anteriores.

28 (cont.) De esta manera, el Orden se configura en una profunda interacción entre las partes y el todo. Podemos hablar de una acentuación en la representación de la estructura por encima de la realidad de la misma. La forma técnica de la que se parte es mucho más escueta en lo que se refiere al número de sus partes, pues sólo emplea las útiles, las necesarias desde una lógica estructural; ahora bien, su objeto no es la comunicación sino la eficacia. Por el contrario, la forma arquitectónica, para explicar, para decir la construcción, necesita afirmar, repetir, acusar, subrayar, centrándose precisamente en aquellos puntos en donde se evidencia con claridad la discontinuidad entre los diversos elementos de la construcción lignaria original". *ÍNIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p. 66.*

29. "Cada orden mantiene una relación directa, íntima y precisa con la luz. (...) La acumulación de sombra en el capitel es inversamente proporcional a la fortaleza del orden. (...) En mi opinión, nos encontramos ante uno de los primeros momentos en los que se relaciona conscientemente la manipulación de la sombra con la percepción de la ligereza. En principio, a mayor cantidad de sombra mayor es la sensación de levedad, pero también es fundamental la precisión con que se sitúa esta sombra para generar el efecto de ingravidez pretendido". *DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, pp. 98-99.*

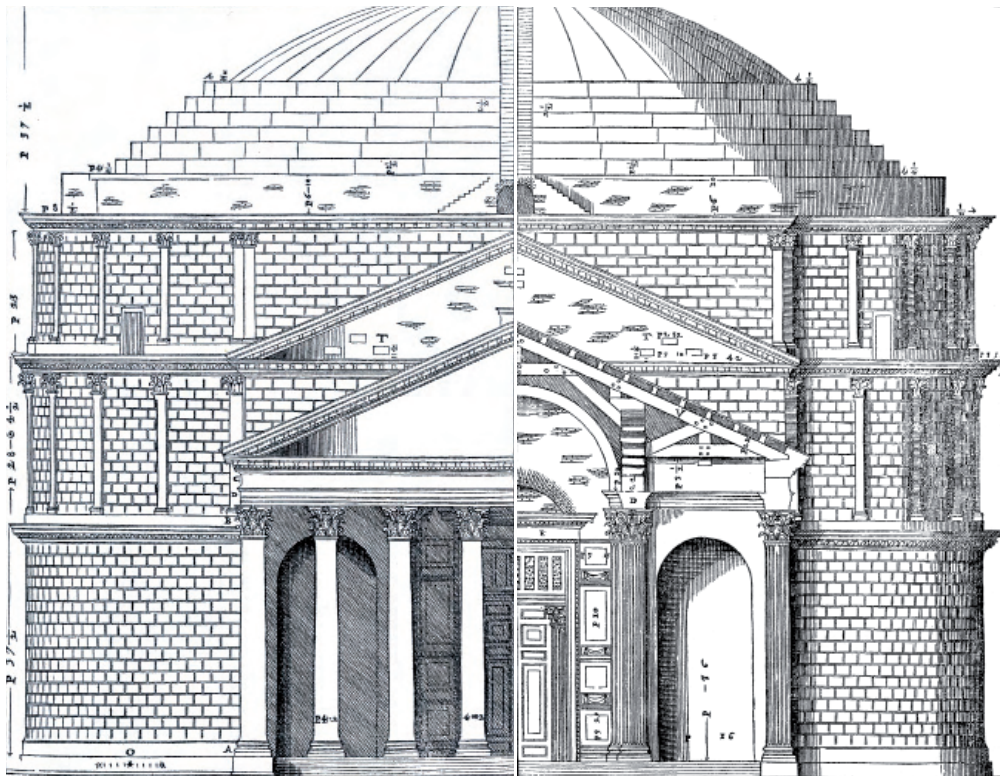
"Las articulaciones y la sintaxis de los elementos constructivos (en el capitel, en la columna), al formalizar las estructuras de obras de arquitectura, se han llenado de figuras más o menos gratuitas, que sólo pueden explicarse como signos demostrativos visuales de la inmersión de lo construido en el campo gravitacional. La arquitectura es, a través de esos signos, un espejo de esa emocionante inmersión. Nos advierte primero y luego nos conmueve física y psíquicamente al comprobar la obediencia y dependencia común de toda la materia a la ley natural". *NAVARRO BALDEWEG, Juan: Navarro Baldeweg. Madrid: Tanais, 2001, p. 16. La Caja de resonancia.*

30. Ver apartado I-2.2.2.2. Bötticher y Semper: estructuralismo y espacialidad arqui-Tectónica.



F.23. Sección y alzado lateral del pórtico del Pantheon, por Andrea Palladio.

WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 244



F.24. Sección y alzado frontal del pórtico del Pantheon, por Andrea Palladio.

WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, pp. 242 y 243

III.3.3.2. La ligereza inclinada como mecanismo de cubrición espacial

*“El muro ha sido hecho por necesidad, porque lo pesado se desplaza naturalmente hacia abajo y lo ligero hacia arriba, esto es, porque las piedras y los cimientos se ponen abajo, encima los ladrillos por ser más ligeros, y en lo más alto las maderas por ser todavía más ligeras.”*³¹

Aristóteles

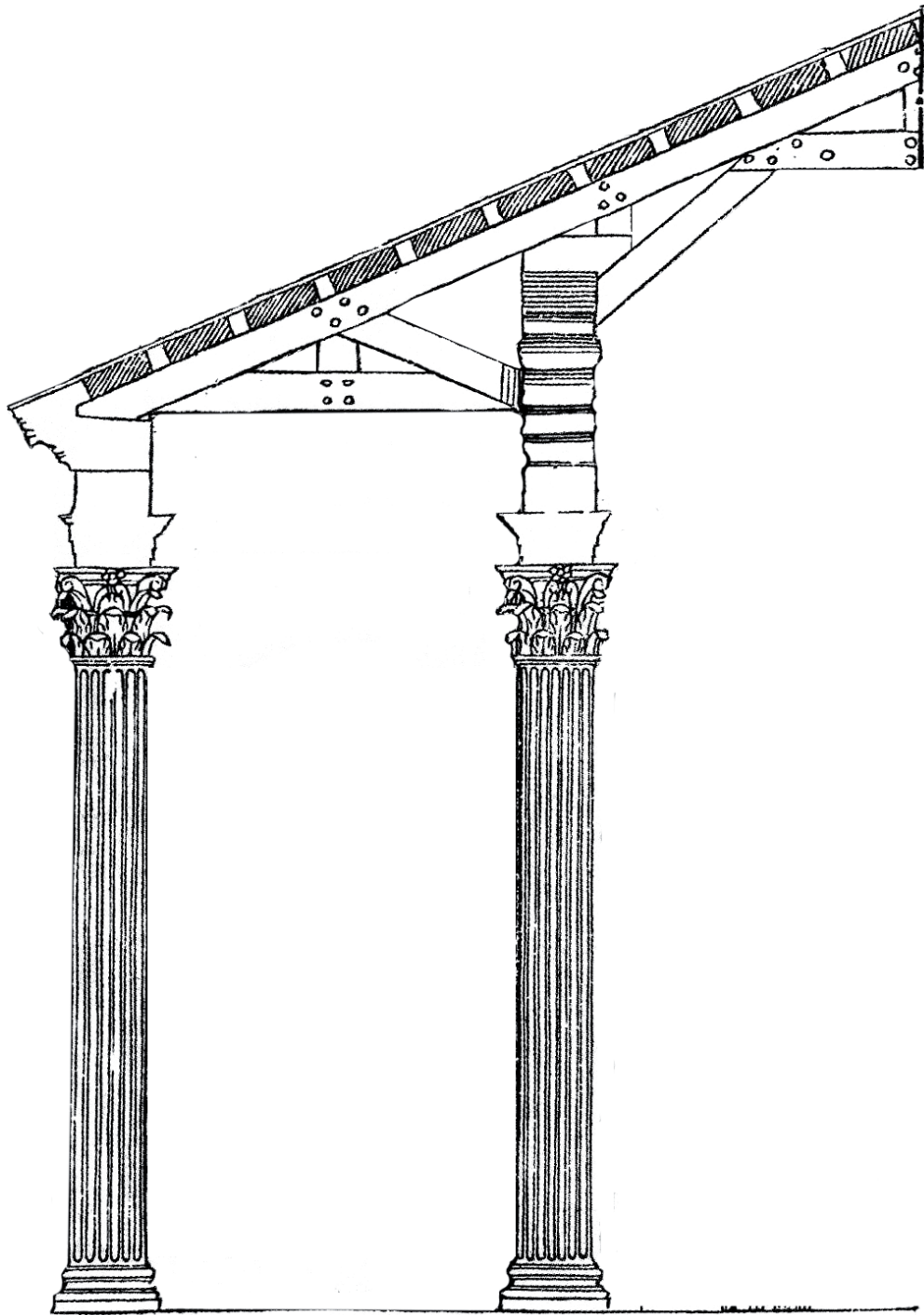
Qué duda cabe de la importancia fundamental de la cubierta en el encauzamiento de la gravedad con fines espaciales. Aunque en la actualidad el espacio del pórtico de la *pronaos* está techado por una estructura triangulada de madera a dos aguas, está documentado que hasta el año 1632 dicha estructura fue de bronce³². Así lo refleja Auguste Choisy en su tratado “*L’Art de bâtir chez les Romains*” (*El arte de construir en Roma*, 1873) quien, además, se atreve a afirmar que la del Pantheon “*se trata de la primera aplicación de un perfil metálico a una armadura*”³³. Sin embargo, la mayoría de los investigadores actuales recelan de esta posibilidad y otorgan al bronce de aquella armadura el papel de simple revestimiento.

La geometría y el material de la cubierta inclinada permiten introducir en la presente investigación algunas cuestiones importantes en cuanto a las posibilidades de encauzar la gravedad con el objetivo de cubrir el espacio. No obstante, hay que señalar desde un principio que, otra vez, la cubierta clásica no aportan ninguna novedad conceptual con respecto a etapas anteriores de la historia de la arquitectura, pues se tiene constancia de que los constructores contemporáneos al Stonehenge erigieron, también, grandes cubiertas inclinadas de madera. Sin embargo, dado que no ha habido la oportunidad de analizar las especificidades de este tipo de cubriciones en el capítulo anterior al no estar presentes en el Stonehenge, la cubierta del pórtico del Pantheon se convierte en una buena excusa para llevar a cabo la reflexión que de ella se deriva.

31. “Física”, *Libro II*, 200a. ARISTÓTELES; ECHANDÍA, Guillermo R. (ed): Física/ Aristóteles. Madrid: Gredos, 1995, pp. 168-169

32. “Año 1632: Urbano VIII ordenó el expolio de más de doscientas toneladas de bronce antiguo del sofito del pórtico para la construcción de ochenta cañones del Castillo de Sant’Angelo y el Baldaquino del Vaticano”. MONTERO FERNÁNDEZ, Francisco Javier: El Panteón: imagen, tiempo y espacio: proyecto y patrimonio. Sevilla: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2004, p. 88

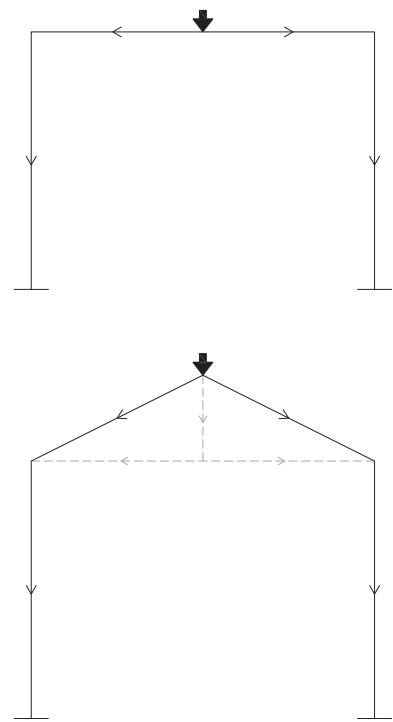
33. “Aunque los romanos mantuvieron la tipología de las antiguas armaduras etruscas, quisieron enseguida sustituir la madera por un material menos alterable. (...) Emplearon el bronce, metal fácil de trabajar y cuyas uniones son muy sencillas de realizar. (...) En el siglo primero antes de nuestra era, los romanos utilizan sólo el bronce para construir la armadura del pórtico que está delante de la rotonda de Agripa. Esta célebre armadura subsistió hasta mediados del siglo XVII y los arquitectos del Renacimiento pudieron observarla y describirla. Nos han dejado algunos dibujos pero, por una negligencia irreparable, éstos son tan imprecisos e incompletos que no puede distinguirse más que la forma general de la obra y su disposición de conjunto. (...) Es inútil buscar más detalles en Palladio; para explicar las ensambladuras sólo trazó una sección a escala pequeña, un simple boceto que precisa información complementaria. Resultan también muy incompletos un croquis de Serlio y las noticias dispersas en los escritos del siglo XVII. «Cada viga -dice una de estas noticias- se compone de tres chapas gruesas de bronce, ensambladas con clavos del mismo metal», y de acuerdo con esta indicación, Serlio dibuja el pórtico del Panteón con sus vigas en forma de *u*. (...) El arquitecto pareció dejarse llevar más por las reminiscencias de las construcciones en madera que por principios específicos en el uso del metal y la cercha del Panteón no es más que una armadura común, ejecutada con vigas huecas. Se trata de la primera aplicación de un perfil metálico a una armadura”. CHOISY, Auguste; HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago (ed); GIRÓN SIERRA, Francisco Javier (ed): El Arte de construir en Roma. Madrid: CEHOPU, 1999, pp. 135-137



F.25. Detalle de la estructura inclinada del pórtico del Pantheon. Montaje del autor a partir de un dibujo de Andrea Palladio.

Desde un punto de vista geométrico, la cubrición espacial mediante elementos inclinados representa un avance conceptual importante con respecto al sistema arquiteado. Como ya se ha comentado en reiteradas ocasiones, una de las principales dificultades con que tiene que lidiar el arquiteado reside en la necesidad de encauzar de manera totalmente horizontal las acciones de origen gravitatorio cuando, precisamente, la gravedad es una fuerza cuya dirección natural es la vertical. Así, en la estructura arquiteada la gravedad se encauza *por fuerza*, gracias a la resistencia del material que conforma el elemento estructural horizontal. En cambio, al introducir una componente vertical en la translación horizontal de dichas acciones gravitatorias, la inclinación de la cubierta contribuye a reducir notablemente las dificultades derivadas del necesario encauzamiento horizontal de las cargas. La diferencia conceptual principal reside en que, mientras que el arquiteado se concibe como un elemento estructural que *resiste* a los efectos de la gravedad, la cubierta inclinada no sólo resiste a estas acciones sino que también las *encauza*. En la inclinación del elemento de cubrición subyace el reconocimiento implícito de la verticalidad gravitatoria, utilizada aquí en favor del diseño de un elemento estructural por naturaleza horizontal.

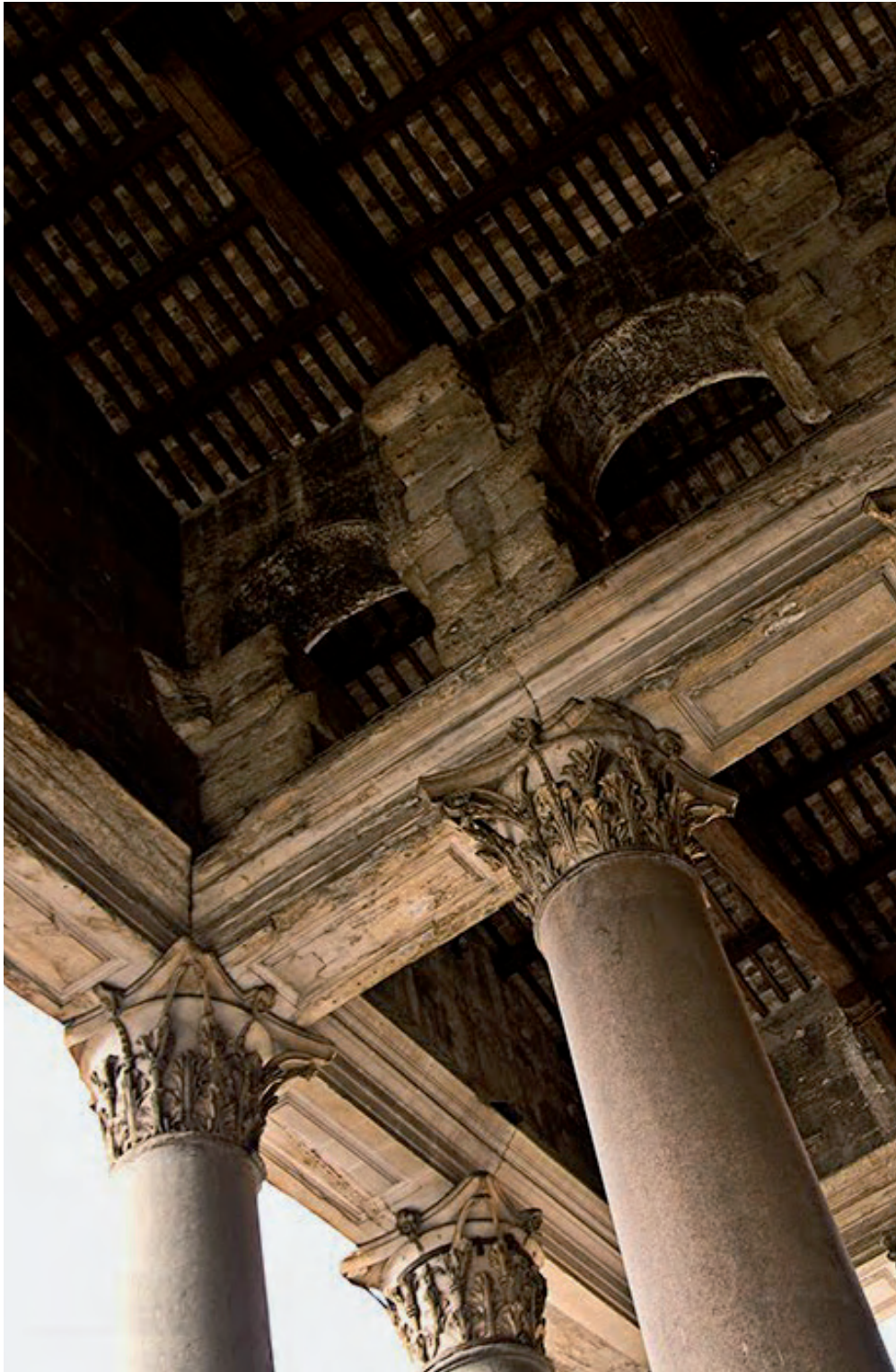
Por otra parte, a lo largo de toda la historia de la arquitectura ha sido habitual la utilización de elementos pesados -como el bloque de piedra o el ladrillo cerámico- en la construcción de los elementos portantes, mientras que para la construcción de los elementos de cubierta ha sido común el uso de materiales más ligeros -como la viga de madera-. Según la cita que abre este apartado, Aristóteles explica esta disposición material de la arquitectura mediante su teoría física sobre lo pesado y lo ligero³⁴. Se insiste, una vez más, en la idea de que, tanto en la naturaleza como en la arquitectura, los elementos más graves debe encontrarse en contacto con la tierra de acuerdo con la naturaleza térrea de la gravedad, mientras que los más ligeros deben situarse en las zonas más elevadas³⁵. Y, como no podía ser de otra manera, el pórtico del Pantheon responde perfectamente a este esquema, pues los elementos sustentantes, como las columnas y el entablamento son de piedra, los caballetes que soportan la cubierta son de ladrillo y, finalmente, la armadura del techo es de madera.



F.26. Diagramas del descenso de cargas correspondientes a una estructura arquiteada y a una cubierta inclinada a dos aguas. Dibujos del autor.

34. Para una completa explicación de la concepción aristotélica de lo pesado y lo ligero, ver apartado II-2.1.1. La gravedad como tendencia natural de los cuerpos graves.

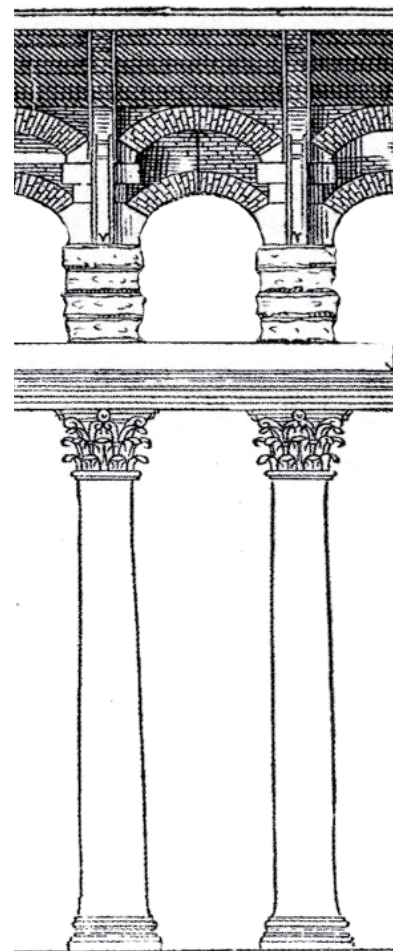
35. Cabe mencionar que, a tal efecto, Galileo Galilei matiza la idea aristotélica sobre la gravedad y la ligereza absolutas introduciendo la noción de "gravedad específica". Ver apartado II-3.1.1. El principio del fin de la gravedad aristotélica.



F.27. Visión inferior de la estructura del pórtico del Pantheon, donde se pueden observar los caballetes cerámicos y la cubierta de madera apoyados en el arquitrabe.

El distinto origen natural de la piedra y la madera explica, también, su variado comportamiento mecánico y por tanto, su diversa idoneidad de aplicación estructural. Durante millones de años la pétreo corteza terrestre se ha visto sometida a unos esfuerzos de compresión titánicos e infatigables por efecto de la acción de la gravedad. De ahí la elevada resistencia de la piedra a los esfuerzos a compresión, que la convierten en un material idóneo para la construcción de elementos estructurales verticales. Sin embargo, la ausencia de esfuerzos a tracción durante su proceso geológico hace de la piedra un material de muy baja resistencia a este tipo de esfuerzo y, por tanto, altamente vulnerable a los esfuerzos de flexión. Es por ello que su aplicación en elementos de cubrición presenta importantes limitaciones. En cambio, las ramas y los troncos de los árboles deben poder resistir, además de su propio peso, las deformaciones por flexión provocadas por acciones perpendiculares a su eje, como por ejemplo las ejercidas por el viento. Ello explica la elevada resistencia de la madera a esta clase de esfuerzos, que la convierte en un material idóneo para la construcción de elementos estructurales horizontales sometidos a esfuerzos de flexión por causa del peso. Además, la madera acepta la posibilidad de construir armazones rígidos mediante el ensamblaje de diversas piezas, hecho que sin duda representa una notable ventaja frente a aquellos sistemas estructurales en los que la luz a cubrir está supeditada a la obtención de grandes elementos monolíticos directamente de la naturaleza.

Sin embargo, tal como apunta Choisy, *“para ir más allá, para aumentar todavía más la resistencia de los arquivoltas o para espaciar más los apoyos, había que cambiar radicalmente el sistema de construcción, era preciso renunciar a los dinteles monolíticos y recurrir, bien a las bóvedas de hormigón, bien a las de cantería”*³⁶. En efecto, el uso de las formas estructurales curvas de cubrición espacial, como el arco, la bóveda y la cúpula, constituye una de las más importantes aportaciones de la construcción romana a la historia de la arquitectura. A lo largo del recorrido axial de aproximación, las curvas del arco de medio punto del *Arcus Pietatis*, los pequeños caballetes arqueados que sostienen la cubierta del pórtico, o el umbral abovedado de la puerta de acceso al interior de la *cella*, parecen ser el prelude de la imponente estructura cupulada que cubre el espacio del interior del templo.



F.28. Estructura tripartita del pórtico: columnas, arcos a modo de caballetes y cubierta inclinada. Montaje del autor a partir de un dibujo de Andrea Palladio.

36. CHOISY, Auguste; HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago (ed); GIRÓN SIERRA, Francisco Javier (ed): *El Arte de construir en Roma*. Madrid: CEHOPU, 1999, p. 109

III. 3.4. EL ESPACIO ESTRUCTURADO POR LA CURVATURA DE LA GRAVEDAD

*“El espacio interior, y con él todo el problema del abovedamiento, llegó a ser el objetivo principal de la arquitectura.”*³⁷

Sigfried Giedion

37. GIEDION, Sigfried: *El Presente eterno: los comienzos de la arquitectura*. Madrid: Alianza, 1981, p. 491

38. “Desde tiempos remotos, los habitantes del centro de la península Itálica desarrollaron una cultura del agua. Como si fueran tazas bajo un embudo, las casas itálicas recogían el agua y la guardaban bajo tierra. Era, en cierto sentido, más importante para la vida romana que el fuego. Con el tiempo se convertiría en un destacado elemento de la arquitectura romana por derecho propio. En miles de edificios del periodo imperial no sólo se la canalizaba y almacenaba, sino que se la mostraba con profusión. El agua era un elemento capital y definidor de gran parte de la arquitectura”. TAYLOR, Rabun: *Los Constructores romanos: un estudio sobre el proceso arquitectónico*. Tres Cantos: Akal, 2006, p. 89

39. Vitruvio dedica el octavo libro de su célebre tratado al agua: “He expuesto en este Libro cuanto he podido acerca de la virtud y diversidad del agua, sea su utilidad, y el modo de conducirla y de experimentar su bondad”. VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): *Los Diez libros de arquitectura*. Madrid: Akal, 1987, p. 207. El capítulo VI de dicho libro lo dedica a las nivelaciones de las aguas y el capítulo VII a su conducción.

40. “Lo mismo que la arquitectura realiza en lo que se refiere a la Idea de la pesantez cuando esta aparece ligada a la solidez, realiza aquél [el arte de la conducción del agua] para la misma Idea allí donde se une a la fluidez”. SCHOPENHAUER, Arthur: *El Mundo como voluntad y representación (4a Ed)*. México: Porrúa, 1997, p. 175 (Libro III, sección XLIII). *Sobre el papel de la gravedad en la arquitectura dentro del marco de la filosofía de Schopenhauer, ver el apartado I-3.3.1. La arquitectura como manifestación de la luz y la gravedad.*

Desde tiempos remotos los habitantes del centro de la península itálica desarrollaron una importante cultura del agua, de la que la civilización que romana fue heredera³⁸. A lo largo de toda su historia los romanos erigieron en sus dominios una gran cantidad de variadas construcciones donde el agua tenía un papel protagonista. Las más imponentes de estas construcciones fueron, sin duda, los acueductos y los complejos termas, obras hidráulicas sin precedentes en la antigüedad donde los constructores romanos mostraron un gran dominio en el arte de la conducción del agua que, en tanto que materia, se ve sometida ineludiblemente a las leyes de la gravedad. Los romanos aprovecharon la fluidez del agua para encauzarla y canalizarla por gravedad, demostrando con ello un hábil manejo de su peso y su tendencia natural a desplazarse hacia abajo, un gran dominio de la horizontal, y un profundo conocimiento de las dimensiones de las secciones adecuadas para su transporte³⁹.

En la maestría sobre el control gravitatorio de la materia líquida debe encontrarse, probablemente, el origen del dominio romano sobre los efectos de la gravedad en la materia sólida. En efecto, tal como apuntó el filósofo Arthur Schopenhauer, puede establecerse entre el agua y las cargas de una estructura una cierta analogía que hace que el dominio sobre la canalización de la primera tenga una incidencia directa en la manera de encauzar las segundas⁴⁰, pues tanto el agua como las cargas de la construcción deben ser correctamente transmitidas, encauzadas, dirigidas y canalizadas por efecto de la gravedad hacia su destino final.

El dominio del encauzamiento gravitatorio del agua no es más que un síntoma de una comprensión de la naturaleza física y arquitectónica de

la gravedad mucho más profunda que la de época anteriores que, en conjunción con una tecnología estructural y constructiva enormemente más desarrollada que la de las civilizaciones precedentes, dio lugar al nacimiento de una nueva concepción del espacio arquitectónico que marcó el rumbo de la arquitectura durante más de milenio y medio. Y, el Pantheon de Roma, se constituye pieza clave de esta nueva etapa en la historia de la arquitectura.

III.3.4.1. Del dintel al arco: la gravedad como necesidad estructural

“La contribución de Roma a la arquitectura monumental deriva principalmente del amplio uso del arco semicircular.”⁴¹

Robert Mark

Tal como se ha expuesto en los apartados anteriores, las primeras estructuras con que el ser humano encauza la gravedad son las *estructuras arquitebadas*, en las que la cubrición del espacio se confía a un único elemento que, colocado horizontalmente, trabaja principalmente a flexión. Así concebidas, éstas se constituyen como *estructuras resistentes* cuya principal misión y dificultad reside, precisamente, en resistir los esfuerzos provocados por el peso gravitatorio. Este cometido, relativamente fácil de satisfacer en los elementos verticales de soporte, plantea graves problemas en los elementos horizontales de cubrición espacial, especialmente si son construidos con materiales pétreos. Se deduce entonces, ya desde los inicios mismos de la arquitectura, que el quid de la cuestión reside en la adecuada resolución gravitatoria de los elementos de cubrición. Esto induce al arquitecto a desarrollar constantemente nuevas formas de cubrición acordes con la tecnología constructiva, la intuición sobre la gravedad y la concepción del espacio arquitectónico, de cada momento de la historia.

Detectada la gran dificultad de resistir los efectos del peso sobre los elementos estructurales horizontalmente dispuestos, se opta por introducir una componente vertical en el elemento de cubrición. En el fondo de tal operación subyace el reconocimiento implícito de la

41. MARK, Robert: Light, wind and architecture: the mystery of the master builders. Cambridge: MIT, 1990, p. 69



F.29. Detalle de la parte superior de la puerta de acceso al interior del Tesoro de Atreo.

naturaleza vertical de la gravedad. Además, se advierte que no basta con *resistir* los esfuerzos provocados por el peso de los elementos, sino que también es necesario *portar* los efectos de la gravedad sobre la materia hasta el suelo. Nace así el concepto de *estructura portante*, que difiere de la resistente en que asume en su forma la ineludible necesidad de transmitir el peso de las cargas. Se dota así de una cierta inclinación a los elementos de cubrición que permite disminuir los esfuerzos de flexión en favor de los de compresión, mucho más convenientes cuando, por mor de la perdurabilidad, hay la voluntad de construir en piedra. En este caso, el megalito horizontal se desdobra en dos grandes elementos pétreos cuyos extremos inferiores quedan apoyados en la parte alta de los soportes, quedando sus lados superiores mutuamente apoyados. La estabilidad de la estructura queda asegurada en tanto en cuanto la distancia entre los soportes se mantiene, misión nada fácil debido a la aparición de empujes laterales que tienden a hacer que los elementos de soporte se inclinen hacia afuera aumentando la separación de los puntos de apoyo. Para paliar estos inconvenientes es necesario asegurar la estabilidad horizontal de los elementos verticales mediante la disposición de elementos y masas a modo de contrafuerte.

La necesidad de seguir recurriendo a grandes monolitos para cubrir el espacio induce al arquitecto a buscar una solución alternativa. Aparece entonces la *estructura de cubrición de avance por hiladas*⁴², que no es más que la desmultiplicación del principio del dintel⁴³. Esta estructura se basa en el apilamiento de bandas pétreas horizontales desplomadas creando un pequeño voladizo, de modo que los soportes verticales se van aproximando mutuamente a medida que aumenta su altura, llegando a cubrir de este modo el espacio. La solución es enormemente ingeniosa porque consigue cubrir el espacio mediante elementos cuyo funcionamiento estático es fundamentalmente vertical: la función del soporte se amplía y sirve, además, para cubrir el espacio, lo que porta y cubre es lo mismo.

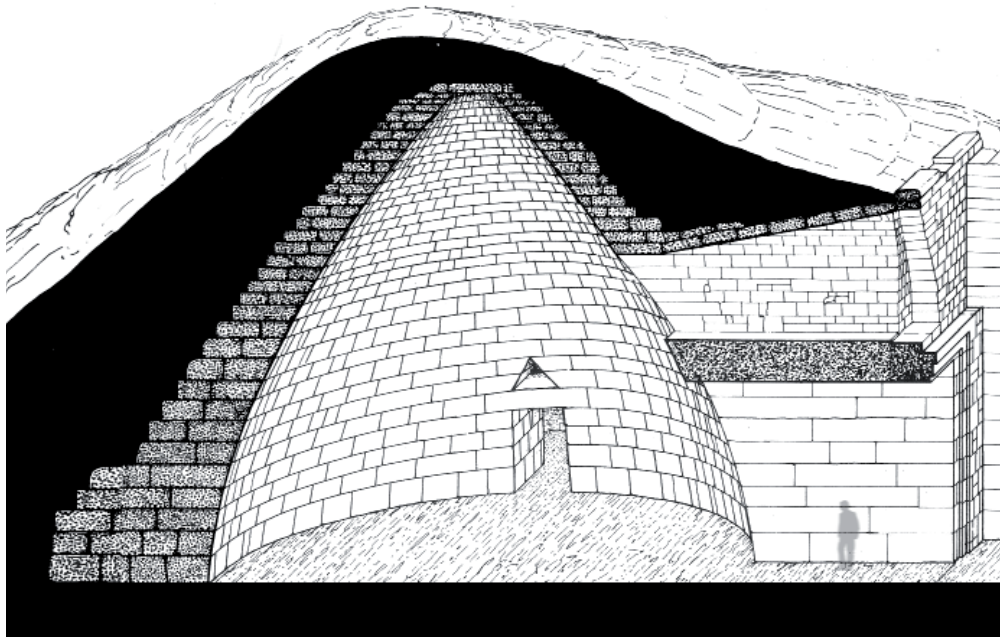
Aunque algunas de las construcciones más antiguas utilizan aún el arcaicismo de rematar la estructura en su parte superior con una gran losa, en realidad ésta es innecesaria pues la estructura

42. "Se le ha llamado falsa bóveda o cúpula del mismo modo que podríamos llamarlas falsamente adinteladas. Términos negativos que de algún modo revelan que el idioma reniega de una de las grandes aportaciones de su cultura. Los ingleses llaman "corbelled arch" en positivo a una construcción que apenas usaron y que nosotros deberíamos designar como cúpula por avance de hiladas". *ESCRIG, Félix: Las Grandes estructuras de los edificios históricos: desde la antigüedad hasta el gótico. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 1997, p. 13*

43. "Este procedimiento, el más primitivo y somero de los que permiten cubrir el espacio, no es más que la desmultiplicación del principio del dintel". *ADAM, Jean-Pierre: La Construcción romana: materiales y técnicas. León: Editorial de los oficios, 1996, p. 178*



F30. Sección general del Tesoro de Atreo. MACDONALD, W. L.; *The Pantheon: design, meaning and progeny*. Cambridge: Harvard University Press, 1976, p. 24

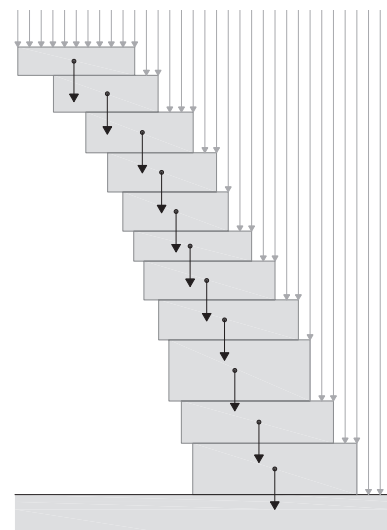


F31. Sección de la cúpula y el acceso del Tesoro de Atreo. MACGREGOR, Anne; *Domes*. Leeds: Pepper Press, 1981

puede completarse utilizando solamente piedras de pesos y dimensiones relativamente manejables. Cada una de estas piedras recibe el nombre de *corbín*⁴⁴, y tiene una parte apoyada y la otra en voladizo. La estabilidad frente a la posibilidad de bascular y precipitarse al vacío queda garantizada siempre y cuando el peso de la parte apoyada sea superior al peso de la parte en voladizo y, a tal efecto, basta con que la longitud de cola sea superior a la de vuelo o, lo que es lo mismo, que el centro de gravedad de la pieza se encuentre dentro del área de apoyo⁴⁵. Además, estos elementos de cubrición acostumbran a estar cubiertos por materiales graves como la tierra o la piedra, cuyo peso sirve para cargar más la cola de cada corbín. Así pues, mientras que el peso es la principal amenaza a la integridad de la cubrición de la estructura adintelada, en la estructura por avance de hiladas se convierte en su garantía de estabilidad. Ésta es, pues, una estructura que fundamentalmente trabaja a compresión, es decir, transmitiendo las cargas verticalmente, aunque el pequeño voladizo provoca la aparición de ciertos esfuerzos de flexión y cortante que pueden ser fácilmente neutralizados mediante el adecuado grosor de la pieza.

Mientras que en la estructura arquivada el cambio de dirección en la transmisión de las cargas se constituye como un momento único y especial, en la estructura por avance de hiladas este momento se desmultiplica en cada uno de los numerosos elementos que la conforman. Desde un punto de vista geométrico la estructura en voladizo puede considerarse un híbrido entre la adintelada y la inclinada pues de la primera conserva la dicotomía entre la horizontal y la vertical y, de la segunda, su dirección oblicua.

Sin embargo, pronto se descubren las ventajas prácticas de dotar al voladizo de una cierta curvatura emulando el perfil que se produce de forma espontánea cuando, por efecto de un derrumbe en un muro o una caverna, se crea una cavidad estable y sensiblemente cónica llamada *arco natural*⁴⁶. A partir de entonces será habitual la introducción de una cierta curvatura en la construcción de *falsos arcos, bóvedas o cúpulas*, a fin de acercar el perfil de la estructura a la curva natural del arco.



F.32. Diagrama mecánico de la estructura de avance por hiladas en voladizo. Dibujo el autor.

44. "De corvus, "corbeau" (cuervo), nombre que designa cada ménsula en vuelo, también llamada "corbin", por analogía con el pájaro posado sobre la parte superior de un muro". ADAM, Jean-Pierre: *La Construcción romana: materiales y técnicas*. León: Editorial de los oficios, 1996, p. 210, nota 15.

45. Para un estudio analítico del funcionamiento mecánico de las piezas que forman la estructura por avance de hiladas, ver ESCRIG, Félix: *Las Grandes estructuras de los edificios históricos: desde la antigüedad hasta el gótico*. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 1997, pp. 19-23

Por otro lado, no basta con asegurar la estabilidad de cada pieza, sino que hay que garantizar la estabilidad del conjunto de la estructura. A tal efecto, es necesario garantizar que el centro de gravedad del polígono de sustentación se encuentre a plomo con respecto del soporte, hecho que se consigue desplazando el centro de gravedad del conjunto hacia el exterior y hacia abajo mediante el afinamiento del perfil del arco en la parte alta y su ensanchamiento en la parte baja. Ver ADAM, Jean-Pierre: *La Construcción romana: materiales y técnicas*. León: Editorial de los oficios, 1996, p. 180, figura 391

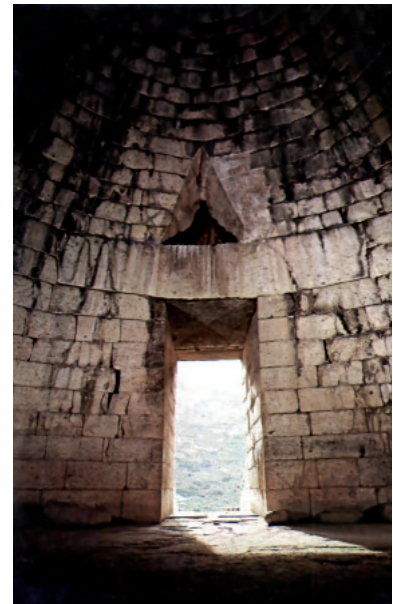
Así pues, las condiciones de equilibrio que se exigen a esta estructura de cubrición espacial son las mismas que se exigen a un elemento estructural vertical, esto es, que la proyección del centro de gravedad se encuentre dentro de su base de apoyo. Esta cuestión fue analizada ya en el apartado III-2.2. La verticalidad del peso y la caída, a propósito del análisis de las condiciones de equilibrio de los menhires megalíticos prehistóricos del Stonehenge.



F33. Interior de la cúpula del Tesoro de Atreo.

El Tesoro de Atreo, construido en Micenas aproximadamente entre el 1.350 y el 1.250 a.C., se constituye como un magnífico ejemplo del abandono de la estructura adintelada en favor de la estructura por avance de hiladas. El acceso al interior de la tumba se produce a través de un corredor de treinta y seis metros de largo por otros seis de ancho llamado *drolos* que, flanqueado por dos muros de piedra que llegan a alcanzar una altura de hasta catorce metros, discurre a cielo abierto introduciéndose en el montículo de tierra que cubre la tumba. Al final de este corredor se encuentra la gran puerta que da acceso al *stomion* o pasillo interior, cubierto por un enorme dintel monolítico horizontal que, en realidad, soporta únicamente su propio peso. La traslación horizontal del peso de las cargas de las tierras que cubren el espacio y que hace posible la existencia de este pasillo interior corresponde, realmente, a la estructura de avance por hiladas de perfil rectamente inclinado que se encuentra ubicada justo encima del dintel antes referido⁴⁷. El *stomion* da acceso a un espacio de planta circular de 14,6 metros de diámetro cubierto por una *falsa cúpula* de 13,5 metros de altura. Considerada como la máxima expresión de la estructura por avance de hiladas, fue la mayor cúpula jamás erigida hasta la construcción del Pantheon de Adriano, milenio y medio más tarde. El uso de piedras de aproximadamente una tonelada perfectamente talladas denota un gran dominio de la estereotomía, y el perfil prácticamente parabólico de la sección de la cúpula, apuntado en su parte superior, indica un gran dominio empírico de la estática estructural.

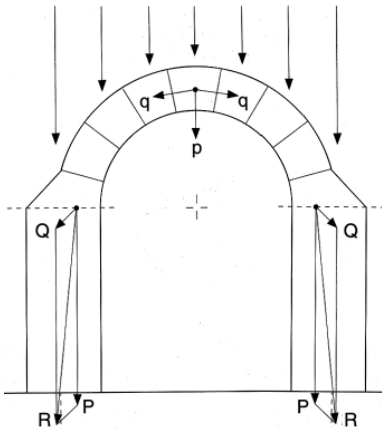
No obstante, si bien es cierto que este tipo de estructuras representan un avance importante con respecto a las arquitrabadas al utilizar el peso a su favor, la tendencia a la caída libre de las partes que la conforman sigue representando una amenaza. Se descubre, entonces, que más allá de constituirse en una mejora sustancial para la estabilidad del conjunto, la curvatura de la estructura puede colaborar activamente en la cubrición del espacio. Nace así el *arco de descarga formado por dovelas*, una estructura cuya geometría curva permite encauzar el peso de las cargas gravitatorias y, al mismo tiempo, utilizar la tendencia a la caída por efecto de la gravedad para garantizar la estabilidad del conjunto.



F.34. Vista del acceso del Tesoro de Atreo desde el interior de la cúpula.

46. "El voladizo artificial, compuesto para permitir una abertura en un muro o para cubrir un volumen, es en realidad una forma natural capaz de producirse de forma espontánea, por ejemplo, como consecuencia de un derrumbamiento de la bóveda de una sala de caverna; se produce entonces una cavidad estable y sensiblemente cónica llamada "ahuecamiento en forma de campana", que no es más que un voladizo de los elementos del suelo que han recobrado un perfil de equilibrio cuya curva se llama "arco natural". El mismo accidente puede sobrevenir en cualquier mampostería seca, y es lo que se produce encima de los vanos cuando se quiebra un dintel". ADAM, Jean-Pierre: La Construcción romana: materiales y técnicas. León: Editorial de los oficios, 1996, p. 178

47. Se cree que la decoración del alzado de acceso cubría el hueco triangular hoy visible desde fuera, dando la sensación de que la misión estructural correspondía única y exclusivamente al gran megalito horizontal.



F.35. Esquema de la mecánica de un arco de dovelas. La resultante (R) de las refuerzas recibidas por el arco de descarga se componen de la suma del peso propio del arco y las cargas soportadas (P) y el empuje lateral (R). ADAM, Jean-Pierre: *La Construcción romana: materiales y técnicas*. León: Editorial de los oficios, 1996, p. 181

48. Es frecuente pensar en la gravedad como algo que es posible encauzar, transmitir, dirigir o canalizar. Siguen a continuación algunas citas de Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza, dos arquitectos analizados en la primera parte de la presente tesis doctoral, donde se ilustra claramente esta idea:

“Un techo o las figuras estructurales concretas canalizan el flujo energético de la gravedad, y hasta los mismos propioceptores del cuerpo resuenan y se estremecen durante la contemplación”. NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed). *La habitación vacante*, 2ª ed. Girona: Pre-textos de arquitectura, 2001, p. 37

“Se tratará en todo caso ¡qué sencillo! de encauzar esa G que estudiábamos de pequeños en la Física”. CAMPO BAEZA, Alberto; *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras*, 2ª ed., Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 32.

“Estructuras que, más o menos pesantes, necesitan estar ligadas al suelo para transmitir la primitiva Fuerza de la Gravedad”. *Íbid.*, p. 57

“Los elementos materiales pesantes, que hacen reales las formas que conforman el espacio, tienen que acabar transmitiendo la Gravedad, el peso de su materialidad, a la tierra”. *Íbid.*, p. 78

“Sin la Gravedad, la Arquitectura, cuya Historia es una lucha por dirigirla, por dominarla, por vencerla, desaparecería”. *Íbid.*, p. 78

En la estructura adintelada la cubrición del espacio sigue la dirección horizontal y el paso a la vertical se produce de manera brusca en el punto de contacto entre el dintel y el soporte, describiendo una repentina inflexión en ángulo recto. En la estructura inclinada se intenta combinar en el mismo elemento la horizontal y la vertical, pero la transición de las cargas del elemento de cubrición al de soporte sigue siendo brusca. En la estructura por avance de hiladas se intenta combinar la presencia de la horizontal con la introducción de una componente vertical desmultiplicando los elementos que la conforman, de manera que en vez de producirse el dramático paso de la horizontal a la vertical en un solo punto, se produce en cada una de las piezas que la conforman, restando así tensión y dramatismo a esta transición. Sin embargo, el arco representa un avance importantísimo con respecto a las estructuras anteriores porque, en él, desaparece totalmente la dicotomía entre la dirección horizontal y la vertical en favor de una transición de las cargas totalmente continua, gradual y progresiva a lo largo de todos y cada uno de los elementos que lo conforman. Aunque desde la clave hasta el soporte se combinan los esfuerzos horizontales y los verticales en cada una de las piezas que conforman el arco, es cierto que, mientras que en la clave domina la dirección horizontal, a lo largo del descenso de cargas se produce una gradual transición hacia la vertical.

Lejos de considerar la gravedad como una amenaza para la construcción, en la estructura de cubrición curva existe la voluntad de no oponer resistencia a sus efectos. No se trata ya de luchar contra la gravedad, ni de oponerse a sus efectos mediante la resistencia mecánica de la estructura sino que, más bien, se trata de asumir la ineludibilidad del peso en el hecho constructivo para utilizarlo en favor de la propia construcción. La voluntad de encauzar, transmitir, dirigir, o canalizar los efectos de la gravedad ⁴⁸, en clara analogía al tan importante y natural encauzamiento del agua, convierte al arco en la *estructura portante* por antonomasia.

Por otra parte, igual que se asume el peso como algo necesario en la construcción, en la estructura curva la tendencia a la caída por efecto de la gravedad no se concibe como una amenaza, sino

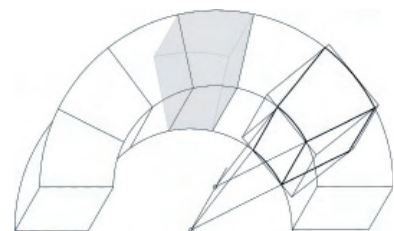
como otra oportunidad más de garantizar su estabilidad: “*Si bien en la mecánica del voladizo la atracción del vacío –es decir, el riesgo de que los elementos basculen- es el principal enemigo, con la clave, al contrario, se explota esa llamada del vacío, es decir, la gravedad, para asegurar la solidaridad entre todas las piezas del arco llamadas claves o dovelas*”⁴⁹. A diferencia de los anteriores, este tipo estructural requiere de un gran dominio de la estereotomía pues las dovelas deben estar talladas en forma de cuña a fin de que encajen perfectamente entre ellas: de ello depende su garantía de estabilidad⁵⁰. En efecto, cada dovela tiende a caer verticalmente por efecto del peso, pero se ve retenida por estar su perfil adovelado, más ancho arriba que abajo, encajado en el resto de piezas. Así concebida, la estructura no se limita a cumplir su función mecánica de transmitir el peso gravitatorio y evitar la caída de sus partes sino que, además, basa su propia estabilidad en la satisfacción de ambas necesidades.

Sin embargo, el soporte de cada dovela en su parte ancha tiende a apartar a sus vecinas para seguir su movimiento y, al verse éste impedido, se transmite lateralmente una fuerza a las piezas vecinas que, finalmente, reciben los soportes verticales en forma de empujes laterales. Por este motivo, este tipo de estructuras reciben, también, el nombre de *bóvedas de empuje*. La estabilidad del conjunto pasa por asegurar que estos empujes laterales no consigan separar a los soportes, hecho que provocaría el desencaje de las dovelas y la consiguiente ruina de la estructura. Esta tarea se confía normalmente al soporte, cuyo peso contrarresta el empuje lateral de la cubrición. Sin embargo, asegurar la posición horizontal de los soportes no resulta tarea fácil, y ésta tarea se constituye en la principal dificultad de este tipo de estructuras⁵¹.

A pesar de esta dificultad, el uso de la bóveda de empuje tiene ventajas importantes sobre la bóveda en voladizo, pues, para cubrir un mismo espacio, la cantidad de espacio y material estructural empleados por la primera es mucho menor que los que requiere la segunda: la intrínseca verticalidad de la bóveda en voladizo obliga a alcanzar alturas mucho mayores que las que precisa un arco de

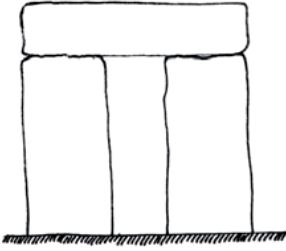
49 ADAM, Jean-Pierre: *La Construcción romana: materiales y técnicas*. León: Editorial de los oficios, 1996, pp. 179-180

50. En efecto, si una sola de las piezas que conforma el arco -llamadas dovelas- abandona su posición, toda la estructura se viene irremediabilmente abajo. Aunque todas las dovelas son igualmente importantes para el funcionamiento estático del arco, la que se sitúa en la parte superior merece una importancia especial. Durante su construcción, la estabilidad de la mayoría de los arcos y las bóvedas se asegura mediante una cimbra que no puede retirarse hasta que no se coloca la última pieza el arco que, situada en su parte superior, une solidariamente los dos tramos del arco, hasta ese momento totalmente desvinculados. Es precisamente el peso y la tendencia a la caída de esta importante dovela, llamada clave, la que garantiza en última instancia la estabilidad del conjunto. Ahí reside su importancia.



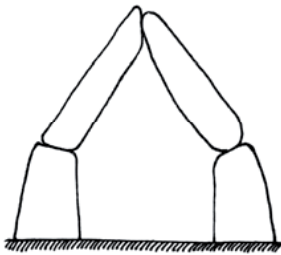
F.36. Esquema axonométrico de las dovelas de un arco de medio punto (en gris, la clave). ADAM, Jean-Pierre: *La Construcción romana: materiales y técnicas*. León: Editorial de los oficios, 1996, p. 181

ESTRUCTURA ARQUITRABADA



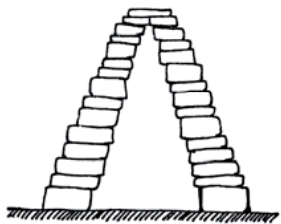
- **Estereotomía:** Dintel único megalítico sin necesidad de talla.
- **Geometría gravitatoria:** Contraposición entre la verticalidad del soporte y la horizontalidad de la cubrición.
- **Actitud estructural hacia la gravedad:** Resistir a los efectos de la gravedad.
- **Tipo principal de esfuerzo al que se somete al elemento de cubrición:** Flexión.
- **Percatación gravitatoria a favor de la cubrición estructural:** Ninguna.

CUBRICIÓN ESTRUCTURAL INCLINADA A DOS AGUAS



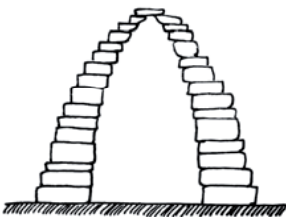
- **Estereotomía:** Dos piedras grandes, posible necesidad de talla.
- **Geometría gravitatoria:** Introducción de una componente vertical en la cubrición, que deviene inclinada.
- **Actitud estructural hacia la gravedad:** Resistir y portar los efectos de la gravedad.
- **Tipo principal de esfuerzo al que se somete al elemento de cubrición:** Compresión (aparición de empujes laterales).
- **Percatación gravitatoria a favor de la cubrición estructural:**
 - 1) La necesidad de introducir la verticalidad natural de la gravedad en el elemento de cubrición.

ESTRUCTURA DE AVANCE POR HILADAS EN VOLADIZO DE PERFIL INCLINADO



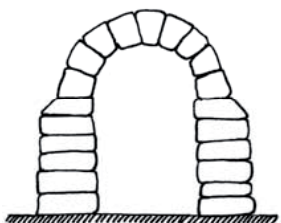
- **Estereotomía:** Elementos pétreos relativamente pequeños sin necesidad de talla.
- **Geometría gravitatoria:** Desmultiplicación de la dicotomía horizontal-vertical siguiendo una inclinación recta.
- **Actitud estructural hacia la gravedad:** Resistir y portar los efectos de la gravedad.
- **Tipo principal de esfuerzo al que se somete al elemento de cubrición:** Compresión.
- **Percatación gravitatoria a favor de la cubrición estructural:**
 - 1) La necesidad de introducir la verticalidad natural de la gravedad en el elemento de cubrición.
 - 2) El peso de la materia como fenómeno necesario para la construcción.

ESTRUCTURA DE AVANCE POR HILADAS EN VOLADIZO DE PERFIL CURVO / "FALSO ARCO"



- **Estereotomía:** Elementos pétreos relativamente pequeños sin necesidad de talla.
- **Geometría gravitatoria:** Desmultiplicación de la dicotomía horizontal-vertical siguiendo una inclinación curva.
- **Actitud estructural hacia la gravedad:** Resistir y portar los efectos de la gravedad.
- **Tipo principal de esfuerzo al que se somete al elemento de cubrición:** Compresión.
- **Percatación gravitatoria a favor de la cubrición estructural:**
 - 1) La necesidad de introducir la verticalidad natural de la gravedad en el elemento de cubrición.
 - 2) El peso de la materia como fenómeno necesario para la construcción.
 - 3) Necesidad de intrínseca curvatura de la gravedad en la forma del elemento de cubrición.

ESTRUCTURA EN ARCO DE DESCARGA O DE EMPUJE



- **Estereotomía:** Elementos pétreos relativamente pequeños con talla imprescindible.
- **Geometría gravitatoria:** Transición gradual entre la horizontal y la vertical.
- **Actitud estructural hacia la gravedad:** Portar los efectos de la gravedad.
- **Tipo principal de esfuerzo al que se somete al elemento de cubrición:** Compresión (aparición de empujes laterales).
- **Percatación gravitatoria a favor de la cubrición estructural:**
 - 1) La necesidad de introducir la verticalidad natural de la gravedad en el elemento de cubrición.
 - 2) El peso de la materia como fenómeno necesario para la construcción.
 - 3) Necesidad de intrínseca curvatura de la gravedad en la forma del elemento de cubrición.
 - 4) La tendencia a caer de la materia como garantía de estabilidad estructural.

medio punto y, además, el material requerido para estabilizar la parte trasera de las piezas en voladizo supera en mucho el necesario para asegurar la estabilidad de las dovelas por efecto del empuje. Es por ello que, finalmente, el arco de descarga acaba imponiéndose sobre la estructura por avance de hiladas ⁵².

Así pues, el paso del dintel arquivado al arco de descarga, con sus estadios intermedios, supone un cambio fundamental en la manera de percibir el papel de los fenómenos gravitatorios del peso y la caída libre sobre la estructura pues, mientras éstos son considerados la principal amenaza de la estructura adintelada, en la estructura curva se constituyen, precisamente, en lo que hace posible su existencia. La dicotomía entre la natural dirección vertical de la gravedad y su opuesta, la horizontal, presente en la estructura arquivada, desaparece en la forma estructural curva, donde el paso de una dirección a la otra se produce de manera gradual y progresiva a lo largo de todo el elemento. La gravedad pasa de ser un fenómeno que provoca la aparición de peligrosos esfuerzos a flexión en los elementos de cubrición, a ser un fenómeno cuyos esfuerzos de compresión sobre la materia hay que encauzar adecuadamente para construir la arquitectura. De la inútil oposición y resistencia contra la gravedad que caracteriza a las primeras soluciones estructurales, se pasa a la comprensión del necesario encauzamiento de las cargas gravitatorias en las estructuras portantes.

A pesar de haberse explicado aquí las formas de cubrición espacial utilizadas de la antigüedad como formando una breve evolución histórica lineal, hay que reconocer que la realidad de la evolución de las formas estructurales arcaicas, que se debió prolongar varios milenios, debió ser mucho más compleja y errática. Sin embargo, la finalidad de la exposición aquí desarrollada no es tanto construir una historia fidedigna de la evolución de las formas estructurales antiguas, sino intentar realizar una reconstrucción teórica del largo proceso técnico y conceptual por el cual la inicial supremacía de las estructuras adinteladas, tan ampliamente utilizadas durante las etapas pre y proto-históricas, fue progresivamente desplazada por el uso de las formas de cubrición curvas durante el periodo histórico.

51. "La construcción clásica se ha basado en sistemas constructivos capaces de soportar importantes compresiones, pero que difícilmente podían asumir los esfuerzos de tracción. Por ello, ha tendido siempre hacia formas de organización de sus elementos en que los esfuerzos principales en cualquier punto eran los de compresión. Esta opción es sencilla en los muros verticales, pero resulta menos evidente cuando se trata de elementos situados sobre espacios de uso, espacios necesariamente vacíos. La construcción abovedada es un modelo perfecto de solución del desplazamiento horizontal de las cargas sin recurrir a los trabajos a flexión, trabajos que llevan intrínseca la aparición de tracciones. Podemos calificar de construcción abovedada todas las formas de techos de intradós generalmente curvo (arcos, bóvedas y cúpulas) que transmiten las cargas verticales hasta los elementos portantes gracias a su descomposición en fuerzas paralelas a dicho intradós. El equilibrio general del sistema exige no sólo la reacción vertical del suelo, sino también la horizontal sobre el estribo. Para que pueda ofrecerse esa reacción es necesario prever un contrafuerte o un tirante, y en esos elementos suele estar el auténtico talón de Aquiles de este tipo de constructivo". *PARICIO ANSUATEGUI, Ignacio: La Construcción de la arquitectura. Los elementos (3a ed). Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, 1996, p. 12*

"Puede decirse, pues, que el arco juega con truco; escamotea parte de las funciones estructurales, pasándolas a otro elemento externo a la estructura propiamente dicha y existente con autoridad, cual es el terreno. Bastaría que los apoyos permitiesen el deslizamiento horizontal del arco, para que dejase de empujar horizontalmente sobre el terreno y se convirtiese en una simple viga curva trabajando en flexión igual que si fuese recta". *TORROJA MIRET, Eduardo. Razón y ser de los tipos estructurales (3ª ed). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007, p. 98*

52. "¿Por qué no triunfó el voladizo y sí la bóveda de empuje? La segunda permite ahorro de espacio y material al utilizar un arco de medio punto y no un arco en voladizo para superar la misma distancia. Cuanto más próximas a la vertical sean las pendientes de un voladizo, tanto más estable resultará, de modo que para cubrir luces grandes se necesita una altura considerable. Además, la dimensión de los estribos macizos que eviten la apertura del arco es mucho mayor en el primer caso que en el segundo". *ADAM, Jean-Pierre: La Construcción romana: materiales y técnicas. León: Editorial de los oficios, 1996, pp. 181*

53. "Las cúpulas y las bóvedas de cañón (...) no desempeñaron ningún papel en la arquitectura monumental de las primeras civilizaciones arcaicas. Tampoco lo desempeñaron en Grecia. La oposición entrecruzada de verticales y horizontales fue común a todas estas civilizaciones, que concedían poco valor al espacio interior. Al mismo tiempo, las bóvedas y cúpulas fueron empleadas desde los comienzos mismos de la arquitectura". GIEDION, Sigfried: *El Presente eterno: los comienzos de la arquitectura*. Madrid: Alianza, 1981, p. 481. Ver capítulo La construcción de bóvedas en las civilizaciones arcaicas, pp. 481-487.

54. *El desarrollo de la tecnología no puede explicar por sí solo el auge de las formas abovedadas en general y de la cúpula en particular durante el periodo romano. Antes del Pantheon de Adriano sólo se habían construido 4 grandes cúpulas en Roma: la cúpula de 21,50 metros de diámetros de la sala "Templo de Mercurio" en las termas de Baia (entre el 27 a.C. y el 69 d.C.), la cúpula de 13,00 metros de diámetro interior de la sala octogonal de la Domus Áurea (hacia el 65 d.C.), la cúpula de 16,10 metros de diámetro del ninfeo del Albanum de Domiciano en Alba (entre el 81 y el 96) y las rotondas de 20,00 metros de diámetro interior de las termas de Trajano (año 109). Además de la cúpula del Pantheon, de 43,50 metros de diámetro interior, Adriano erigió la cúpula de 26,3 metros de diámetro de la sala "Templo de Venus" de las termas de Baia, y la media cúpula de 16,75 metros de diámetro del Serapeum de la Quinta Adriana. Datos extraídos de ADAM, Jean-Pierre: *La Construcción romana: materiales y técnicas*. León: Editorial de los oficios, 1996, p. 200*

55. Según Giedion, a lo largo de la historia de la arquitectura ha habido tres concepciones espaciales. La segunda se inaugura en época romana con el Pantheon, y tiene como principal característica la construcción de espacios interiores mediante la luz y las formas curvas. Ver *Las tres concepciones espaciales arquitectónicas*, en GIEDION, Sigfried: *El Presente eterno: los comienzos de la arquitectura*. Madrid: Alianza, 1981, pp. 490-495.

56. Lo referente a la evolución técnica de la estructura hasta el arco ha sido tratado en el presente apartado. Sin embargo, las especificidades estructurales concretas y la nueva concepción espacial de la cúpula romana son analizadas en el apartado III-3.4.3. La mecánica gravitatoria del espacio estructural.

Pero hay una cuestión importante que no debe pasarse por alto. Si en Egipto, Mesopotamia y Grecia ya se conocía el funcionamiento estático del arco -aunque su uso fuera hartamente restrictivo y nunca se utilizara con finalidades monumentales⁵³, ¿por qué durante la etapa tardía de la República Romana y la primera época imperial su utilización empezó a adquirir dimensiones y significados nunca antes vistos en la historia de la arquitectura? ¿Por qué el uso de las formas curvas para cubrir el espacio se constituye como la gran aportación de Roma a la historia de la arquitectura, siendo el Pantheon de Adriano su más excelso exponente, si éstas se conocían ya desde antiguo? ¿Por qué a partir del Pantheon la arquitectura romana inaugura un periodo de casi dos milenios en la historia de la arquitectura en que la estructura de cubrición curva del espacio, en todas sus variedades técnicas y estilísticas, asume un protagonismo indiscutible en el hecho arquitectónico?

Muchos han intentado explicar el auge de las formas estructurales curvas en la época romana como el resultado de la evolución natural de la técnica constructiva y la mecánica estructural desde la antigüedad⁵⁴. Algunos, como Sigfried Giedion, han ido un paso más allá y han apuntado que el empleo de formas estructurales curvas en Roma fue motivado por el nacimiento de una nueva manera de concebir y de entender el espacio arquitectónico, sinónimo desde entonces de *espacio interior*⁵⁵. Sin embargo, el presente trabajo de investigación propone una tercera y nueva cuestión, nunca antes planteada, que pretende también arrojar algo de luz al auge de la utilización de las formas de cubrición estructural curvas a partir de Roma.

Los romanos no sólo fueron los inventores del concepto de *gravitas* en sí -inexistente en culturas conceptualmente tan avanzadas como la griega- sino que, además, fueron capaces de intuir, por primera vez en la historia, su curvatura intrínseca. Así pues, además de una revolución de la ingeniería estructural sin precedentes y de una concepción de una nueva idea de espacio arquitectónico basada en la noción de interior⁵⁶, se defiende aquí la tesis de que el empleo de las formas estructurales curvas de cubrición espacial a partir de la etapa romana se debió, también, a la intuición de la naturaleza curva de la gravedad. A esta cuestión se dedica el siguiente apartado.

III.3.4.2. La curvatura intrínseca de la gravedad

“El sistema de dinteles curvos y tridimensionales no tiene ningún precedente.”⁵⁷

Félix Escrig

Nuestra lengua ha heredado del latín la variedad de significados que los romanos otorgaron a la noción de *gravedad*⁵⁸. Aplicada a una situación, ésta hace referencia a su importancia o entidad, mientras que empleada para referirse a una persona, expresa su capacidad de medir la importancia de cada situación a fin de actuar con aplomo y determinación acordes a las circunstancias. La *gravitas* se convierte entonces en una de las virtudes personales más importantes en las que se fundamentan los valores de la sociedad romana, pues un buen ciudadano es aquél que ante una situación *grave* no responde “a la ligera” sino con *gravedad*, afrontando la vida con seriedad, circunspección y responsabilidad.

Pero sin duda, la gran aportación de los romanos en lo que a la *gravitas* se refiere, reside en su capacidad de distinguir conceptualmente entre la “gravedad” como ley natural, y sus manifestaciones concretas sobre la materia, como son el peso o el movimiento en forma de caída. Esta fundamental distinción, que tan obvia parece en la actualidad, no existió en civilizaciones anteriores culturalmente tan desarrolladas como la griega, donde la ley natural se confundió con su manifestación concreta. Es en Roma donde, por primera vez, se tiene conciencia de la noción de “gravedad” en sí, al margen de sus manifestaciones específicas, como una cualidad física omnipresente.

Así pues, aplicada a un objeto la *gravitas* romana hace referencia a su peso. Un cuerpo *grave* es un cuerpo que pesa. Al fenómeno concreto del peso se refieren con el término *pondus*, y a la ley natural que produce este fenómeno la llaman *gravitatis*. Pero, a pesar de esta distinción conceptual, resulta difícil separar la ley general del fenómeno concreto. Tanto es así que, milenio y medio más tarde, Newton aún considera la ley de la gravitación y el fenómeno del peso como cuestiones análogas, identificables como una fuerza de atracción mutua entre masas.

57. Cita a propósito del Pantheon de Roma. ESCRIG, Félix: Las Grandes estructuras de los edificios históricos: desde la antigüedad hasta el gótico. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 1997, p. 45

58. Según el Diccionario de la Real Academia Española el adjetivo “grave” posee las siguientes acepciones: 1) “Dicho de una cosa: Que pesa”, 2) “Grande, de mucha entidad o importancia” y 3) “Circunspecto, serio, que causa respeto y veneración”. Así, algo grave puede ser algo pesado, o algo importante o algo circunspecto. Llama la atención que en nuestra lengua el término “gravidez” haga referencia también al embarazo de la mujer, en clara alusión tanto a la importancia y la seriedad de su estado, como a su aumento de peso.

Esta identificación física y cotidiana de la ley de la gravedad con el fenómeno del peso se manifestará en la arquitectura durante largo tiempo. Tal como se ha expuesto en el apartado anterior, las formas estructurales curvas con que se cubre el espacio a partir de la era romana, se fundamentan en la idea de que el peso, en vez de ser un problema contra el que hay que oponer resistencia, debe ser concebido como una ineludible cualidad de la arquitectura, garante último de su estabilidad.

Más compleja es la cuestión del movimiento en el fenómeno de la gravedad. Aunque quizá de una manera un tanto confusa, desde el principio se advierte que la gravedad tiene que ver con el movimiento natural de los cuerpos dotados de masa por el espacio. Primero se considera el origen gravitatorio del movimiento de los cuerpos terrestres, luego se incluye también a los cuerpos celestes. Y, por sorprendente que pueda parecer, las formas de cubrición espacial son sensibles a este tipo de consideraciones.

En la física aristotélica, la más ampliamente aceptada de las teorías elaboradas por los filósofos griegos de la antigüedad, el cosmos se concibe como una sucesión de esferas concéntricas cuyo centro es el de la tierra, el elemento más pesado, seguido por el agua, el aire, el fuego y el éter⁵⁹. El movimiento natural de los cuerpos se explica, entonces, por su tendencia a dirigirse hacia el lugar propio que les corresponde por naturaleza, siguiendo siempre una dirección radial hacia el centro o hacia afuera. Así pues, la tendencia natural de los pesados cuerpos terrosos a dirigirse hacia el centro de la Tierra se percibe cotidianamente como una fuerza de directriz vertical y descendente. Muy distinto es en cambio el caso de los cuerpos celestes, de composición etérea, que al encontrarse ya en su lugar natural fuera del mundo, no se ven impelidos a moverse radialmente hacia *abajo* o hacia *arriba* sino que describen eternos movimientos circulares⁶⁰.

Así pues, solamente el peso y la caída libre son fenómenos explicados en base a una natural tendencia al movimiento privativa de los cuerpos terrestres, donde se percibe ya una primaria intuición científica sobre la noción de gravedad. Se da entonces la circunstancia de que, de entre todos los fenómenos vinculables al efecto de la gravedad sobre la materia, la física aristotélica centra su atención únicamente en aquellos

59. A fin de evitar cualquier tipo de confusión, cabe señalar que la esfericidad cosmológica de Aristóteles aristotélica, nada tiene que ver con una supuesta atracción orbicular de carácter gravitatorio (tal como apuntara Newton milenio y medio más tarde), sino que se fundamenta en la perfección geométrica, casi divina, atribuida durante siglos a la figura esférica. Siguiendo este mismo razonamiento geométrico, Arquímedes afirma en su tratado Sobre los cuerpos flotantes que en reposo la superficie del agua sobre la Tierra no es horizontal y plana sino que sigue la curvatura esférica de la Tierra misma. Curiosamente, con la muerte de Arquímedes a manos de los romanos durante el asedio a Siracusa del 212 a.C. muere también la concepción griega de los fenómenos relacionados con la gravedad.

60. Sobre la física aristotélica en relación a la gravedad, ver el apartado II-2.1.1. La gravedad como tendencia natural de los cuerpos pesados.

dos que, casualmente, se desarrollan en una dirección rectilínea, la vertical, quedando la directriz curva totalmente descartada de cualquier fenómeno de origen gravitatorio. La casual primacía de la línea recta en la descripción física de los fenómenos gravitatorios revierte, como no, en la formalización de la arquitectura griega, que renuncia expresa y reiteradamente al uso de formas estructurales curvas en favor del sistema arquitebado, basado lógicamente en la contraposición de líneas rectas verticales y horizontales ⁶¹.

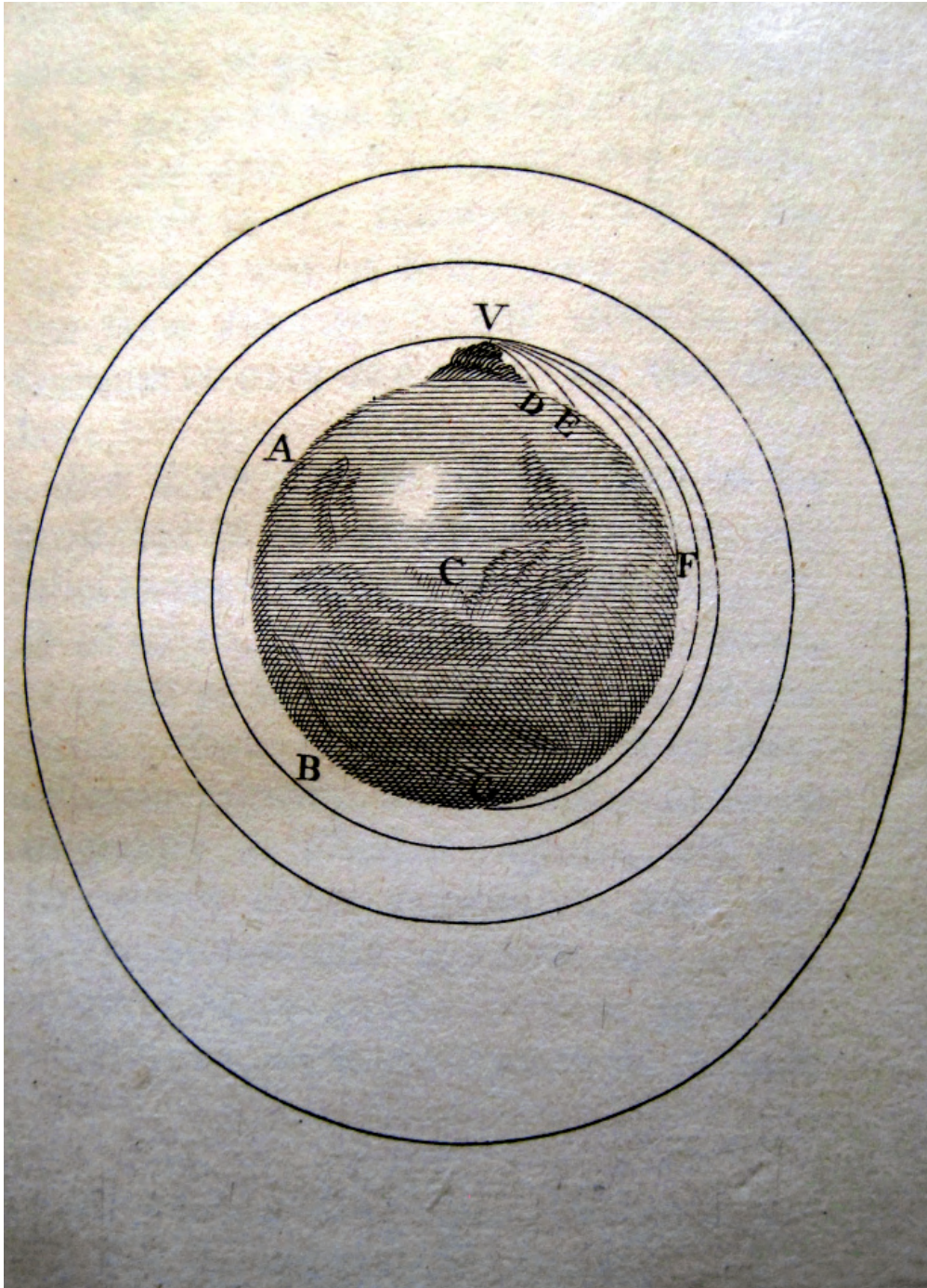
No obstante, la hegemonía romana sobre las ciudades-estado griegas pone fin a las inquietudes intelectuales de los helenos e inaugura un periodo de escasa actividad científica en el que los filósofos romanos se limitan a reproducir los fundamentos de los postulados griegos. Esta situación se prolonga durante casi tres siglos hasta que durante la primera época imperial se experimenta un auge en el interés por los temas físicos. A finales del siglo I d.C., solamente dos décadas antes de la construcción del Pantheon de Adriano, Mestrio Plutarco escribe un revolucionario tratado sobre la Luna en el que pone en duda algunas cuestiones fundamentales de la física aristotélica. A partir de la observación de las irregularidades visibles en su superficie, Plutarco advierte que, lejos de poder ser considerada como un perfecto cuerpo celeste etéreo, la Luna debe ser concebida como un cuerpo de constitución similar a la de la Tierra. Plutarco imagina entonces la Luna formada por elementos terrosos que, al presionar hacia un centro común, se constituyen en un único cuerpo celeste de una forma sensiblemente esférica. Pero de acuerdo con los postulados aristotélicos, si la Luna estuviera efectivamente constituida por tierra debería precipitarse irremediabilmente hacia el centro de la Tierra, hecho que evidentemente no se produce. Plutarco resuelve la cuestión afirmando que es la tendencia natural de la Luna a seguir un movimiento circular lo que le impide caer sobre la Tierra. Como consecuencia lógica de sus propias reflexiones, el filósofo romano imagina un cosmos donde cada planeta se constituye en un centro de gravedad hacia el que se dirigen los cuerpos que le pertenecen y alrededor del cual giran, circularmente, otros planetas de dimensiones más pequeñas y de semejante constitución ⁶².

Así pues, aunque sin aludir directamente a la noción de gravedad, Plutarco afirma que los cuerpos graves terrestres tienden a moverse

61. "El arquitecto griego conocía, sin ninguna duda, las peculiares formas que el muro adquiere en determinadas condiciones estáticas, por ejemplo, el espontáneo arco de descarga. Por otro lado, estaba familiarizado directa o indirectamente con determinadas formalizaciones arquitectónicas propias del muro utilizadas en culturas próximas, que en tantos otros sentidos fueron sus maestras, tal era el caso del arco de medio punto conocido ya en Egipto pero, sobre todo, tan ampliamente utilizado en el mundo mesopotámico. Ahora bien, el arquitecto griego, por su particular manera de ver el mundo, considera que estos hallazgos, claves por otra parte desde el punto de vista constructivo, son opuestos a su sentido de la materia; para él, son manifestaciones del caos, un caos que pretende evitar con todas sus fuerzas, antes que del orden de la Naturaleza. Ésta es la causa por la que se niega a emplearlos -y, vuelvo a repetir, no tanto en cuanto formas sino, sobre todo, por lo que significan y evocan- y sigue afirmándose en el uso de horizontales y verticales, rechazando las potenciales inclinadas que se esconden en el interior de la caótica e inerte masa mural. Aun cuando en la época helenística se utilice el arco, si bien de modo harto restrictivo y principalmente en obras de carácter utilitario o no monumental, el arquitecto griego, sin embargo, seguirá prefiriendo aquellas soluciones de tipo arcaico que, desde el punto de vista estructural, le ofrecen posibilidades limitadas, como son las del falso arco y la falsa bóveda, ya aunque presentan de hecho formas inclinadas, expresan una construcción dentro de la cual se desarrollan únicamente esfuerzos verticales". *INIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p. 73*

62. *Sobre la idea de la gravedad de Plutarco, ver el apartado II-2.3. Plutarco: La gravitas romana.*

"Si no fuese por la gravedad, un proyectil no se desviaría hacia la Tierra, sino que continuaría en línea recta con un movimiento uniforme si se suprimiera la resistencia del aire. Es su gravedad quien le aparta continuamente de un curso rectilíneo, haciendo que se desvíe más o menos hacia la Tierra, de acuerdo con su gravedad y la velocidad de su movimiento. (...) Incrementando la velocidad podemos aumentar a discreción la distancia hasta la cual podría proyectarse (...), incluso circundaría toda la Tierra antes de caer o, más aún, lograría no caer jamás, encaminándose hacia los espacios celestes, continuando su movimiento indefinidamente". Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Definición V. NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid: Editora Nacional, 1982, p. 225



F.37. La gravedad según Isaac Newton.

NEWTON, Isaac: *A treatise of the system of the world, translated into English*. London: F. Fayram, 1728, p. 6. Fotografía del autor.

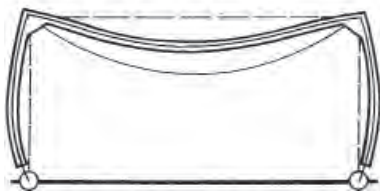
rectilíneamente hacia el cuerpo celeste al que están vinculados por efecto de una cierta presión que, a su vez, es también responsable de la forma esférica y del movimiento circular de los planetas. No cabe duda de que al referirse a esta presión grave, el filósofo romano alude, aún sin ser plenamente consciente de ello, a lo que más tarde se comprenderá unívocamente por gravedad. De esta manera se inaugura una etapa en la historia del estudio de la naturaleza física de la gravitación en la que ésta se vincula, de manera inevitable, a una larga serie de fenómenos físicos de naturaleza eminentemente curva. Esta es, sin duda, la gran contribución de Roma al conocimiento físico de la gravedad: la intuición de su intrínseca curvatura.

Tras más de un milenio y medio sin apenas actividad científica, la insatisfactoria explicación aristotélica del movimiento de los proyectiles terrestres induce, primero a Buridan y después a Oresmes, a estudiar este fenómeno. Ambos apuntan a que la fuerza transmitida al proyectil hace que éste describa una trayectoria recta en inclinación ascendente hasta que se agota su fuerza, momento en que describe un arco de circunferencia y se precipita verticalmente hacia el suelo. Sin embargo, esta explicación no convence a Tartaglia, quien postula que, en tanto que el proyectil se ve sometido en todo momento a la acción de la gravedad, su trayectoria debe ser completamente curva. Más tarde Galileo confirma esta idea al formular matemáticamente la trayectoria parabólica de los proyectiles y, en línea con las prematuras ideas de Plutarco, se postula también a favor del movimiento circular de los cuerpos celestes. Pero Kepler desecha esta idea y descubre que la órbita de los planetas sigue una trayectoria elíptica. No obstante, corresponde a Newton la formulación matemática y conjunta del movimiento parabólico de los proyectiles y de la órbita elíptica de los planetas a partir de su idea de la gravedad como fuerza universal de atracción mutua. Tres siglos más tarde Einstein desecha la concepción newtoniana de la gravedad como fuerza en favor de una teoría donde la curva no se da solamente en la trayectoria de los cuerpos sino que, precisamente por efecto de la gravedad, la propia geometría del espacio se curva siguiendo la forma de un paraboloides de revolución en cuyo foco se encuentra la gran masa responsable de tal curvatura. A día de hoy, la teoría geométrica de la gravedad de Einstein se constituye como el último y más potente aporte a la vinculación de la gravedad con la curvatura⁶³.

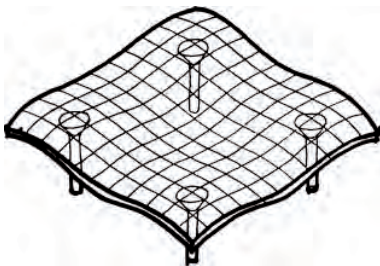
63. Las especificidades de las teorías de cada uno de los físicos aquí mencionados se desarrollan en la segunda parte de la presente tesis doctoral, La gravedad y la luz como fenómenos físicos.

64. La catenaria es la curva que adopta un cuerpo longitudinal perfectamente flexible con masa distribuida uniformemente suspendido por sus extremos y sometido a la acción de la gravedad a fin de no soportar ninguna tensión suplementaria, ya que todas las fuerzas que actúan sobre un punto cualquiera de la catenaria, como su peso y las tensiones debidas a los dos puntos contiguos anterior y posterior, se anulan entre sí. A pesar de su conveniencia estructural la dificultad de su trazado dificultó su uso, pero existen algunos célebres ejemplos de su utilización. Por ejemplo, Wren y Hooke utilizaron un perfil catenario invertido para diseñar la cúpula de la Catedral de Saint Paul de Londres. Gaudí, que experimentó con todas las curvaturas posibles para la construcción de arcos, finalmente se decantó por la catenaria -y su derivada la funicular- para erigir su obra más ambiciosa, la imponente Catedral de la Sagrada Familia de Barcelona.

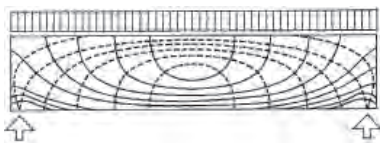
65. Con el pase del tiempo la ciencia moderna ha descubierto que un cierto grado de curvatura es inherente a toda estructura construida bajo los efectos de la gravedad, incluso en los sistemas formados por elementos lineales rectos. Por un lado, todos los elementos estructurales siempre sufren una cierta curvatura (muchas veces imperceptible) cuando, por efecto de las cargas, se ven ineludiblemente deformados. Por otro lado, las líneas isostáticas de los esfuerzos que actúan en el interior de una estructura adoptan siempre, también, formas curvas. Parece, entonces, como los romanos hubieran intuido estas cuestiones y hubieran introducido, ya de inicio, una curvatura consciente y controlada en la estructura portante.



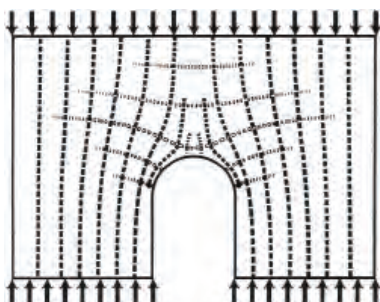
F.38. Esquema de deformación de un pórtico con nudos rígidos. ENGEL, Heino: *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001, p. 186



F.39. Esquema de deformación de una placa rígida apoyada en cuatro puntos. TORROJA MIRET, Eduardo: *Razón y ser de los tipos estructurales* (3a Ed). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007, p. 136



F.40. Diagrama de líneas isostáticas de una jácena biapoyada con carga uniformemente distribuida. ENGEL (...), p. 217



F.41. Diagrama de líneas isostáticas de un arco en un muro. TORROJA (...), p. 95

Pueden establecerse ciertas analogías entre la evolución de las curvaturas gravitatorias estudiadas en el ámbito de la física y las formas de cubrición espacial propias del ámbito de la arquitectura. Se recupera entonces, otra vez, la analogía entre el movimiento (en este caso ya no del agua sino de los proyectiles y los cuerpos celestes) y el desplazamiento de las fuerzas y las cargas a través de la estructura. Así, la primigenia dicotomía entre la vertical y la horizontal en el movimiento aristotélico, que vendría a corresponderse en lo arquitectónico con la estructura arquitebada, queda superada por la introducción de una cierta inclinación en el movimiento de los proyectiles por parte de Buridan y Oresmes, que en la arquitectura se corresponde con el uso de cubiertas inclinadas. Sin embargo, pronto se descubre la necesidad de introducir en la descripción de la trayectoria de los proyectiles una cierta curvatura semicircular, que se corresponde con el uso arcaico de tímidos perfiles curvos en las estructuras de cubrición. Finalmente, el descubrimiento por parte de Tartaglia y Galilei de la curvatura constante del proyectil durante su vuelo, se asimila en la arquitectura al uso de elementos de cubrición totalmente curvos. Así pues, parece haber una cierta correspondencia, diferida en el tiempo, entre la descripción del movimiento de los proyectiles desde Aristóteles hasta Galileo y la evolución de las formas estructurales descritas en el apartado anterior.

Conviene apuntar también que, a partir de Galileo, nace un interés explícito por el estudio de las propiedades gravitatorias de determinadas curvas complejas que guarda cierta correspondencia con la investigación de nuevas formas de transmisión curvilínea de los esfuerzos estructurales. El propio Galileo se interesa por la conveniencia de la cicloide en la construcción de arcos, al mismo tiempo que intenta identificar la curvatura descrita por una cadena sometida a los efectos de la gravedad. Es Huygens, sin embargo, quien describe la propiedad tautócrona de la cicloide y quien descubre la formulación matemática de la curva catenaria que describe una cadena sujeta por sus dos extremos. No obstante, es Hooke quien, en sus estudios sobre la fuerza de la gravedad aplicada en la estática estructural, intuye la conveniencia del uso estructural de la catenaria invirtiendo su perfil, pues deduce que si el arco catenario está sometido principalmente a esfuerzos a tracción, la curva inversa tiene que trabajar principalmente a compresión. A lo largo de la historia se

puede observar, pues, un interés parejo por las propiedades gravitatorias de ciertas curvas y su aplicación estructural, desde el sencillo arco de medio punto, tan utilizado en la antigüedad, hasta las formas curvas de cubrición espacial más complejas e ingeniosas diseñadas ya en el siglo XX por Antoni Gaudí ⁶⁴.

En efecto, la primigenia intuición romana de la inherente curvatura de la gravedad se constituye como el inicio de una nueva concepción física del fenómeno de la gravitación que, finalmente, da lugar a la formulación de las teorías de Newton y de Einstein que, aunque de maneras distintas, reconocen la curvatura como un rasgo fundamental de la naturaleza física de la gravedad. Pero los romanos también intuyen, de algún modo, la curvatura sufrida por las estructuras sometidas a la acción de la gravedad⁶⁵. Se descubre entonces la conveniencia de las estructuras curvas de cubrición espacial, capaces de absorber con su forma los efectos de la ineludible acción de la gravedad. El uso reiterado del arco, la bóveda y la cúpula en la época romana acaba por extenderse, con formas técnicas y estilísticas varias, a la arquitectura construida durante los dos milenios posteriores. Y el Pantheon de Adriano, cuya construcción da comienzo solamente un año antes de la muerte de Plutarco, el autor de las revolucionarias ideas romanas sobre la naturaleza física de la gravedad, se constituye como una de las más tempranas y a la vez imponentes estructuras cupuladas de la historia de la arquitectura.

III.3.4.3. La mecánica gravitatoria del espacio estructural

“La cúpula (...) es una forma intuitiva de conocimiento: el espacio contribuye a soportar la carga.” ⁶⁶

Rabun Taylor

La construcción del espacio arquitectónico precisa de la materia para definir sus límites. La materia, por su parte, se ve ineludiblemente sometida a la incesante acción de la gravedad. La gravedad se convierte, entonces, en un elemento indispensable en la construcción del espacio arquitectónico, cuyas cualidades vienen definidas por la forma de encauzar la gravedad. Esta necesaria relación estructural entre

66. TAYLOR, Rabun: Los Constructores romanos: un estudio sobre el proceso arquitectónico. *Tres Cantos: Akal, 2006, p. 64*

67. “La GRAVEDAD CONSTRUYE EL ESPACIO. Los elementos materiales pesantes, que hacen reales las formas que conforman el espacio, tienen que acabar transmitiendo la Gravedad, el peso de su materialidad, a la tierra. El sistema gravitatorio sustentante, la estructura, es la que ordena el espacio, la que lo construye”. CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 78. Idea, luz y gravedad, bien temperadas: Sobre las bases de la Arquitectura, 1995

Cabe señalar aquí la íntima correspondencia física que Einstein descubre en su Teoría de la Relatividad General entre las cualidades del espacio y la acción de la gravedad. Según esta teoría, la geometría del espacio se debe a la presencia o no de la gravedad, pues la presencia de enormes masas gravitatorias produce una curvatura del espacio de origen gravitatorio. Se descubre así una cierta correspondencia entre la teoría física y la intuición arquitectónica al relacionar, desde diferentes puntos de vista, las cualidades del espacio -físico o arquitectónico- con la acción de la gravedad. Así pues, según Alberto Campo Baeza, la gravedad construye el espacio y según Albert Einstein, la gravedad curva el espacio. La construcción abovedada parece aunar ambas consideraciones en una misma forma espacio-estructural.



F.42. Interior del Pantheon. Fotografia de Marcelo Melis modificada.
BELARDI, Giovanni: *Il Pantheon: storia, tecnica e restauro*. Roma: Betagamma, 2006

el espacio y la gravedad se manifiesta de manera unívoca e inequívoca en el Pantheon de Roma, verdadero paradigma de la indisoluble relación entre la cualidad del espacio arquitectónico y la forma de la estructura portante o, lo que es lo mismo, del espacio de la estructura y de la estructura del espacio ⁶⁷.

El Pantheon se instituye como la celebración y la exaltación del *espacio arquitectónico* entendido como espacio *interior*, una concepción espacial sin precedentes en la arquitectura monumental de la antigüedad, mucho más interesada en la construcción del espacio exterior irradiado por los volúmenes. En efecto, tanto en la Pirámide de Gizeh como en el Partenón de Atenas, ambas obras clave de la arquitectura antigua, se constata que su valor espacial radica en la relación que establece el volumen edificado con su entorno natural y construido, quedando la conformación de su espacio interior en un segundo plano. En cambio, a partir de la época romana tardía la situación se invierte y el protagonista indiscutible del hecho arquitectónico pasa a ser el espacio interior, hasta tal punto que, con el paso de los siglos, la noción de espacio arquitectónico llega a confundirse con la idea de espacio interior ⁶⁸. Lo importante, entonces, no es tanto la forma escultórica externa -que aún así no se descuida- sino la forma espacial interna, que alcanza unas dimensiones físicas y metafísicas sin precedentes.

Es entonces cuando la sala hipóstila, el sistema de cubrición de grandes espacios utilizado por las civilizaciones antiguas, se revela claramente insuficiente. La multiplicación de unos soportes demasiado próximos y robustos, junto a la dificultad de introducir la luz en el interior, impide la percepción visual del espacio y de sus límites, requisito fundamental en la nueva concepción espacial. Se precisa, pues, un nuevo sistema estructural capaz de eliminar los soportes intermedios poniendo el acento en la delimitación del espacio. Las formas abovedadas en general, y la cúpula en particular, se constituyen como una solución estructural óptima con que satisfacer la voluntad de cubrir espacios de luces cada vez mayores y, así, llegar a contener y abrazar la mayor cantidad posible de volumen espacial dentro de la forma construida.

Efectivamente, el espacio interior del Pantheon se concibe de tal manera que con la mínima superficie interior se abraza la máxima cantidad de

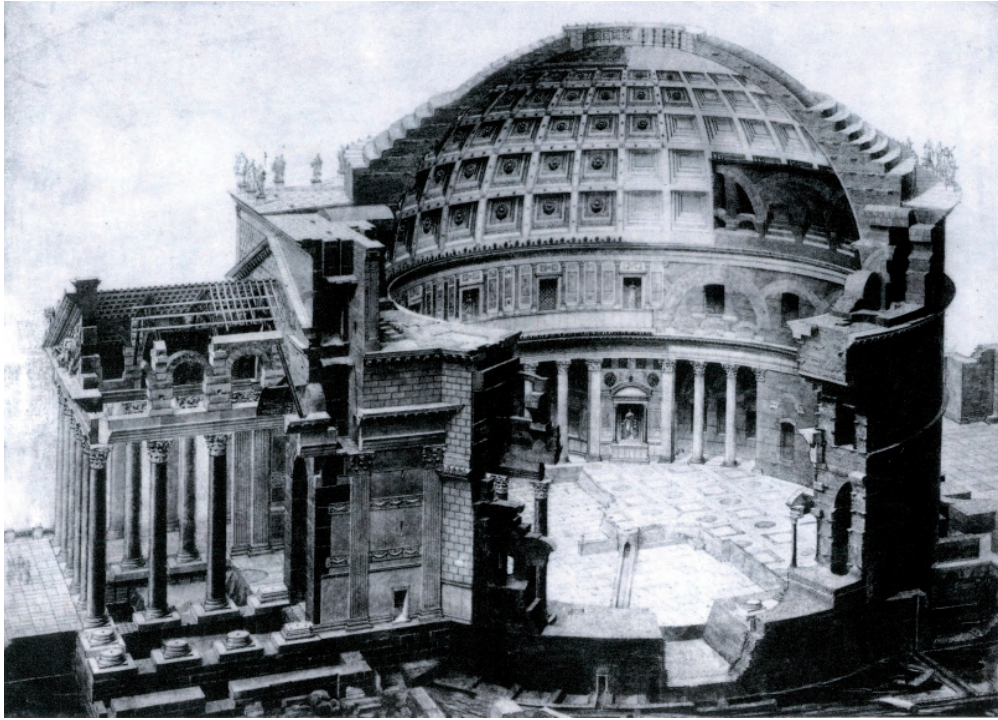
68. "La cúpula del panteón de Adriano, de comienzo del siglo II, señaló la completa irrupción de la segunda concepción espacial. Desde ese momento el concepto de espacio arquitectónico fue casi indistinguible del concepto de espacio interior hueco" *GIEDION, Sigfried: El Presente eterno: los comienzos de la arquitectura. Madrid: Alianza, 1981, p. 491*

"En efecto, se habla de la arquitectura romana como de una arquitectura "espacial", en contraste con el carácter plástico de la Grecia clásica. En la arquitectura romana aparecen por primera vez vastos espacios interiores aislados o en grupos complejos. Estos espacios muestran una gran variedad de formas y están cubiertos a veces por cúpulas, elementos que hasta entonces sólo habían desempeñado un papel secundario en la construcción. En general, los romanos trataron el espacio como una sustancia modelable y articulable, "activado" de este modo, ya no es un "intermedio" secundario en relación con los cuerpos plásticos circundantes, sino que adquiere primordial importancia". *NORBERG-SCHULZ, Christian: La arquitectura romana, en Arquitectura occidental: la arquitectura como historia de formas significativas. Barcelona: Gustavo Gili, 1983, p. 44*

69. *En las distintas fuentes consultadas pueden observarse pequeñas diferencias dimensionales aunque, sin embargo, la dimensión más repetida para el diámetro interior es de 43,40 metros. También apuntan algunos autores a que, en realidad, la altura de la cúpula es un poco más baja que la anchura del tambor, quizá por efecto de su deformación.*

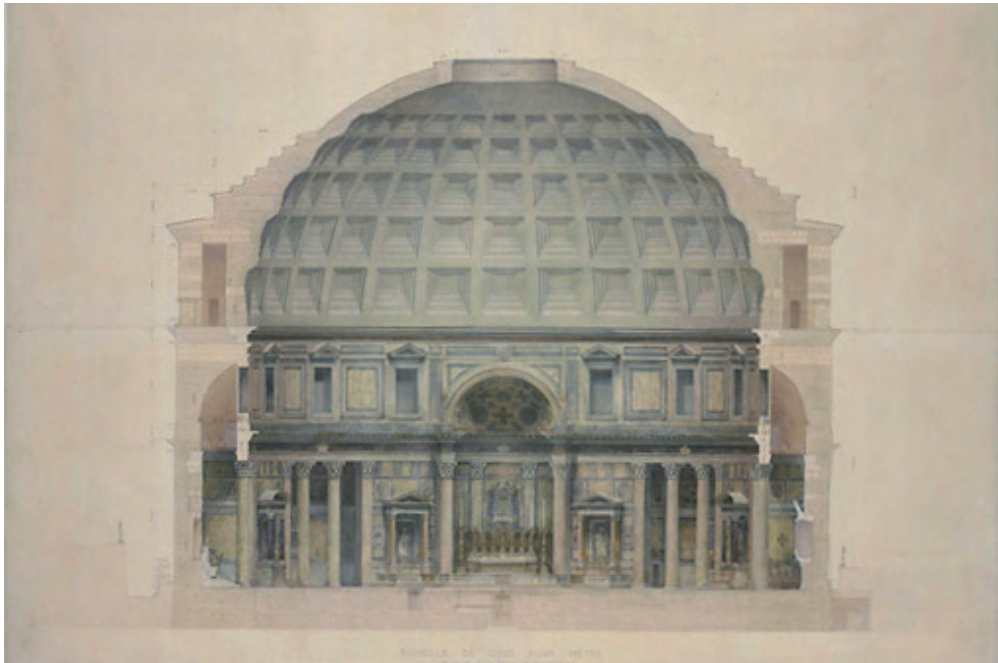
Se puede hacer un cálculo bastante aproximado del volumen y la superficie interior del Pantheon considerando sus superficies interiores lisas. El volumen se corresponde al de media esfera y un cilindro de igual radio y altura ($r = h = 21,7 \text{ m}$):

$$V_{\text{Tot}} = 1/2 V_{\text{Esf}} + V_{\text{cil}} = (4\pi r^3 / 3 \cdot 2) + (\pi r^2 \cdot h) = 2 \pi r^3 / 3 + \pi r^3 = 5\pi r^3 / 3 = 53.500 \text{ m}^3 \text{ aprox.}$$
La superficie total del interior se corresponde a la superficie de la media esfera más la superficie lateral del cilindro, y la superficie de la base del mismo: $S_{\text{Tot}} = 1/2 S_{\text{Esf}} + S_{\text{cil}} + S_{\text{bas}} = (4\pi r^2 / 2) + (2\pi r \cdot h) + \pi r^2 = 2\pi r^2 + 2\pi r^2 + \pi r^2 = 5\pi r^2 = 7.400 \text{ m}^2 \text{ aproximadamente. Así pues, la relación entre el volumen y la superficie interior es de } R_{\text{vs}} = 53.500 \text{ m}^3 / 7.400 \text{ m}^2 = 7 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ aproximadamente.}$



F.43. Axonometría constructiva del Pantheon, por Georges Chedanne.

WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 294



F.44. Sección transversal del Pantheon mirando hacia la capilla central, por Georges Chedanne.

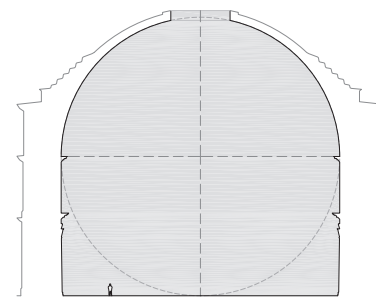
DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral.

Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo III, p. 244

volumen espacial⁶⁹. Desde un punto de vista geométrico, este espacio se obtiene por la superposición de un cilindro de igual radio que altura apoyado sobre uno de sus lados planos, y una semiesfera del mismo radio cuyo centro coincide con el centro de la cara superior del cilindro. Se obtiene así un inmenso espacio cilíndrico cubierto por una cúpula semiesférica donde la altura del tambor es la misma que la de la cúpula, coincidiendo la suma de ambas con el diámetro de la esfera, que al mismo tiempo establece la altura y la anchura del espacio. Así, con sus aproximadamente 43,40 metros de diámetro interior la del Pantheon se constituye como una de las mayores cúpulas jamás construidas de la historia⁷⁰. La ausencia de soportes intermedios, su forma abovedada y sus enormes dimensiones despiertan en el espectador una fuerte conciencia del espacio arquitectónico entendido como vacío interior envolvente.

El sistema estructural se basa en la adición de elementos con entidad propia -como la columna y el arquitrabe- a través de los cuales la gravedad se transmite linealmente. El espacio, por tanto, difícilmente es contenido. En cambio, los elementos que conforman las estructuras abovedadas -como los muros y las cúpulas- pierden su autonomía formal en favor de la conformación de un continuo material a través del cual la gravedad se transmite a lo largo y ancho de toda la forma construida. Lo que porta, cierra y cubre es lo mismo, facilitando así la delimitación visual y lumínica del espacio⁷¹.

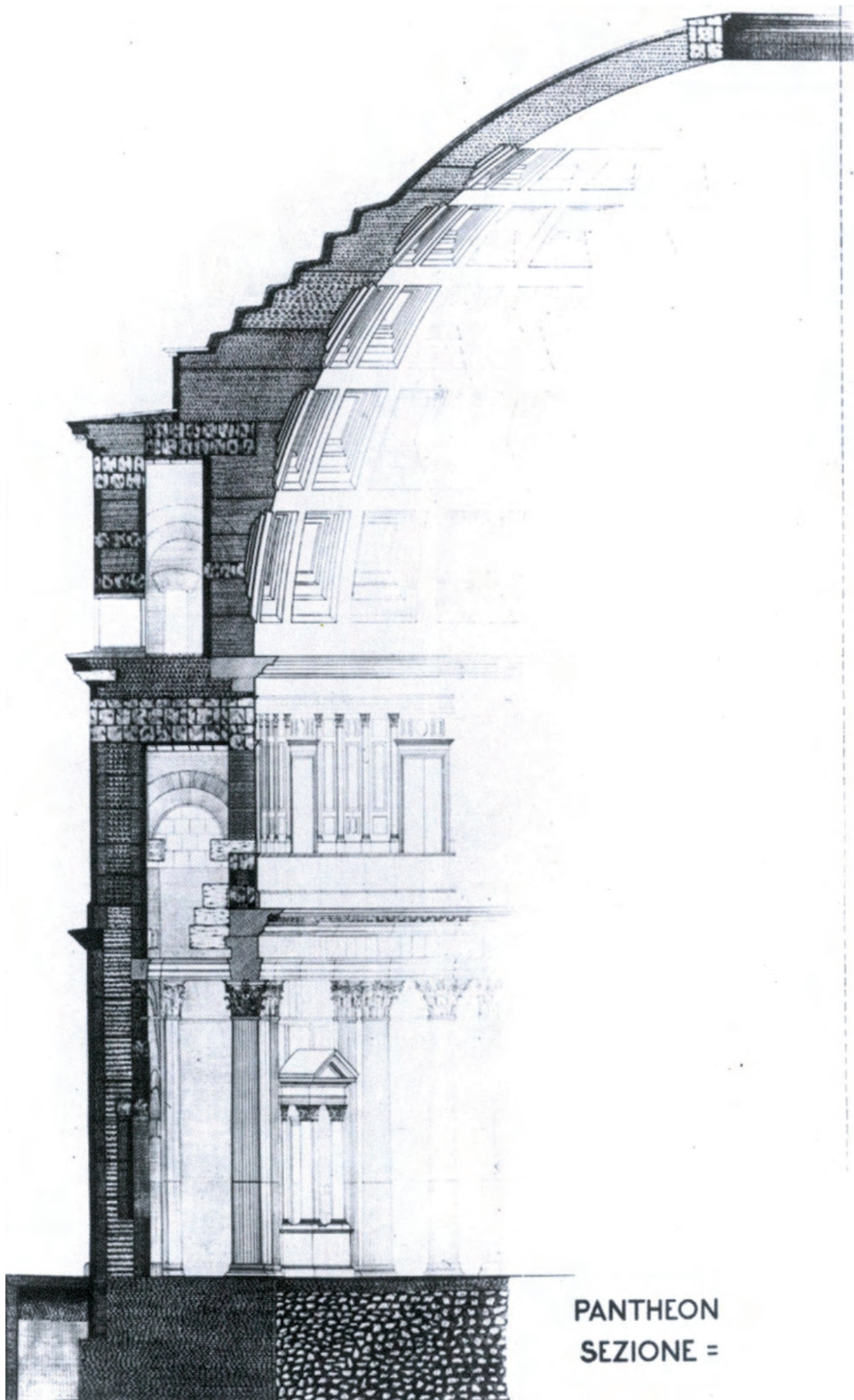
En efecto, desde los cimientos hasta el óculo, la sección del Pantheon se concibe como todo un continuo que, por exigencias constructivas y estructurales, se conforma a base de capas anulares horizontales de composiciones materiales diversas y distintos groesos. La cimentación y el muro están contruidos siguiendo la técnica del *opus caementicium*, un sistema constructivo mural típicamente romano formado por un doble muro de materiales pétreos o cerámicos. La cimentación, de algo más de siete metros de anchura, se resuelve únicamente con mampostería de travertino, mientras que en el muro, de seis metro y veinte centímetros de anchura total, se emplea travertino y toba en las partes inferiores y toba y ladrillo en las superiores. Con independencia de su constitución material, a lo largo de toda su altura este doble muro actúa a modo de encofrado perdido de un alma interior de *caementicia*, un tipo de argamasa típicamente romana.



F.45. Sección transversal esquemática del Pantheon, donde puede verse representada su superficie interior esférico-cilíndrica. Dibujo del autor.

70. De entre las cúpulas previas a la construcción del Pantheon destacan las cúpula de las termas de Baiae y de Trajano, de unos veinte metros de diámetro. En época romana se construyeron algunas cúpulas más, pero nunca superaron los treinta y cinco metros. Más de milenio y medio más tarde, con sus cerca de cuarenta y dos metros de diámetro, la cúpula de la Catedral de Florencia erigida en el siglo XV y la cúpula de San Pedro de Roma del siglo XVI, se acercaron a las dimensiones del Pantheon. Sin embargo, se precisó el empleo de una nueva tecnología y un nuevo material estructural para superar la luz del Pantheon, primero mediante el uso de la estructura metálica y luego mediante el empleo del hormigón armado. No obstante, la cúpula del Pantheon sigue siendo la mayor cúpula jamás construida en hormigón sin armar. Ver ADAM, Jean-Pierre: La Construcción romana: materiales y técnicas. León: Editorial de los oficios, 1996, p. 200; y MARK, Robert: Light, wind and architecture: the mystery of the master builders. Cambridge: MIT, 1990, p. 52

71. "Lo que se produce, en esencia, es el paso de una arquitectura que pone su acento en el volumen, a una arquitectura que pone su acento en la creación del espacio interior. Se produce el paso de un espacio creado por adición, por suma de elementos individuales con entidad propia como el pilar y el dintel, a un espacio generado por sustracción, que ensambla la materia de tal manera que muros y techos forman una masa homogénea". DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 122

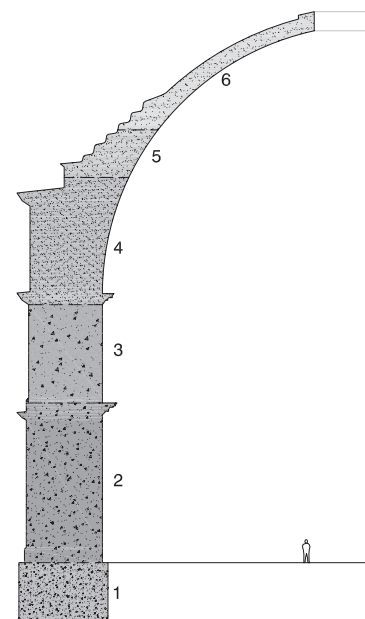


F.46. Sección constructiva del Pantheon, por Alberto Terenzio. E 1/20.

En la construcción de la parte superior del muro y en toda la cúpula se sustituye este pesado encofrado pétreo y cerámico del muro por un encimbrado inferior de madera a modo de encofrado recuperable⁷². En efecto, se aprovecha la naturaleza fluida y plástica de la argamasa para verterla por gravedad sobre el molde, responsable último de la forma final del elemento estructural. La totalidad de la cúpula está conformada por *caementicia*, cuyos componentes esenciales son la cal, la arena y la puzolana. No obstante, a lo largo de su sección se introducen algunas variaciones en la constitución material de la argamasa a fin de mejorar su comportamiento mecánico. En la parte inferior de la cúpula, de cinco metro y noventa centímetros de ancho, se mezcla el mortero con cascajos de ladrillo, en los anillos intermedios se añade al ladrillo también mampuestos de toba y, por último, en el casquete superior, de metro y medio de anchura, se mezcla la toba con lava alveolar⁷³.

Se descubre, entonces, que en el conjunto formado por cimentación-muro-cúpula que conforma la sección del Pantheon existe, por un lado, una sutil estratificación material acorde con el peso específico de la materia empleada y, por otro, una progresiva disminución de la sección del elemento estructural. Las partes inferiores se conciben como elementos gruesos con pesos importantes, pues se emplean con abundancia de materiales como el travertino y el ladrillo cerámico, cuyo peso específico es muy superior al de la toba y la piedra pómez⁷⁴, utilizados en las partes altas en espesores mucho más reducidos. Finalmente, es la ausencia de materia en el óculo la que remata superiormente la sección con la materia más ligera, la luz.

Sin duda, esta doble estrategia contribuye a un mejor comportamiento gravitatorio del conjunto de la estructura. En la cúpula, la parte de la estructura más alejada del suelo donde la materia se inclina peligrosamente hacia la horizontal, se intenta minimizar el efecto de la gravedad reduciendo el peso específico de los materiales que conforman el elemento estructural y se reduce progresivamente la sección a fin de minimizar las cargas de la propia estructura. De esta manera se reduce el peso propio de la cúpula y, al mismo tiempo que se minimizan las tensiones internas que se producen en su interior, se reducen de manera importante los empujes laterales que se transmiten al conjunto formado



F.47. Esquema de la estratificación en la sección el Pantheon según Jean-Pierre Adam:
 1) Opus caementicium con mampostería de travertino; 2) Opus caementicium con mampostería de travertino y cascajos de ladrillo; 3) Opus caementicium con ladrillo y toba; 4) Argamasa con cascajos de ladrillo; 5) Argamasa con ladrillo y toba; 6) Argamasa con toba y lava alveolar. Dibujo del autor.

72. Con los datos de que se dispone en la actualidad no es posible saber con certeza cómo se concibió el encofrado de la cúpula del Pantheon, de modo que se han aventurado diversas hipótesis. En base al sistema de encimbrado utilizado en la construcción de los acueductos romanos, la mayoría de los autores apuestan por un sistema formado por arcos de madera dispuestos radialmente apoyados en su parte inferior en la cornisa superior del intradós del muro y apoyados los unos a los otros en su parte superior. No obstante, existen diferencias importantes en la forma concreta y el proceso constructivo que cada autor imagina para la construcción de estas cimbras. En base al conocimiento de la técnica romana en la construcción de torres de asedio, otros autores imaginan un encofrado radial soportado por una torre central de madera apoyada en el suelo y de la misma altura que la cúpula.

73. Sobre la estratificación material de la sección del Pantheon ver ADAM, Jean-Pierre: La Construcción romana: materiales y técnicas. León: Editorial de los oficios, 1996, pp. 196-201 y TAYLOR, Rabun: Los Constructores romanos: un estudio sobre el proceso arquitectónico. Tres Cantos: Akal, 2006, pp. 214-216

por el muro y la cimentación. El conjunto formado por la cimentación y el muro es el elemento más próximo a la tierra y, por tanto, el más grave. En él se acumula la materia de mayor peso específico y en la mayor cantidad pues, aumentando el peso propio y la anchura del elemento e hincando una parte de la estructura en el terreno, es como se consigue resistir a los empujes laterales transmitidos por la cúpula.

No es casualidad, pues, que la gradación de los materiales según su peso específico, disponiendo los más pesados abajo y los más ligeros arriba, así como la disminución de la sección del elemento en altura, dejando espacio al aire y la luz hasta alcanzar el óculo central, contribuyan al correcto comportamiento gravitatorio del conjunto de la estructura. Tras estas dos estrategias gravitatorio-estructurales, observadas ya de manera elemental en el Stonehenge⁷⁵, se esconde la histórica vinculación de la gravedad con el peso de la materia telúrica. A diferencia de las construcciones pétreas, el uso de la argamasa permite en el Pantheon la variación gradual de la sección gracias a su inicial naturaleza plástica y, además, hace posible la variación del peso propio del elemento mediante la utilización de un tipo de árido más o menos ligero. Se alcanza así un gran refinamiento técnico que permite concentrar, de manera exponencial, la mayor cantidad de peso y materia en las partes que están en contacto con la tierra, acercando de este modo el centro de gravedad del conjunto hacia su lugar natural, la tierra.

A pesar de compartir, en lo esencial, una misma composición material basada en el empleo de una argamasa que dota de un gran monolitismo al conjunto formado por el muro y la cúpula, lo cierto es que el comportamiento mecánico de ambos elementos es notablemente distinto.

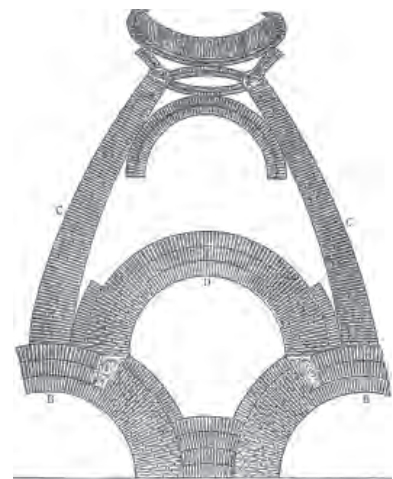
En lo que se refiere a la cúpula, aunque formalmente pueda ser considerada la rotación de un arco de descarga sobre su eje vertical, lo cierto es que su comportamiento estructural difiere notablemente del de éste. Es por ello que el funcionamiento estático de la cúpula del Pantheon, la mayor estructura a compresión jamás construida, ha sido objeto de estudio durante siglos. Una de las más célebres explicaciones

74. Según Robert Mark, la densidad media estimada a diferentes alturas del conjunto formado por cimientos, muro y cúpula es de 2.400 Kg/m^3 en la cimentación, 1.750 Kg/m^3 para el muro de ladrillo, 1.600 Kg/m^3 en la parte baja de la cúpula, y 1.350 Kg/m^3 en la parte superior (MARK, Robert: Light, wind and architecture: the mystery of the master builders. Cambridge: MIT, 1990, p. 62). A modo de referencia, cabe señalar que el peso específico del travertino es de aproximadamente 2.500 Kg/m^3 , el ladrillo cerámico macizo se encuentra entre los 1.600 y los 1.800 Kg/m^3 , la toba entre los 1.200 y los 1.300 Kg/m^3 , y la piedra pómez entre los 700 y los 900 Kg/m^3 .

75. Ver apartado III-2.4. Gravedad y luz como realidades contrapuestas.

de su comportamiento mecánico es la desarrollada por Choisy en base al dibujo realizado por Piranesi, según el cual la cúpula estaría formada por un complejo sistema tridimensional de nervios curvos y arcos de descarga cerámicos. Aunque el propio Choisy advierte de la imposibilidad de verificar el dibujo de Piranesi -señalando de paso la gran cantidad de hipótesis arriesgadas que pueden encontrarse en su obra-, el gran detalle del dibujo, la existencia de otras cúpulas nervadas construidas en la Roma antigua y la presencia de arcos de descarga en el muro de soporte de la cúpula del Pantheon induce al tratadista a aceptar, finalmente, la existencia de esta armadura cerámica interior, explicando con detalle su supuesto funcionamiento mecánico⁷⁶. Según la descripción de Choisy, la armadura está formada por un sistema de nervios meridianos apoyados sobre unos grandes arcos de descarga que transmiten el peso de la cúpula al tambor. Un segundo orden de arcos de descarga más pequeños, situados entre los nervios principales, descansa sobre los anteriores. En la parte superior de la celosía estructural, se construye un anillo cerámico reforzado por un complejo sistema de arcos intermedios, que permite liberar el óculo. En caso de haber sido cierta la versión de Piranesi y Choisy, la cúpula del Pantheon se hubiera erigido como un excepcional ejemplo de la transmisión y el encauzamiento de las fuerzas de la gravedad a través de elementos estructurales lineales curvos. Sin embargo, Alberto Terenzio demuestra en 1932 la falsedad de esta hipótesis por medio de la fisuración radial observable en la cúpula, cuya dirección no puede corresponderse con el modelo planteado por Piranesi y Choisy. Los únicos arcos y anillos cerámicos hallados en la cúpula se encuentran en su arranque y en el óculo⁷⁷.

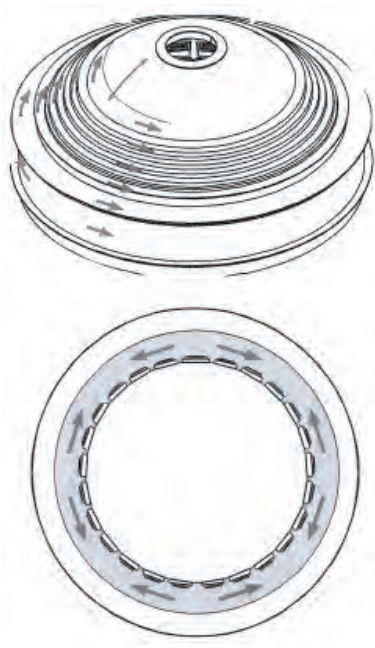
Otro modelo de comportamiento mecánico de la cúpula es el que la concibe como un sistema de anillos horizontales de funcionamiento estático similar al de la falsa cúpula pétreo, con la diferencia fundamental de que la argamasa asegura la continuidad material de la estructura. Según este modelo, la oposición de los anillos a la tendencia de la cúpula a deformarse hacia abajo por efecto de su propio peso provoca la aparición de esfuerzos de compresión en toda la estructura. La cohesión interna de la argamasa hace solidaria la respuesta de los distintos anillos, que se constituyen así en una lámina curva en la que



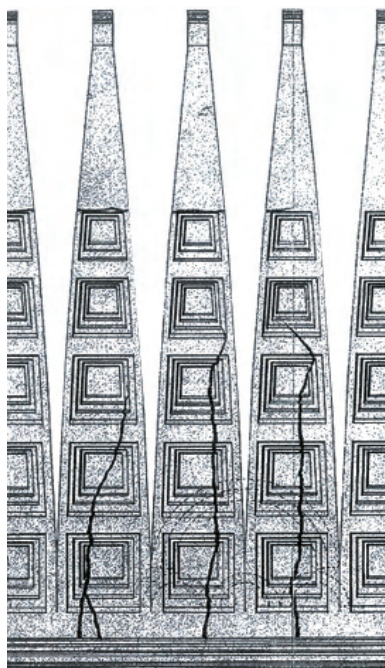
F.48. Esqueleto cerámico de nervios y arcos de descarga de la cúpula del Pantheon según Francesco Piranesi y Auguste Choisy. CHOISY, Auguste; HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago (ed); GIRÓN SIERRA, Francisco Javier (ed); *El Arte de construir en Roma*. Madrid: CEHOPU, 1999, p. 77

76. Ver CHOISY, Auguste; HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago (ed); GIRÓN SIERRA, Francisco Javier (ed); *El Arte de construir en Roma*. Madrid: CEHOPU, 1999, pp. 76-78.

77. "En los años 1930-32 se realiza la restauración más importante de las recientes en el Panteón obteniéndose datos que documentan los trabajos que sobre el mismo han aparecido con posterioridad, sobre todo en lo referente a técnicas constructivas y principios estructurales, que fueron publicados por A. Terenzio, demostrando que todas las interpretaciones realizadas hasta la época sobre la cúpula, por parte de autores como Choisy o Drum estaban equivocadas". MONTERO FERNÁNDEZ, Francisco Javier: *El Panteón: imagen, tiempo y espacio: proyecto y patrimonio*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2004, pp. 91-92



F.49. Esquema del comportamiento estático de la cúpula según el modelo de anillos a compresión horizontal. BELARDI, Giovanni: *Il Pantheon: storia, tecnica e restauro*. Roma: Betagamma, 2006, p. 273



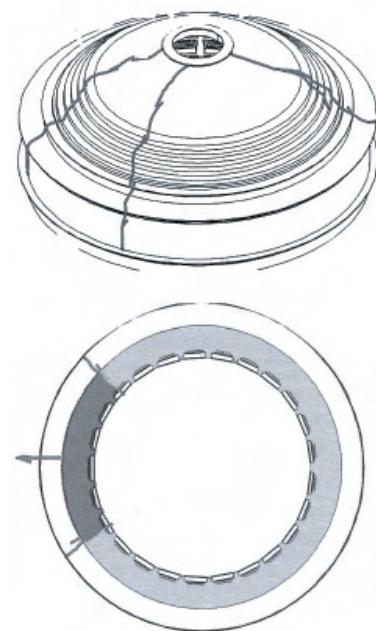
F.50. Esquema de la fisuración de la cúpula, por Alberto Terenzio. BELARDI, Giovanni: *Il Pantheon: storia, tecnica e restauro*. Roma: Betagamma, 2006, p. 121

tanto los meridianos como paralelos trabajan a compresión. Esta doble compresión es, precisamente, la que asegura la estabilidad del conjunto. Sin embargo, la fisuración radial observable en la base de la cúpula invalida también este modelo estático, al menos en la mitad inferior de la cúpula, donde la aparición de estas grietas no sería posible si los anillos horizontales de argamasa se encontraran realmente comprimidos.

La fisuración demuestra que los esfuerzos de la cúpula no se transmiten a través de un armazón interior de nervios y arcos cerámicos, y que ésta tampoco se comporta como si estuviese constituida únicamente por anillos horizontales a compresión. La existencia de estas grietas induce a considerar un tercer modelo en el que la cúpula trabaja como un conjunto de semi-arcos de descarga monolíticos e “independientes” dispuestos radialmente como si compartiesen la misma clave. Sin embargo, si en el arco de descarga bidimensional la clave deviene una pieza fundamental para la estabilidad de la estructura, en la cúpula formada por semi-arcos radiales ésta se convierte en una pieza totalmente prescindible. La estabilidad del conjunto queda garantizada por la disposición circular y la forma adovelada de cada uno de estos grandes semi-arcos pues, al quedar encajados entre sí por medio el anillo que conforma el óculo, los unos y los otros se oponen mutuamente a su natural tendencia a la caída, provocando de esta manera la aparición de fuertes empujes laterales que deben ser absorbidos por el muro. Sin embargo, esta hipótesis adopta la existencia de las fisuras observables en la base de la cúpula como un dato inicial, pero no explica el motivo por el cual éstas aparecen. Además, según este modelo de comportamiento mecánico, las fisuras deberían recorrer toda la cúpula desde su base hasta el óculo, cosa que no ocurre pues discurren únicamente desde la base hasta su parte media.

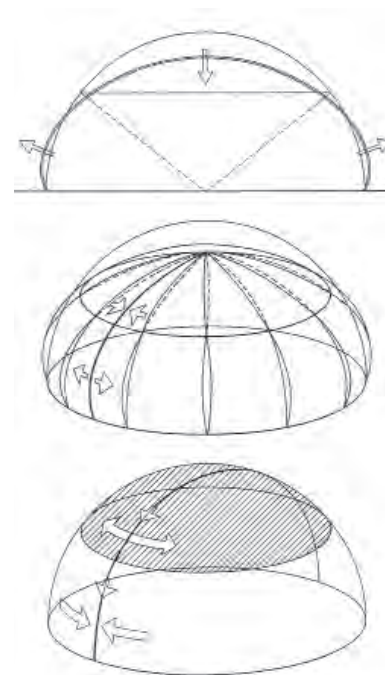
El comportamiento mecánico de la cúpula se encuentra, en realidad, a medio camino entre el modelo de los anillos horizontales a compresión y el de los semi-arcos radiales. Debido a su propio peso, la parte superior de la cúpula tiende a descender, disminuyendo su curvatura y provocando con ello la aparición de esfuerzos a compresión en los paralelos superiores. En cambio, la parte inferior tiende a abrirse hacia a fuera, provocando con ello la aparición de esfuerzos a tracción en

los paralelos inferiores, responsables de la aparición de las fisuras verticales de esta zona de la cúpula. Así pues, la parte superior de la estructura se comporta efectivamente como una secuencia de anillos horizontales comprimidos, mientras que la zona inferior se comporta como de si de semi-arcos de descarga independientes se tratase. En efecto, la parte superior de la cúpula se convierte, entonces, en un gran anillo comprimido a modo de clave, mediante el cual se asegura la posición de los semi-arcos. La estabilidad del conjunto de la estructura se garantiza aprovechando la acción del propio peso sobre la materia estructural y la curvatura gravitatoria tridimensional del elemento de cubrición. La materia del centro de la cúpula deviene entonces estructuralmente innecesaria y acaba por sustraerse, hecho que hace posible la construcción de un gran anillo de compresión de ladrillo que deja libre un óculo de unos nueve metros que, además de aligerar el peso propio de la cúpula, permite introducir cenitalmente la luz hacia el interior. Se descubre, entonces, que el *espacio* se convierte literalmente en la *clave* de la *estructura* romana: la antigua clave adovelada se sustituye por el espacio y la luz⁷⁸.



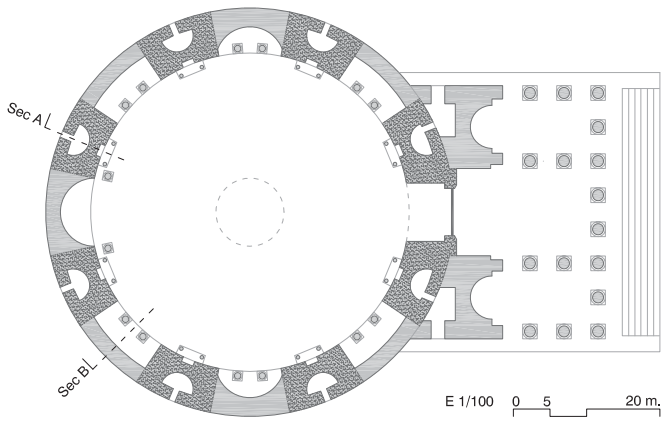
F.51. Esquema del comportamiento estático de la cúpula según el modelo de semiarcos radiales. BELARDI, Giovanni: // *Pantheon: storia, tecnica e restauro*. Roma: Betagamma, 2006, p. 273

Para asegurar la estabilidad de toda la estructura es necesario garantizar la correcta transmisión de los empujes laterales provocados por el peso de la cúpula al muro. Ello se consigue, por un lado, mediante un aumento escalonado del espesor material de la cúpula hacia el muro y, por otro lado, desdibujando los límites entre ambos elementos. En efecto, resulta difícil trazar una línea que separe ambos elementos en sección, pues desde el interior del espacio parece que la cúpula arranca desde el segundo nivel del muro, mientras que desde fuera parece que éste tiene en realidad tres niveles completos.

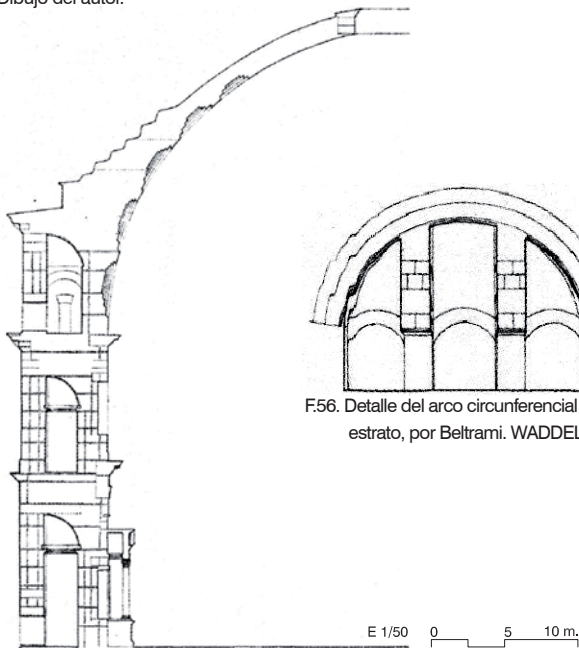


F.52. Esquema del comportamiento estático real de la cúpula del Pantheon. ENGEL, Heino: *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001, p. 245

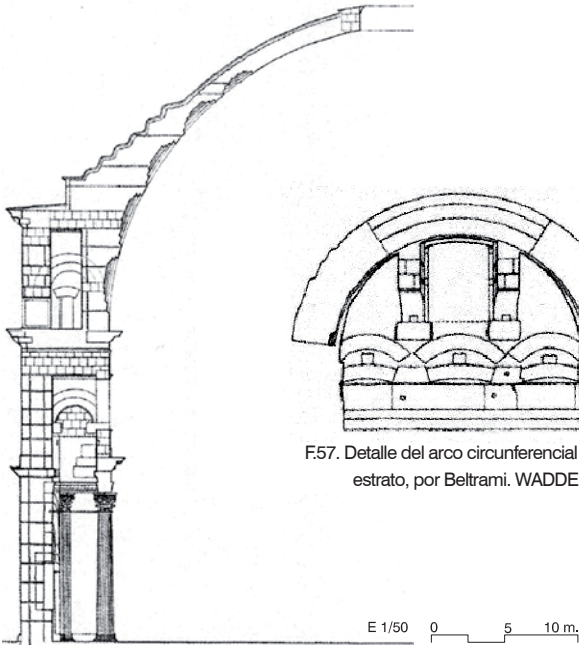
A fin de soportar los empujes provocados por la cúpula es aconsejable incrementar, en lo posible, el peso propio del muro de soporte, minimizando así el efecto de las acciones horizontales. Sin embargo, en una cúpula de la dimensión y el peso de la del Pantheon, esta estrategia se intuye claramente insuficiente. Es necesario, por tanto, recurrir de nuevo a una correcta disposición del vacío estructural a fin de garantizar la estabilidad de la estructura. Evidentemente, en el Pantheon se cumple la regla romana según la cual el grosor total



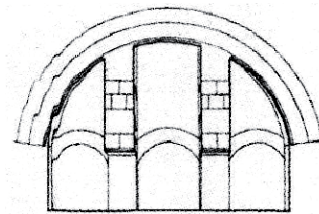
F53. Planta con indicación de los ocho grandes pilares de soporte de la cúpula.
Dibujo del autor.



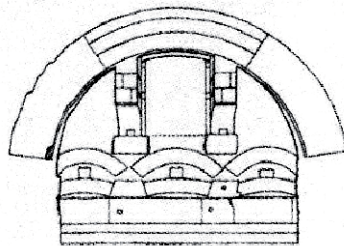
F54. Sección A. Pilar de soporte de la cúpula, por Beltrami.
WADDELL, Gene: Creating the Pantheon: design, materials and construction.
Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 314



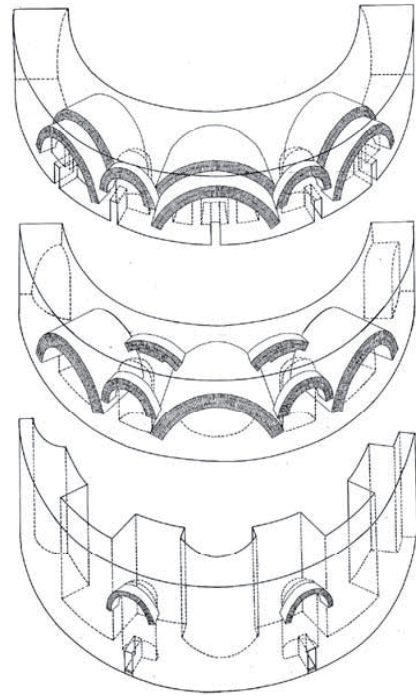
F55. Sección B. Hueco correspondiente a la capilla, por Beltrami.
WADDELL, (...), p. 314



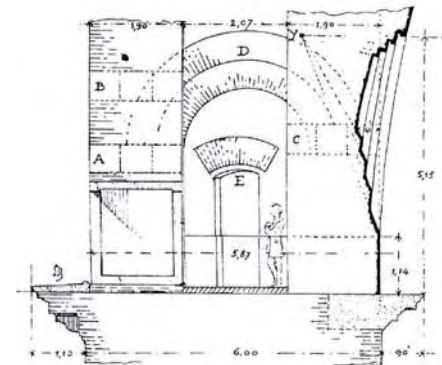
F56. Detalle del arco circular del segundo estrato, por Beltrami. WADDELL, (...), p. 314



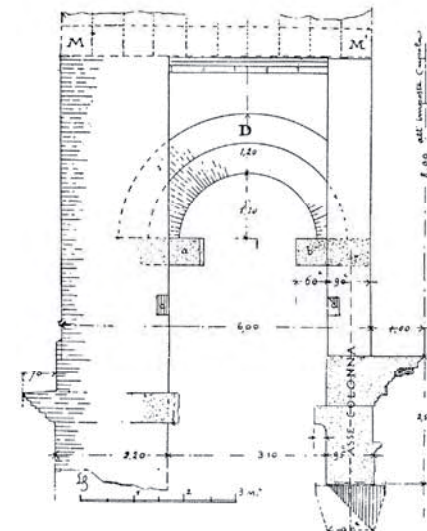
F57. Detalle del arco circular del primer estrato, por Beltrami. WADDELL, (...), p. 314



F58. Axonometría de los tres estratos del muro del Pantheon con indicación de los arcos circunferenciales que permiten la construcción de las capillas.
LUCCHINI, Flaminio: Pantheon. Roma: NIS, 1996, p. 89



F59. Detalle del arco radial del tercer estrato del muro, por Licht. WADDELL, (...), p. 306



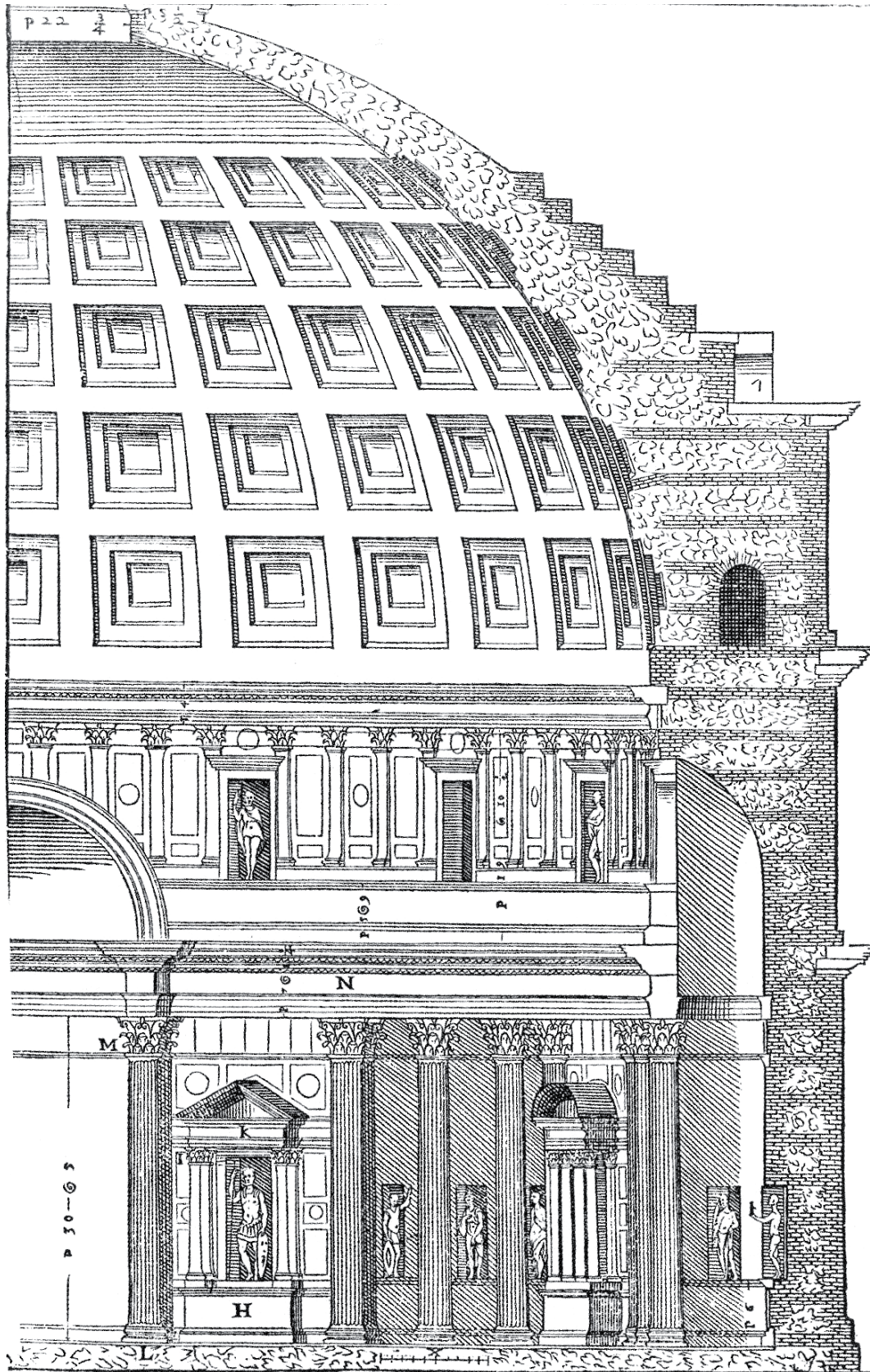
F60. Detalle del arco radial del segundo estrato del muro, por Licht. WADDELL, (...), p. 306

del macizo de estribo de una cúpula debe corresponderse con un séptimo de la luz del espacio a cubrir. Sin embargo, en realidad este muro no es ni macizo ni continuo, pues está constituido por ocho grandes pilares dispuestos entre las capillas interiores, unidos por un muro exterior en el primer nivel y un doble muro interior y exterior en los niveles superiores. A su vez, cada uno de estos enormes pilares está hueco por dentro a fin de ahorrar material sin mermar en exceso su inercia y permitir, además, la necesaria ventilación de la fábrica durante su ejecución. A diferencia de la cúpula, en el muro sí existe un sistema interior de arcos de descarga cerámicos, claramente visibles tanto desde el interior como desde el exterior⁷⁹. Los arcos dispuestos perpendicularmente al trazado del muro sirven para unir solidariamente el paramento interior y el exterior, redirigiendo al mismo tiempo los esfuerzos a fin de salvar el hueco resultante. En cambio, la misión de los arcos de descarga dispuestos siguiendo el trazado de la circunferencia es distinta. Los de mayor tamaño, situados sobre las capillas, sirven para dirigir y encauzar el descenso de las cargas, haciendo posible así la existencia de dichos huecos. Los de menor tamaño, situados entre los anteriores en la zona correspondiente a los pilares, sirven en cambio para transmitir la carga de la cúpula hacia la base de los arcos anteriores, contribuyendo así a su estabilidad. La disposición circular y alternada de estos arcos hace que sus empujes se contrarresten mutuamente, consiguiendo con ello asegurar la estabilidad anular del conjunto. De manera análoga a la cúpula, el secreto del muro del Pantheon radica en el correcto desplazamiento de la masa y el peso a fin de utilizar el vacío como elemento estructural, mediante el correcto redireccionamiento de las cargas mediante elementos embebidos en su interior.

En la imponente estructura del Pantheon queda evidenciada la intrínseca relación entre el espacio arquitectónico y la gravedad estructural. La progresiva gradación de la materia según su peso o la progresiva esbeltez de la estructura son formas de reconocer la naturaleza telúrica de la gravedad. Además, la sabia combinación de materia grave y vacío estructural permite construir una sólida estructura espacial en la que el descenso de las cargas se produce a través de elementos de cubrición curvos o soportes verticales.

78. "Los 'arcos' imaginarios que constituyen la cúpula convergen en una única masa, sujetándose entre sí de manera que se puede eliminar la clave sin que pase nada. El descubrimiento del principio del anillo de compresión tuvo que haber supuesto una sensacional ratificación de una intuición arquitectónica característicamente romana: que un vacío, simplemente en virtud de su forma y de la continuidad de su límite exterior, podía emular a un robusto contrafuerte. Esta realidad *estructural* era coherente con una inveterada tendencia *formal* romana a expresar la potencia estructural mediante la sustracción o el desplazamiento de la materia sólida, equilibrando el vacío con la masa que lo circunda. La cúpula como anillo de compresión es una forma intuitiva de conocimiento: el espacio contribuye a soportar la carga". TAYLOR, *Rabun*: Los Constructores romanos: un estudio sobre el proceso arquitectónico. *Tres Cantos: Akal*, 2006, p. 64

79. "Exteriormente existe un paramento de ladrillo en el que se ven arcos formando una red de descargas que tensan la construcción y crean zonas verticales de transmisión de las presiones, favoreciendo con ello una sabia distribución de todas las fuerzas". ADAM, *Jean-Pierre*: La Construcción romana: materiales y técnicas. *León: Editorial de los oficios*, 1996, p. 198



F.61. Sección transversal y alzado interior, por Andrea Palladio. E 1/20

III.3.4.4. La tectónica aparente de la estructura

“Si en la arquitectura griega lo que en el fondo se trataba de explicar era la propia idea del construir en su sentido más general y universal, por medio de su propia autolimitación constructiva y formal y así poder alcanzar una extrema coherencia, en la romana, por el contrario, lo que se revelará es la propia complejidad de la arquitectura, entendida como arte y como técnica, como realidad y como apariencia, en última instancia, como confrontación entre exigencias prácticas y estéticas”⁸⁰

Manuel Iñiguez

A lo largo de la historia el papel de la estructura arquitectónica no se ha visto limitado únicamente a la mera satisfacción de la necesidad de garantizar la estabilidad gravitatoria de la masa construida; se le ha exigido, además, la expresión tectónica de su propia función mecánica. En la mayoría de las ocasiones, la arquitectura se ha limitado a manifestar las características reales de la estructura, revelando fidedignamente cuestiones tan importantes como el descenso de las cargas, el peso de la masa construida, la relación entre la carga y el soporte, o la capacidad portante de la estructura.

Sin embargo, algunas estructuras han aspirado a establecer ciertas relaciones con la fuerza de la gravedad que han rebasado las posibilidades técnicas de su época. En estas ocasiones, la arquitectura ha conseguido mediante la apariencia lo que le ha sido vedado a la técnica, subrayando, negando, minorando o exagerando visualmente determinadas cualidades gravitatorias de la estructura⁸¹. En el fondo de todas estas operaciones proyectuales ha estado, siempre, el deseo nunca alcanzado completamente del máximo grado de ligereza, si no real, aparente, en la construcción física de la arquitectura. También en este sentido el Pantheon de Adriano se constituye, una vez más, como una obra maestra de la arquitectura.

80. IÑIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p. 91

81. Sobre las estrategias proyectuales a fin de enfatizar o disminuir la sensación arquitectónica de peso y levedad, ver ARNUNCIANO PASTOR, Juan Carlos: Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Dantéum. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007

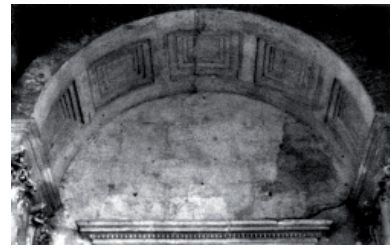


F.62. Artesonado del intradós y óculo central de la cúpula del Pantheon. Fotografía del autor.

Comúnmente se ha aceptado la idea de que la cúpula del Pantheon se ve enormemente aliviada de parte de su peso gracias a la existencia de casetones en su superficie inferior. Sin embargo, un somero análisis volumétrico revela que la incidencia de este ahuecamiento en el aligeramiento de la cúpula es realmente muy escasa⁸². Por otra parte, se observa que los casetones de mayor dimensión y profundidad se disponen en el arranque de la cúpula, precisamente allí donde la práctica verticalidad de la estructura hace innecesario alivio alguno, mientras que la zona central superior, donde más necesario sería el aligeramiento, queda libre de artesonado. A la aparentemente inútil existencia de casetones en la parte inferior de la cúpula no se ha intentado buscar razón estructural alguna, pero la ausencia de artesonado en la parte central se ha intentado justificar por medio del excesivo adelgazamiento de esa zona aunque, en realidad, su espesor es el mismo que el de la hilera superior de casetones, que por decrecer la profundidad del artesonado a medida que aumenta la altura, es la menos profunda. Estas someras observaciones inducen a pensar que tanto la existencia de estos casetones como su distribución no parecen responder, en realidad, a una necesidad real de aligeramiento estructural.

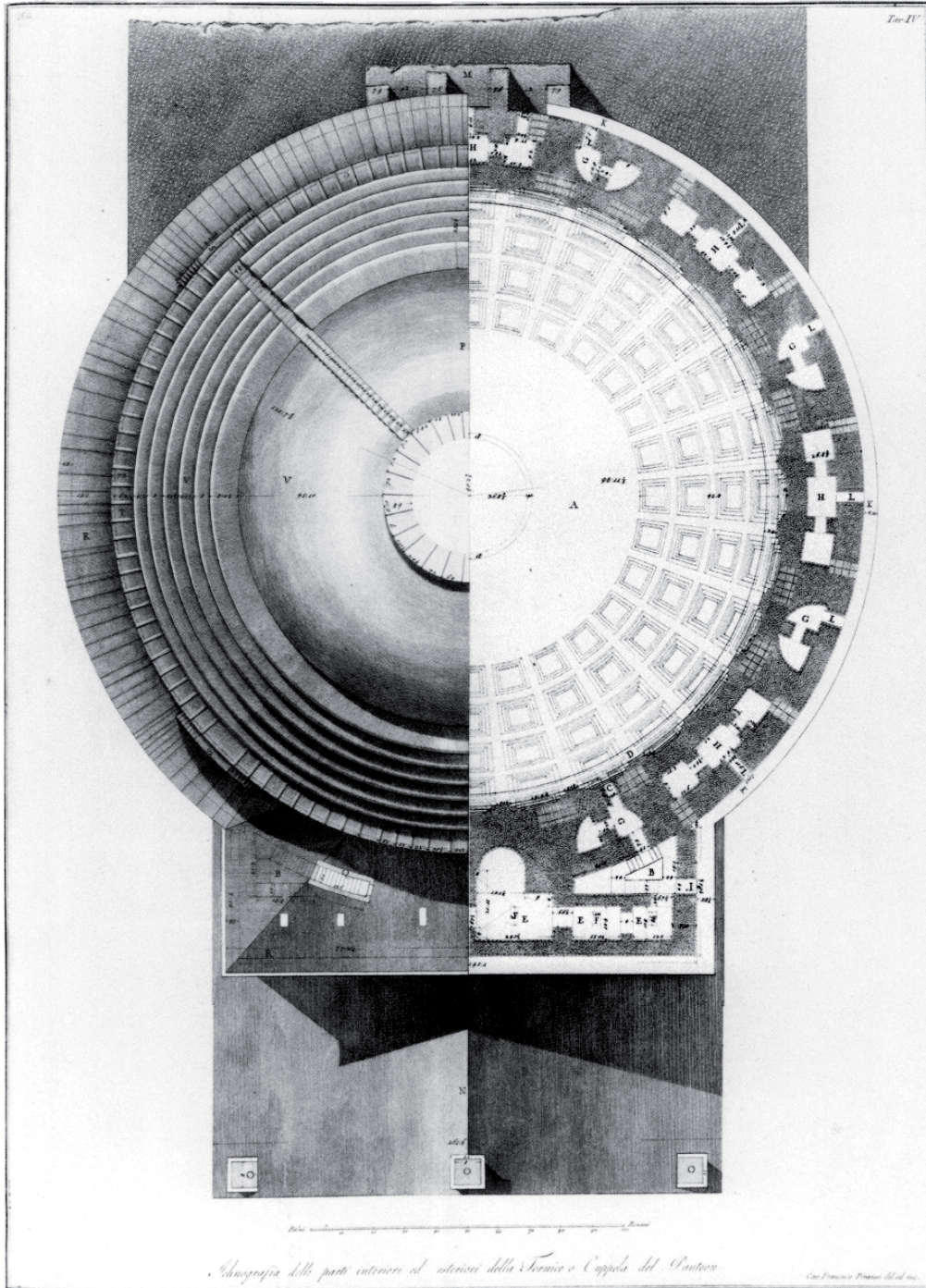
Como alternativa, hay quien apunta también la posibilidad de que el sistema de meridianos y paralelos definido por este artesonado expresa, en cierto modo, el comportamiento estructural de la cúpula, correspondiéndose los primeros con el descenso de las cargas y los segundos con los esfuerzos anulares. Sin embargo, esta hipótesis es incapaz de explicar por qué este sistema de meridianos y paralelos no se extiende también a la parte superior de la cúpula.

El uso del mismo recurso formal en el intradós del arco de cubrición del umbral exterior de la puerta de acceso al interior del templo, donde no es necesario ningún tipo de aligeramiento estructural y cuyo comportamiento no responde a un sistema de meridianos y paralelos, se constituye como la prueba definitiva



F.63. Arco exterior artesonado sobre la puerta de acceso al interior del Pantheon. WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 199

82. "Un análisis volumétrico indica que el artesonado es el responsable de menos del cinco por ciento del aligeramiento del peso de la cúpula." MARK, Robert: *Light, wind and architecture: the mystery of the master builders*. Cambridge: MIT, 1990, p. 59



F.64. Planta cubierta de la cúpula y proyección de su artesonado, por Francesco Piranesi. E 1/100

WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 257

de la inconsistencia de las dos hipótesis antes apuntadas. Se advierte entonces que éste recurso, tan extendido en la configuración de las superficies internas de las formas de cubrición abovedadas de la arquitectura romana, probablemente deba considerarse como una forma de decoración superficial heredada de la arquitectura griega, gracias a la cual es posible dotar de ligereza visual, medida y escala, a la enorme superficie configurada por la estructura. Por otra parte, el revestimiento original de bronce dorado y profusamente decorado con que se cubrió el artesonado debió transmitir una sensación mucho más ligera y menos estructural que la que hoy en día transmite el desnudo revoco del intradós⁸³.

Se descubre así que, en contra de la opinión general, el modelado de la superficie interna de la cúpula del Pantheon responde más bien a criterios decorativos que estructurales. Sin embargo, hay que apuntar que la organización del intradós de la cúpula del Pantheon en dos zonas diferenciadas podría ser sensible, en cierto sentido, a su comportamiento mecánico. En efecto, la parte superior, lisa y maciza, se corresponde aproximadamente con la zona comprimida, mientras que en la parte inferior, artesonada, se producen los esfuerzos anulares a tracción⁸⁴.

La voluntad de cubrir espacios cada vez de mayor luz induce a la utilización de sistemas estructurales abovedados que requieren potentes soportes capaces de resistir los empujes laterales provocados por el peso de la cubierta. El sistema arquivado heredado de la arquitectura griega se demuestra insuficiente para cumplir esta misión que, sin embargo, gracias a una larga serie de mejoras e innovaciones técnicas, pasa a desempeñar con gran éxito el muro⁸⁵. El muro, un elemento constructivo meramente utilitario y sin ninguna pretensión expresiva dentro del sistema arquivado griego, deviene en la construcción romana en un elemento fundamental en la configuración estructural y espacial de la arquitectura. Se hace necesario, entonces, dotarlo de una cierta expresividad tectónica que, hasta entonces, no había tenido.

83. "La sutil elaboración de las formas y de los detalles con sus variaciones de luz y sombra, aligeran enormemente la masa de la cúpula, y permiten percibirla como un elemento que se apoya delicadamente sobre los límites cilíndricos del espacio". DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 154*

84. Cabe apuntar, no obstante, que la correspondencia entre la articulación tectónica de la cúpula mediante el empleo de una superficie lisa y una artesonada en relación a la parte comprimida y la traccionada sólo es aproximada. El semiángulo donde se produce el cambio en la dirección de los esfuerzos en una cúpula semiesférica se encuentra entre los 52 y los 54°, mientras que el cambio entre la superficie artesonada y la lisa se produce aproximadamente a los 34°, quedando las dos filas superiores de casetones fuera de la zona traccionada. A pesar de esta inexactitud, la percatación y la expresión de esta diferencia de comportamiento mecánico en la cúpula no hace más que constatar el dominio de esta forma estructural por parte de los constructores romanos.

85. "La necesidad de cubrir vastos espacios con sistemas constructivos abovedados más duraderos y resistentes que las estructuras de madera griegas y helenísticas llevará a una construcción basada esencialmente en el uso del muro. Como consecuencia de ello, los problemas de la arquitectura se centrarán en gran medida en torno a los planteados por la capacidad representativa de dicho muro". IÑIGUEZ, Manuel: *La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, pp. 89-90*



F.65. Arcos de descarga del muro exterior del Pantheon. Fotografía del autor.

Los romanos ven en la tectónica del sistema arquitrabado griego⁸⁶ la solución para dotar a la homogénea superficie masiva del muro de una cierta expresividad estructural. La desnudez del muro en las construcciones romanas edilicias⁸⁷, mediante la cual se muestra su verdadera constitución constructiva, se niega en la arquitectura monumental mediante la superposición de un elaborado sistema de columnas y entablamentos adosados al elemento murario⁸⁸. El orden arquitrabado deja de ser, entonces, la representación arquitectónica de una profunda reflexión sobre la relación estructural entre la carga y el soporte para convertirse en un elemento formal dado de antemano con el que construir, por añadidura, un determinado lenguaje arquitectónico.

La unidad arquitrabada formada por la columna y el entablamento pierde el sentido estructural que poseía en el templo griego, para convertirse en una mera decoración superficial con el que se intenta paliar la insuficiente expresividad tectónica del muro⁸⁹. No obstante, los romanos rara vez utilizan estos elementos para revelar el funcionamiento estático real del muro. Más bien al contrario, el orden superpuesto permite ocultar el verdadero comportamiento de la estructura⁹⁰ para construir en su lugar una falsa tectónica aparente alternativa. Se advierte entonces que la nula función estructural que desempeñan los elementos arquitrabados en el muro romano permite transgredir sus cualidades formales a fin de alterar, considerablemente, sus atributos gravitatorios.

La tectónica del intradós del muro del Pantheon se organiza, en sección, mediante dos bandas o estratos claramente diferenciados por sendos entablamentos horizontales mientras que, en planta, se reconoce la existencia de los ocho grandes pilares ahuecados que soportan la cúpula por medio de una secuencia alternada de llenos y vacíos.

En los paramentos interiores de los macizos estructurales del primer estrato se disponen los altares, formados por un podio sobre el que se apoyan dos columnas que, a su vez, soportan

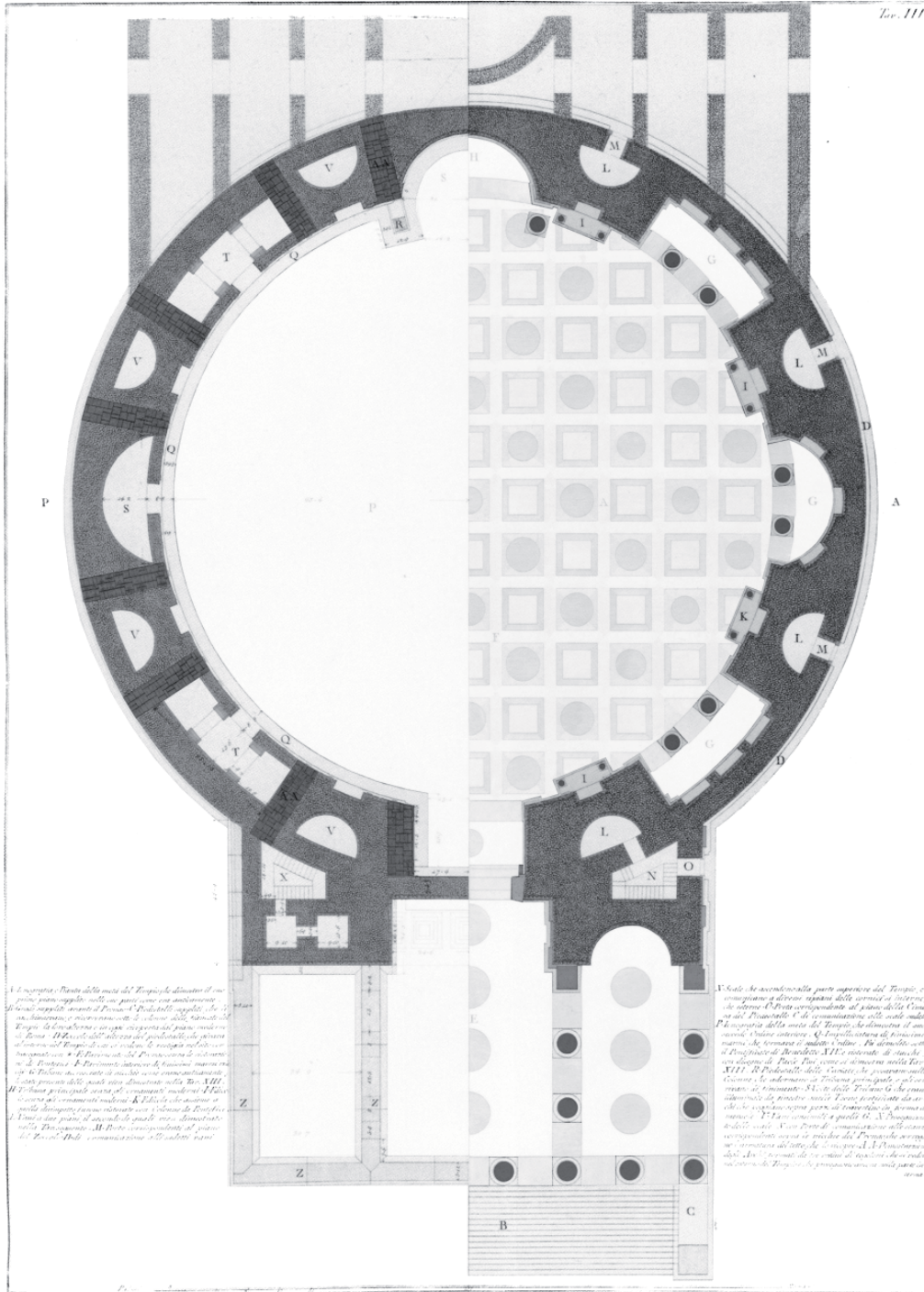
86. Ver apartado III-3.3.1. La tectónica de la estructura arquitrabada.

87. No debe confundirse el hecho de que en la actualidad el muro exterior del Pantheon esté libre de ornamento, pues existe la certeza de que originalmente algún tipo de revestimiento ocultó el paramento de ladrillo y los arcos de descarga hoy visibles.

88. "La arquitectura tomará las formas del Orden con el objetivo fundamental de paliar las limitaciones expresivas del muro. Así nacerá el tema romano de la superposición de los mismos, una actitud manifiestamente pragmática por el hecho de aplicar los recursos pertenecientes por una parte al campo constructivo y por la otra al representativo, de acuerdo con su adecuación práctica a un fin determinado y más allá de toda consideración conceptual previa. El Orden en Grecia era el resultado de una reflexión de carácter especulativo sobre la arquitectura como construcción. En cambio, el Orden en Roma constituirá fundamentalmente un recurso de orden práctico, tendente a resolver problemas relativos a la inteligibilidad material del muro y, como una consecuencia secundaria, problemas relativos al carácter y medida del edificio." *IÑIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, pp. 90-91*

89. "Es verdad que los romanos adoptaron los órdenes clásicos, pero los emplearon de modo básicamente novedoso. Lo que antes había sido elemento estructural fue reducido a "decoración" superficial". *NORBERG-SCHULZ, Christian: La arquitectura romana, en Arquitectura occidental: la arquitectura como historia de formas significativas. Barcelona: Gustavo Gili, 1983, p. 44*

90. "Por lo común la articulación del muro romano no corresponde a la estructura técnica del edificio. Si bien aparecen elementos técnicos, como el arco, el tratamiento formal del muro más que "explicar" oculta la construcción. (...) La apariencia de los muros está normalmente condicionada por la aplicación de los miembros horizontales y verticales de los órdenes clásicos. Sólo en edificios "utilitarios" de importancia secundaria queda a la vista la construcción, hecho que indica por qué se introdujeron los órdenes en relación con las obras más importantes". *NORBERG-SCHULZ, Christian: La arquitectura romana, en Arquitectura occidental: la arquitectura como historia de formas significativas. Barcelona: Gustavo Gili, 1983, p. 49*



F.66. Planta del Pantheon seccionada a dos niveles distintos, por Francesco Piranesi. Original modificado por el autor. E 1/100 WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 256

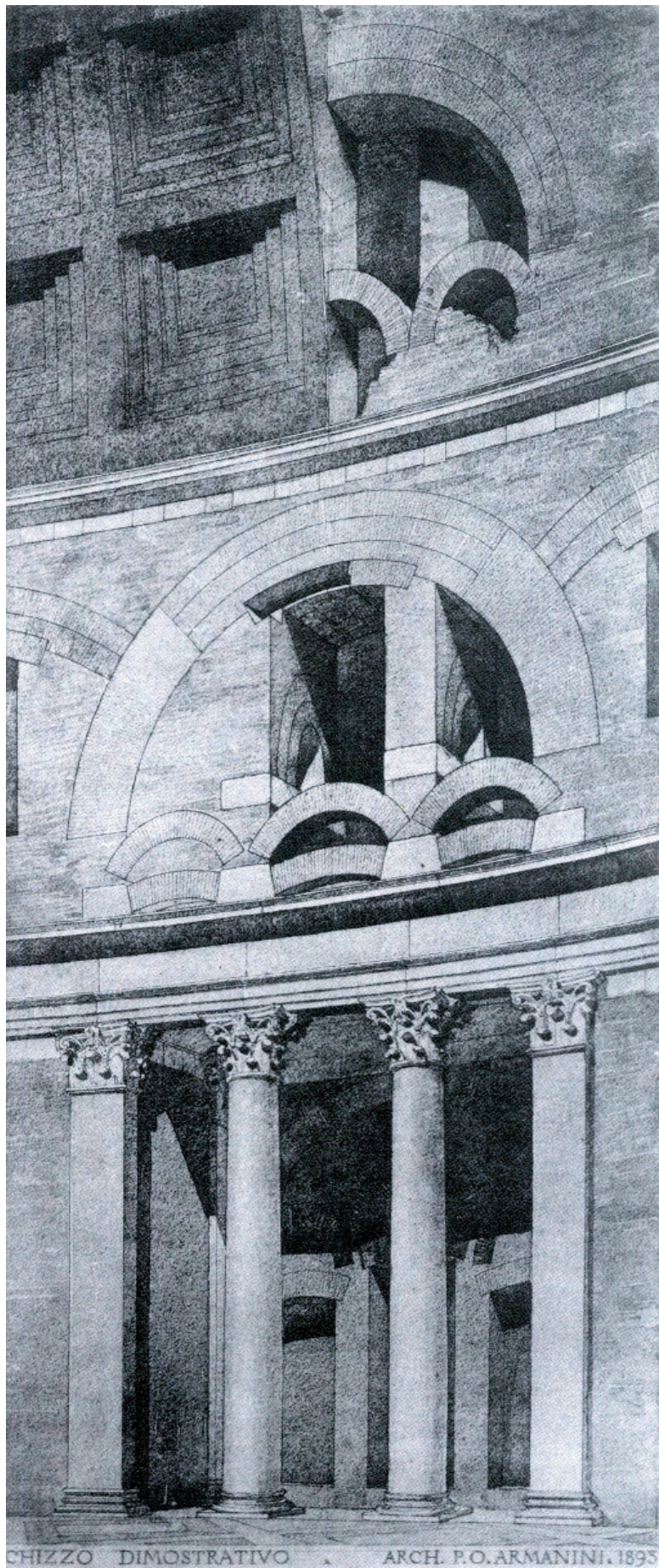
un tímpano triangular o curvo. La unidad arquitrabada del orden griego queda así claramente representada y, al mismo tiempo, despojada de toda misión estructural en relación al conjunto del edificio, pues cada par de columnas no hace más que soportar su propio tímpano. Los ocho huecos dispuestos entre los macizos estructurales se distribuyen de manera que a cada lado del eje longitudinal se ubican tres capillas, emplazando al final del mismo la capilla principal y, en su parte opuesta, la puerta de acceso al interior de la celda. Los quiebros que realiza la directriz del intradós del muro a lo largo de todo el perímetro a fin de configurar estas capillas se articulan tectónicamente por medio de pilastras esquineras que, además, contribuyen de manera efectiva a resolver la transición entre la superficie lisa del muro y las columnas exentas de las capillas laterales ⁹¹.

A excepción de la capilla principal, donde realiza un doble quiebro para adaptarse a la posición adelantada de las dos columnas que la flanquean y luego discurrir por el intradós del hueco, un entablamento continuo visualmente apoyado sobre las columnas y las pilastras remata la parte superior de este estrato, siguiendo el trazado circular de la planta hasta verse interrumpido por el hueco de la puerta de acceso. Todo el conjunto se proyecta en orden jónico, igual que los elementos que configuran el pórtico de acceso al templo, con la única diferencia de que en el interior los fustes de las columnas y las pilastras sí presentan estrías.

La gramática de la estructura arquitrabada de este primer estrato consigue distinguirse con claridad del muro al que pertenece al contraponer su color claro y su marcado relieve a la lisa y más oscura superficie del paramento. Las columnas y las pilastras simulan ser el apoyo de un entablamento continuo que aparenta soportar el peso de la parte superior del muro y, en última instancia, también de la cúpula. El orden representado está tan bien proporcionado que consigue transmitir la sensación de que, efectivamente, cumple una misión estructural primordial en el encauzamiento de las cargas de la cúpula. A tal efecto contribuye, de manera decisiva, la disposición exenta de los

91. "La columna al margen de su utilización estructural capaz de resistir un peso, como es en el caso del pórtico de acceso, (...) se nos ofrece como la prolongación de del muro en la interrupción del plano límite como si se tratara de unos puntos suspensivos en los huecos abiertos de las exedras, siendo las pilastras extremas de éstas la pauta de dicha pausa en el muro y no el simple reflejo parietal de la columna en el muro de atrás. Las columnas resisten el peso de su entablamento, pero el conjunto pilastra-columna y sus relaciones con el muro, como partes protagonistas del límite permiten una lectura mucho más rica. No se advierte su utilización exclusivamente estructural, sino que alcanzan una dimensión formal sorprendente, sirviendo de pautas de la desmaterialización del plano y permitiendo dotar de continuidad al límite a favor de la independencia del espacio central de las exedras". *MONTERO FERNÁNDEZ, Francisco Javier: El Panteón: imagen, tiempo y espacio: proyecto y patrimonio. Sevilla: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2004, p. 114*

92. "En la alternancia de llenos y vacíos, de luces y sombras, los únicos elementos portantes que se manifiestan arquitectónicamente son las pilastras y columnas del primer estrato. Construidas en mármol amarillo, se recortan nítidamente contra las superficies oscuras del fondo de las capillas y este contraste aligera visualmente las columnas circulares. Las ocho superficies entre las capillas son los auténticos elementos portantes, pero el tratamiento superficial adherido de los mármoles recortados contradicen su finalidad". *DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 155*



CHIZZO DIMOSTRATIVO ARCH. P.O. ARMANINI. 1893

F67. Arcos de descarga sobre las columnas de las capillas, por Armanini.

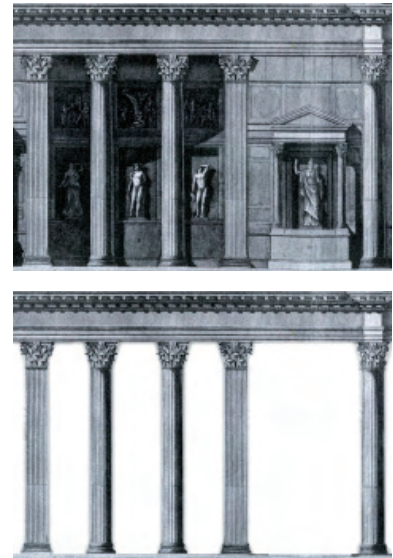
WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction.*

Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 303

pares de columnas de las capillas laterales que, por medio de su color claro y su textura estriada, se distinguen visualmente sobre la penumbra en que quedan sumidas las capillas. No obstante, a pesar de concentrar toda la expresividad tectónica en los elementos estructurales alojados en las capillas, hay que recordar que los verdaderos elementos de soporte de la cúpula se encuentran en los macizos murales que quedan situados entre ellas ⁹². En realidad, estas columnas exentas no soportan más que su propio entablamento, pues un complejo sistema de arcos de descarga embebido en el interior del muro se encarga de desplazar las cargas de la cúpula hacia los machones estructurales que flanquean las capillas.

A pesar de la correcta proporción del orden representado, la pérdida de su función portante permite al entablamento alcanzar, sobre el muro, una luz estructural aparente entre las pilastras que flanquean los altares visualmente excesiva y estáticamente inverosímil ⁹³, que contraviene por completo el sistema de proporciones del propio orden.

Sobre este primer entablamento se apoya el segundo estrato del muro, de menor altura que el inferior y organizado por medio de una secuencia de siete huecos a cada lado del eje longitudinal a modo de ventanas interiores, cuyo ritmo sigue la composición del estrato inferior. Sobre la capilla principal y la puerta de acceso desaparecen las ventanas para permitir la construcción de sendos arcos semicirculares con que se rematan ambos huecos. La restauración realizada por Alberto Terenzio durante los años treinta del siglo XX, visible únicamente entre dos ventanas situadas a un lado de la capilla principal, permite imaginar la configuración visual original del conjunto de este segundo estrato que, en absoluto se corresponde con su apariencia actual, resultado de una drástica modificación de los paramentos realizada en 1747 por el arquitecto Paolo Posi bajo el papado de Benedicto XIV. En la configuración original una banda continua a modo de podio marca la línea de apoyo de las aberturas como de las pilastras, sobre las que se apoya un segundo entablamento.

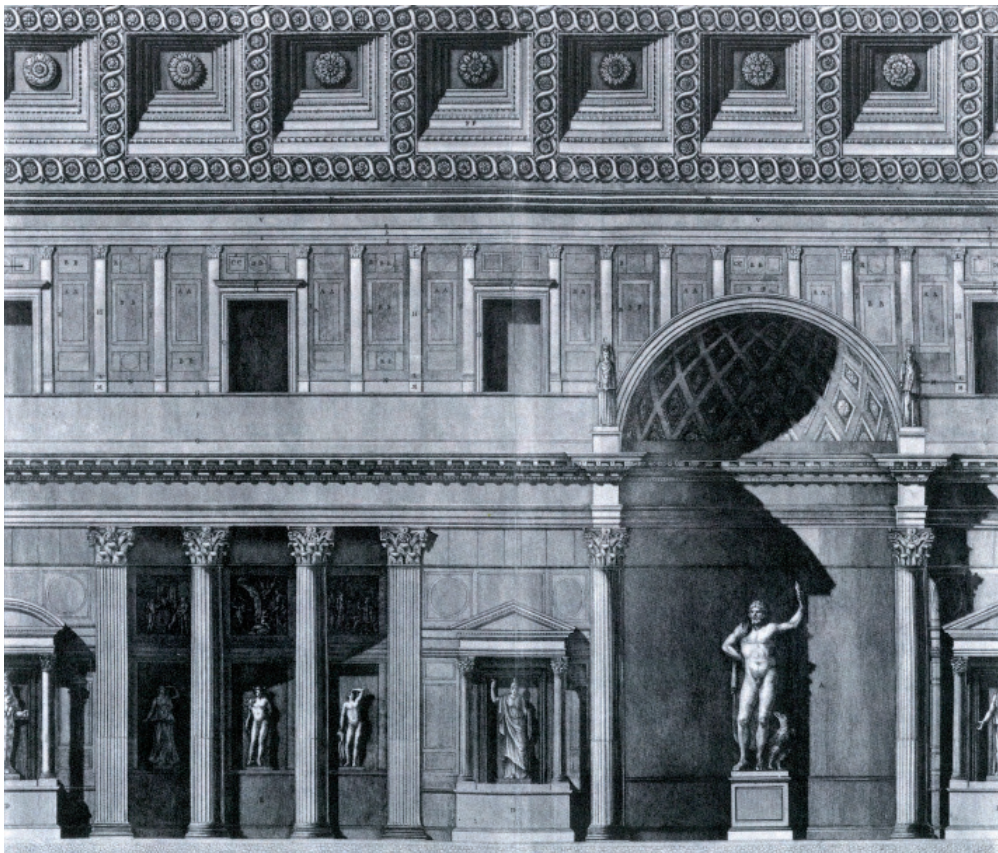


F.68. Luz aparente del orden jónico del primer estrato del muro. En la parte superior, reconstrucción del alzado interior por Francesco Piranesi. En la parte inferior, montaje del autor.

93. "El muro libera al arquitrabe de sus tradicionales dependencias constructivas, es decir, ya no tiene por qué ser un elemento monolítico apoyado en las columnas directamente, ya que ahora trabaja en voladizo desde el muro y, por consiguiente, puede ir despiezado verticalmente. El arquitrabe y el entablamento en su conjunto se constituyen en la práctica en una o varias hiladas del muro, resaltadas más o menos con respecto al mismo, participando en su construcción física. Esto tiene dos consecuencias inmediatas: por una parte, el entablamento puede alcanzar unas luces desacostumbradas e impensables atendiendo a su origen constructivo, variando substancialmente el sistema proporcional del Orden y llegando incluso a hacerle perder verosimilitud constructiva. Por la otra, y en cierto sentido la consecuencia de mayor trascendencia, la progresiva vinculación formal del entablamento al muro y la consiguiente pérdida de la relación constructiva aparente que mantenía con la columna". *INIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p. 97*



F.69. Reconstrucción de la decoración original del segundo esrato del muro del Pantheon, por Alberto Terenzio.
 MACDONALD, W. L.; *The Pantheon: design, meaning and progeny*. Cambridge: Harvard University Press, 1976, p. 37



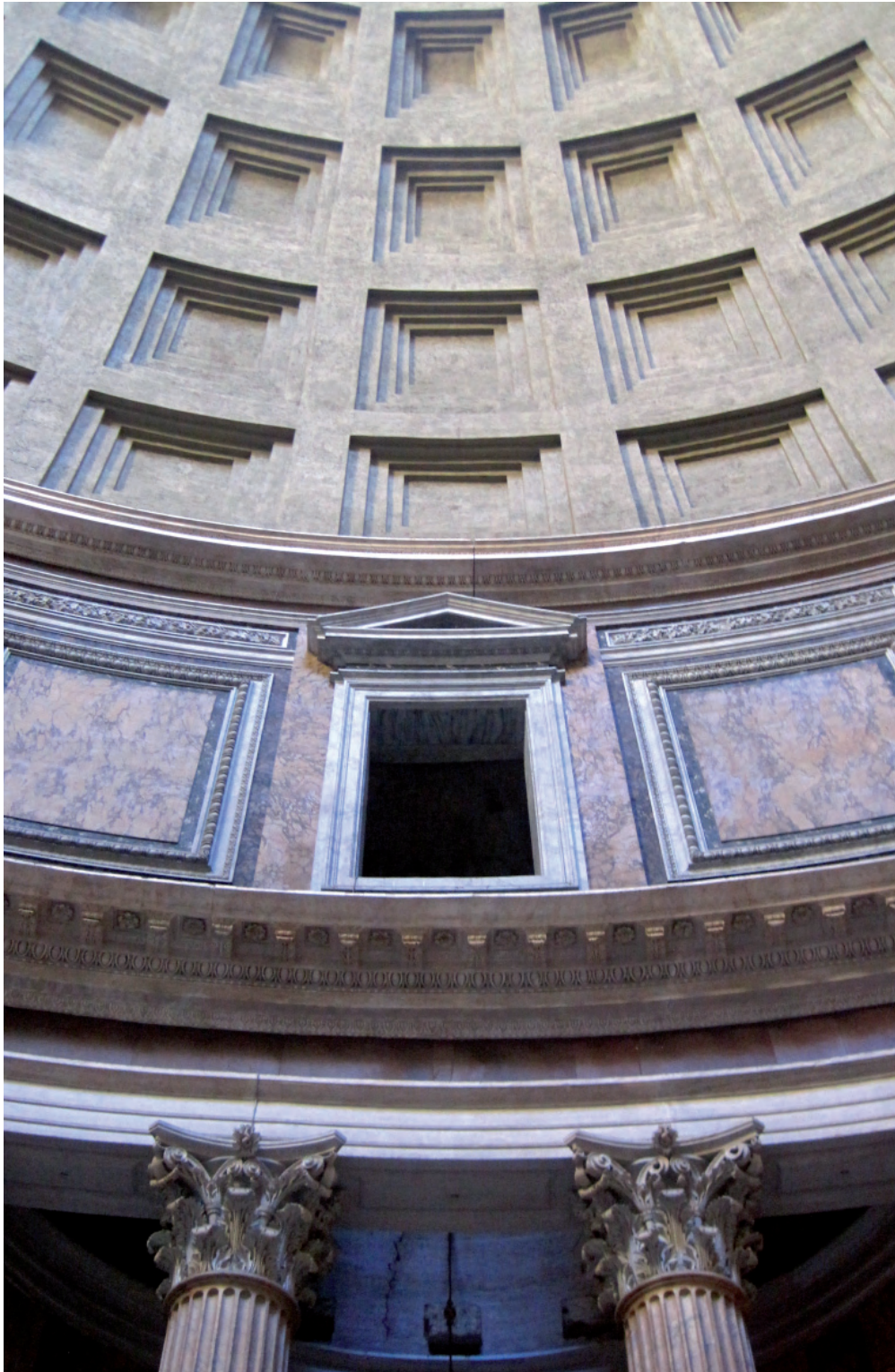
F.70. Reconstrucción del alzado original del intradós del muro y el arranque de la cúpula, por Francesco Piranesi.
 WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 265

A diferencia del orden del estrato inferior, la inteligibilidad del representado en este segundo estrato no es evidente. Las pilastras, un tanto difíciles de distinguir entre la decoración mural, no comparten color con el entablamento, hecho que dificulta su relación visual. Pero, además, este orden muestra unas proporciones totalmente alteradas, ya que el entablamento presenta un canto excesivo en relación a la altura de las pilastras, cuyas propias proporciones son, además, un tanto esbeltas. Esta falta de proporción altera sensiblemente la precisa relación entre la carga y el soporte del orden, de tal modo que la primera parece exagerada y el segundo insuficiente.

A ello se suma la desproporción de las partes que conforman el entablamento pues, al mismo tiempo que su arquitrabe se ve drásticamente reducido, se agranda ostensiblemente la dimensión de su cornisa. Además, la inclusión de una banda de pórfido rojo a modo de friso liso y del mismo color que las pilastras, acaba con la unidad estructural del entablamento, queda de esta manera descompuesto en varias franjas horizontales ciertamente desvinculadas entre sí. Así pues, a pesar de estar representado en este segundo estrato un orden estructuralmente reconocible, la desproporción de composición y la escasa claridad de su percepción visual priva de toda verosimilitud tectónica a la relación entre lo portante y lo portado.

No cabe duda alguna de que estas cuestiones no son fruto ni de una falta de conocimiento de las proporciones correctas del orden, ni de un error en su dimensionamiento. Más bien, todo parece indicar que el diseño de este segundo estrato responde a la expresa voluntad de dotarlo de una conveniente ambigüedad tectónica ⁹⁴. En efecto, la capacidad portante aparente del muro en su conjunto se ve seriamente enrarecida por causa de la contradicción que supone la representación de unos mismos elementos estructurales que, en virtud de sus proporciones, muestran una capacidad portante tan desigual en ambos estratos.

94. "La zona del ático juega un papel crucial como transición visual entre el muro de la rotonda y la cúpula artesonada. Su decoración original multicolora de pequeñas pilastras y ventanas rectangulares, sin embargo, no necesariamente sugería un sistema formal de carga y soporte para la masiva cúpula situada encima. Puramente arquitectónica, no pretende brindar ningún tipo de conexión con sistema estructural del edificio". STAMPER, John W.: *The Architecture of Roman temples: the republic to the middle empire*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, p. 198



F.71. Detalle de la correspondencia vertical del artesanado de la cúpula y los distintos estratos del muro. Fotografía del autor.

La cúpula y el muro son dos elementos estructurales que, pese a formar una unidad material, tienen un comportamiento estructural radicalmente distinto. Así, la primera se constituye como un elemento curvo que tiende a aplanarse horizontalmente por acción de su propio peso, mientras que el segundo, de constitución recta y vertical, tiende a curvarse por el pandeo provocado por las cargas que recibe de la cúpula. Esta intrínseca diferencia estructural entre lo portado y lo portante se enfatiza por medio de un cambio brusco en la materialidad y la decoración de ambos elementos, pues el intradós de la cúpula queda configurado por un geométrico sistema de meridianos y paralelos, originalmente metálico y dorado, que contrasta fuertemente con los marmóreos elementos estructurales representados en el muro. A la desvinculación tectónica entre ambos elementos contribuye, también, la falta de correspondencia numérica de las partes en que se componen ambos elementos, pues mientras que la cúpula está estructurada en planta en veintiocho sectores verticales de casetones, el muro se organiza sólo en dieciséis partes. Por último, con su blanca horizontalidad el entablamento del estrato superior del muro remata el soporte y da paso, de manera definitiva y sin solución de continuidad, a lo soportado.

A pesar de que la distinción entre las formas de cubrición abovedadas y los soportes murales es corriente en la arquitectura romana⁹⁵, la desvinculación de la cúpula y el muro adquiere, en el Pantheon, una particular significación gravitatoria. La falta de correspondencia numérica entre la ordenación de la cúpula y la del muro impide una correcta transmisión visual de las cargas que descienden por los meridianos de la cúpula. Por otra parte, la rotunda horizontalidad del entablamento del estrato superior del muro se configura como un final visual de ese descenso vertical de la gravedad. Parece, pues, que desde un punto de vista visual se impide el natural descenso de las cargas transmitidas por la cúpula. Ésta adquiere, entonces, una ambigua condición gravitatoria pues, al mismo tiempo, se reconoce y se niega su peso.

95. "La distinción entre el soporte y lo soportado es otro recurso empleado por los romanos en el campo de la estética estructural. Un muro que se levanta sin solución de continuidad para convertirse en un arco o en una bóveda pasaría imperceptiblemente de uno a otro. Estas transiciones suaves se pensaba que resultaban desorientadores. Muchos (pero no todos) de los diseños romanos remarcaban la transición entre soporte y techo mediante divisiones horizontales como cornisas, líneas de imposta o mediante cambios bruscos en la decoración. La distinción percibida en virtud de esta horizontal es perfectamente coherente, pues una bóveda y un muro, aunque formen parte ambos de la misma masa continua de hormigón, funcionan, estructuralmente de manera diferente. Una bóveda siempre tiende a aplanarse y a expandirse horizontalmente, es decir, tiende a parecerse a una recta. Esto, a su vez, hace que las partes superiores de los muros o pilas se deformen hacia fuera, curvando un elemento que por derecho propio ha de estar recto. La idea de distinguir uno de otro elemento tiene una cierta lógica, pues la continuidad formal de los dos elementos en absoluto implica que sean estructuralmente homogéneos". TAYLOR, *Rabun*: Los Constructores romanos: un estudio sobre el proceso arquitectónico. *Tres Cantos*: Akal, 2006, pp. 51-52



F.72. Alzado interior del Pantheon. Fotografía del autor.

El muro juega, también, un papel importante en la construcción de esa ambigüedad gravitatoria. Si su intradós mostrara una imagen estructuralmente potente y robusta, transmitiría la sensación de que la carga soportada, correspondiente a la cúpula, es realmente pesada. Si, por el contrario, mostrara una configuración tal que todos elementos estructurales en él representados se mostrasen tectónicamente insuficientes, se produciría una incómoda situación de aparente equilibrio precario. En cambio, si tal como ocurre, el muro transmite una capacidad portante ambigua, capaz a la vez que insuficiente, la carga soportada se contagia de también de esta ambigüedad, y no queda claro hasta qué punto ésta pesa o no. Además, el exagerado vuelo de la proporcionada cornisa del entablamento superior oculta la visión del apoyo de la cúpula sobre el muro, hecho que contribuye a aumentar la ambigüedad de la necesaria gravedad de la cúpula.

La suma de todas estas cuestiones proyectuales -aligeramiento visual del intradós de la cúpula por medio de un artesonado dorado profusamente decorado, falta de correspondencia vertical entre lo portante y lo portado, ausencia o negación del apoyo de la cúpula, impedimento visual del descenso de las cargas gravitatorias y ambigüedad de la capacidad portante del muro-, cada una delicadamente diseñada, conduce a una necesaria ambigüedad gravitatoria sobre la relación tectónica entre lo portante y lo portado, gracias a la cual no queda claro el verdadero alcance de la condición pesante de la cúpula, que sin duda gana en ligereza.

El Pantheon de Roma se muestra así como una lección sutil y magistral de los recursos propios de la arquitectura a fin de manipular, estructural y visualmente, la percepción arquitectónica de la gravedad. Se comprueba, entonces, que el sino de la arquitectura no es otro que lidiar con la gravedad a fin de aprehender sus propiedades físicas fundamentales, no solamente para poderles dar cauce a través de la estructura y hacer posible así la construcción del espacio, sino también para poder transgredirlas convenientemente a fin de subrayar o reducir, a voluntad, la apariencia de los efectos que se manifiestan sobre la materia que conforma el espacio arquitectónico.

III.3.5. LA LUZ COMO PRESENCIA ESPACIAL Y AUSENCIA GRAVITATORIA

*“Se descubre entonces, precisa y preciosa coincidencia, que la Luz es la única que de verdad es capaz de vencer, de convencer a la Gravedad. Y así, cuando el arquitecto le pone las trampas adecuadas al Sol, a la Luz, ésta, perforando el espacio conformado por estructuras que, más o menos pesantes, necesitan estar ligadas al suelo para transmitir la primitiva Fuerza de la Gravedad, rompe el hechizo y hace flotar, levitar, volar a ese espacio. Santa Sofía, el Panteón o Ronchamp, son pruebas tangibles de esta portentosa realidad.”*⁹⁶

Alberto Campo Baeza

En el capítulo anterior se ha desarrollado la idea de que una nueva intuición sobre la naturaleza física de la gravedad, en combinación con una tecnología estructural enormemente desarrollada, induce a un cambio fundamental en la concepción del espacio arquitectónico durante la época romana tardía⁹⁷. Sin embargo, esta explicación parcial, centrada únicamente en las cuestiones relativas a la estructura gravitatoria, solamente es aceptable en aras a una comprensión gradual de las cuestiones planteadas en este extenso capítulo, pues lo cierto es que la luz tiene también una importancia fundamental -quizá incluso mayor que la gravedad- en el desarrollo de esta revolución espacial.

Desde las construcciones megalíticas hasta la refinada arquitectura griega, la noción de espacio se identifica con las relaciones que establecen los volúmenes arquitectónicos con las construcciones adyacentes y el paisaje natural más o menos próximo. La orientación de estos volúmenes viene determinada por el movimiento de sus propias sombras proyectadas sobre la luz del paisaje circundante y por la posición del disco solar con respecto al horizonte, dando lugar a la creación de un espacio exterior donde la luz solar envuelve por completo a las sombras arrojadas por las masas construidas. La luz en sí misma no recibe ningún tipo de valor arquitectónico concreto y particular en relación a la configuración de este espacio exterior más allá de configurar la apariencia visual de las superficies del volumen

96. CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 57. *Architectura sine luce nulla architectura est: Sobre la luz, 1992.*

97. Ver apartado III-3.4.3. La mecánica gravitatoria del espacio estructural.

98. *Es habitual en las arquitectónicas más refinadas de la antigüedad disponer de estructuras arquitrabadas delante de los muros de carga o contención, tal como ocurre en el Templo de Hatshepsut, en el Partenón, o en la stoa del propio Pantheon (ver apartado III-3.2. La luz y la sombra como secuencia espacial). La disposición de estas columnas no responde a ninguna necesidad mecánica, pues el muro que las trasdosa es el encargado de acometer esta función. Más bien, esta estructura arquitrabada superpuesta al muro sirve para “texturizar” el muro por medio de un juego de luces y sombras mucho más complejo que el que se puede obtener únicamente por medio del muro. Las columnas se iluminan sobre un fondo oscuro, creando un gigantesco juego de luz y sombra perceptible desde la lejanía.*

por medio de su texturización a través de la luz y la sombra⁹⁸. Más bien, lo que se celebra es la importancia vital de su fuente inagotable, estableciendo precisas relaciones visuales entre la obra construida y el movimiento del disco solar. La construcción del espacio interior se limita a satisfacer las necesidades prácticas o simbólicas de cada cultura, respondiendo su iluminación concreta a la necesidad de percibir visualmente los límites del espacio o a la voluntad de expresar ciertas ideas alegóricas, respectivamente. En ningún caso la construcción del espacio interior se concibe como una finalidad propia de la arquitectura, ni se otorga a la luz un rol protagonista en la configuración del espacio.

En cambio, en la nueva concepción espacial acaecida durante la época romana tardía, la configuración del espacio exterior queda relegada a un segundo término en favor de la delimitación del espacio interior, que pasa a convertirse en el verdadero protagonista del hecho arquitectónico⁹⁹. El espacio ya no pretende relacionarse visualmente con el entorno natural o construido de su alrededor, sino que intenta establecer relaciones más o menos complejas con el propio sistema espacial interior de la obra a la que pertenece. Sus cualidades dependen fundamentalmente de la luz que lo configura, deviniendo la construcción de esta luz motivo y fin último del hecho arquitectónico¹⁰⁰. Se trata, entonces, de construir una luz particular, propia y apropiada para cada espacio, físicamente idéntica a la vez que arquitectónicamente distinta de la natural luz solar del exterior. En tanto que ésta no puede ser modificada en origen, es el propio objeto arquitectónico el que debe encargarse de seleccionar y aislar una porción de la infinita luz solar con el fin de introducirla en el interior del espacio, modificando y transformando sus propiedades a fin de cualificarla en una luz arquitectónica¹⁰¹.

Para que esta luz pueda manifestarse en el espacio construido es preciso aislarla de la luz exterior y, a tal efecto, resulta imprescindible la construcción previa de una sombra interior¹⁰². En tanto que materialmente opaca y gravitatoriamente ineludible, la estructura se convierte en el primer y más importante elemento configurador de esta sombra, especialmente en aquellos casos en que el mismo material estructural cierra y cubre el espacio. No obstante, la ausencia de

99. "En oposición al arte griego, en el arte romano dicha comunión se disuelve: la materia se vuelve más masiva, pesada, impenetrable, mientras que el espacio y la luz adquieren mayor amplitud y espacialidad. Y ésta es, precisamente, la premisa necesaria para que el espacio interno se "ilumine" y se convierta en el responsable de grandiosos efectos espacio-luz. El espacio entendido como volumen impalpable, como materia etérea: este episodio resulta de importancia determinante para la historia de la relación entre arte y luz. En las termas imperiales de Roma, con la riqueza y variedad de tonos propia de los ambientes saturados en distintos grados de vapor de agua, esta "iluminación" del espacio debió manifestarse de forma verdaderamente sobrecogedora". *SEDLMAYR, Hans: La luz en sus manifestaciones artísticas. Madrid: Lampreave, 2012, p. 24*

100. "La arquitectura está destinada a expresar, junto con la solidez y la gravedad, la esencia de la luz, completamente contraria a éstas. En efecto, como la luz está como aprisionada, cohibida, rechazada por las impenetrables masas variantemente configuradas, desarrolla su naturaleza y sus cualidades de la manera más pura y distinta con gran placer del espectador, puesto que la luz es la más deliciosa de las cosas." *SCHOPENHAUER, Arthur: El mundo como voluntad y representación (4ª ed). México: Porrúa, 1997, p. 174*

101 "La luz arquitectónica pervive sólo en los edificios que procuran todavía la definición del interior: sin preservar este interior, el espacio arquitectónico se enfrenta de nuevo al desamparo del mundo solar". *Citado en VALERO RAMOS, Elisa: La Materia intangible: reflexiones sobre la luz en el proyecto de arquitectura. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004, p. 93. Original en: LLORENTE, Marta: Luz del cenit, diseño interior nº 5, p. 47*

102. "Para hacer presente la luz, para hacerla sólida, es necesaria la sombra. La adecuada combinación de luz y sombra suele despertar en la arquitectura la capacidad de congobernarse en lo más profundo, suele arrancarnos las lágrimas y convocar a la belleza y al silencio". *CAMPO BAEZA, Alberto: Pensar con las manos. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 69. LIGHT IS MUCH MORE. Sobre la luz, 2008*

103. "La estructura es la creadora de la luz" KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (ed.): Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas. Madrid: *El Croquis*, 2003, p. 235. El espacio y las inspiraciones, 1967.

"Puede decirse que un proyecto es la estructura de los espacios en su propia luz". KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (ed.): Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas. Madrid: *El Croquis*, 2003, p. 303. Me encantan los comienzos, 1974.

104. "Desde el interior existe una pérdida de referencia del exterior cercano que rodea el espacio, para abstraer la naturaleza con elementos lejanos, casi infinitos, como el sol y el cielo. Continuando con el pensamiento estereotómico y partiendo de que son espacios que nacen de una idea universal que está desvinculada de un lugar preciso, podemos afirmar que el espacio estereotómico es discontinuo con el exterior. El espacio estereotómico se limita en los muros que lo crean. Es un espacio con puertas y ventanas en discontinuidad con el exterior". Jesús María Aparicio Guisado, en CAMPO BAEZA, Alberto; Aprendiendo a pensar. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 114

"La envoltura exterior del espacio interior del Panteón es un cilindro sin ventanas, ajeno al mundo que le rodea. El espacio interior, iluminado por la luz cenital, organiza su propia composición arquitectónica sin atender otra relación con el exterior que la abertura del óculo que recrea la forma del sol". TORRES TUR, Elías: Luz cenital. Barcelona: COAC, 2005, p. 16

105. "La bóveda nunca alcanzó alturas simbólicas, ni en Egipto ni en Mesopotamia. Nunca fue acentuada exteriormente ni siquiera hecha visible. Permaneció debajo de la tierra, sin luz. El espacio y la luz están unidos. Sin luz, el espacio desaparece. Para que la cúpula alcanzara su importante puesto en la arquitectura, hubo que llevar la luz a su interior y acentuar el aspecto externo de su forma monumental. Para esto era necesaria una concepción espacial completamente diferente". GIEDION, Sigfried: El Presente eterno: los comienzos de la arquitectura. Madrid: Alianza, 1981, p. 487

materia en algunas de sus partes como resultado de la necesidad de liberar el espacio, permite a la luz penetrar en la sombra construida por la estructura, manifestándose en el espacio que al mismo tiempo contribuye a configurar. Así pues, aunque la estructura gravitatoria se constituye como el principal elemento opositor al paso de la luz, es también la que permite y hace posible su ingreso al interior del espacio. Como bien dijo Louis I. Kahn "la estructura es la creadora de la luz"¹⁰³, precisamente porque previamente ha creado la sombra que, al ser devorada por la luz, la hace presente. La estructura se configura entonces como un elemento arquitectónico que, además de cumplir con su ineludible misión de transmitir al suelo el peso de la construcción, adquiere un papel fundamental en la estructuración de la luz que configura el espacio interior, un espacio de luz en la sombra.

La descripción general aquí realizada sobre las propiedades lumínico-estructurales de esta nueva concepción espacial se corresponde fielmente con las características específicas del espacio interior del Pantheon de Roma, que se configura, al mismo tiempo, en origen y paradigma de nueva idea de la arquitectura basada en la manifestación de la luz en el interior del espacio construido por la estructura gravitatoria.

El muro y la cúpula se constituyen como elementos estructurales de encauzamiento superficial de la gravedad que, a la vez que portan y soportan las cargas, cierran y cubren el espacio, impidiendo con su opacidad cualquier tipo de transividad visual o lumínica entre el interior y el exterior. Así pues, desde el interior se pierde toda referencia visual del espacio exterior circundante más allá de la visión parcial de la plaza de acceso a través de la puerta y las columnas del pórtico, o de la percepción lejana del cielo a través del óculo circular de la cúpula¹⁰⁴. Al mismo tiempo, la gran estructura que envuelve el espacio lo sume en una oscuridad total, solamente quebrada por la luz que penetra hacia el interior a través de la discontinuidad estructural del óculo de la cúpula. Así pues, si bien es cierto que por la puerta ingresa una tenue luz indirecta, es por el vaciado central de la cubierta por donde penetra cenitalmente el potente haz de luz solar que, rodeado por sombra estructural, hace evidente la manifestación de la luz en el interior de un espacio que a su vez cualifica e ilumina. El interior

del Pantheon se configura entonces como un espacio para acoger y capturar la luz solar, evidenciando el movimiento cíclico entre la Tierra y el Sol a lo largo de los días del año por medio del desplazamiento del disco de luz proyectado sobre las superficies del interior del templo.

Pese haber existido las formas estructurales abovedadas ya en las civilizaciones anteriores a la romana, nunca antes este tipo de estructuras habían contribuido de manera tan importante a la iluminación del espacio interior. Es precisamente la introducción de la luz a través de estas formas de cubrición lo que da a la estructura un sentido espacial totalmente nuevo¹⁰⁵. Se descubre entonces la íntima relación que desde siempre ha existido entre la luz del espacio arquitectónico y la forma de la estructura gravitatoria: *“la estructura es la que proporciona la luz. La estructura es un diseño de luz. La bóveda, la cúpula, el arco y la columna son estructuras relacionadas con el carácter de la luz”*¹⁰⁶.

Así pues, el Pantheon de Adriano se constituye como un gran vacío interior delimitado y cubierto por una potente estructura gravitatoria capaz de construir una gran sombra interior en la que se manifiesta la luz que, desde el exterior, ingresa por un vacío estructural estratégicamente dispuesto a fin de cualificar y configurar el espacio. La rotunda sencillez espacial de esta operación lumínico-estructural ha hecho del Pantheon una obra única en la historia de la arquitectura que ha despertado durante siglos asombro y admiración¹⁰⁷.

Sin embargo, tanto se ha escrito ya sobre cómo la luz configura este espacio interior único que cualquier intento de desarrollar alguna reflexión nueva sobre esta cuestión parece inevitablemente abocado a la reiteración de las observaciones anteriormente realizadas¹⁰⁸. Es por ello que, en tanto que el presente trabajo de investigación se centra en el estudio de la relación estructural entre la gravedad y la luz con fines espaciales, el análisis desarrollado en los siguientes apartados se centra en cómo la luz del Pantheon contribuye a enfatizar, modificar o subvertir la percepción de las cualidades gravitatorias y espaciales de esta potente estructura¹⁰⁹, una cuestión que pese haber sido ya apuntada por algunos autores, ha permanecido siempre en el pantanoso terreno de las sensaciones personales.

106. KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (ed.): Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas. Madrid: El Croquis, 2003, p. 329. Pensamientos, 1972.

107. “El Pantheon (...) surgió precisamente para acoger a la luz procedente del sol y reproducir su movimiento en el interior, consiguiendo, a través de un sencillo mecanismo de transformación, modificar la luz natural del exterior en una luz sobrenatural pero con sus mismas propiedades. Nos encontramos ante una síntesis única, que por su radical e intensa configuración, deifica la presencia del sol, un acontecimiento que afortunadamente se produce todos los días, convirtiendo lo cotidiano en trascendente”. DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 47

108. Cabe destacar aquí el trabajo realizado por Eduardo de Miguel en su tesis doctoral sobre La luz en la configuración del espacio, dirigida por Juan Navarro Baldeweg (DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006) y cuyo objetivo es analizar los distintos momentos en que es posible manipular conscientemente la luz con la finalidad de configurar el espacio arquitectónico, elaborando finalmente una taxonomía sobre los distintos momentos en la transformación de la luz (opositor, diafragma y receptor) y la configuración del espacio (apropiación y elaboración, medida, materialización y significado). Para llevar a cabo esta reflexión general, De Miguel analiza textual y gráficamente la trayectoria concreta de un rayo de luz en el interior del Pantheon de Roma, dando como resultado un trabajo de investigación de gran valor, tanto por las reflexiones generales realizadas en torno a la luz y el espacio, como por las aportaciones concretas al conocimiento y la comprensión de esta obra de arquitectura única.

109. En el apartado III-3.4.4. La tectónica aparente de la estructura, se han expuesto desde el punto de vista del espacio y la gravedad una serie de efectos arquitectónicos que se dan en el interior del Pantheon, destinados a modificar la manifestación y la percepción de los fenómenos gravitatorios más elementales, como el peso o el descenso vertical de las cargas. Sin ninguna duda, la luz que configura el interior del Pantheon contribuye también, y de manera decisiva, a la manipulación arquitectónica de estos efectos gravitatorios.



F.73. Luz indirecta atravesando la puerta del Pantheon y su celosía superior. Fotografía del autor.

III.3.5.1. La estructura física de la luz ocular

*“La luz en este espacio no fluye, se la atrapa. Al traspasar el diafragma los rayos de luz se solidifican y esta manifestación de la materia lumínica, a través del brillo de las partículas del aire, es acogida en su interior como si se tratara de un verdadero dios.”*¹¹⁰

Eduardo De Miguel

En la estructura que construye y envuelve el espacio del Pantheon existen dos discontinuidades por donde la ausencia de materia permite el ingreso de la luz: la puerta, que a modo de hueco en el muro permite el acceso al interior, y el óculo que libera cenitalmente la cúpula. Sin embargo, las cualidades de la luz que penetra por ambos huecos son muy diferentes.

El muro de directriz circular envuelve totalmente el espacio, impidiendo cualquier tipo de relación visual o lumínica entre el interior y el exterior más allá de la que puede producirse por el hueco de la puerta. La luz que ingresa a través de ella es una luz de norte, indirecta, resultado de la reflexión difusa de la luz solar sobre el pavimento de la plaza de aproximación al templo. Solamente los rayos solares reflejados hacia el sur y con una inclinación ligeramente ascendente llegan a alcanzar, después de sortear las columnas del pórtico, la puerta de acceso. Si ésta no se encuentra abierta, sólo pueden proseguir su camino hacia el interior de la cella aquellos rayos capaces de atravesar la celosía ubicada en la parte superior. Debilitada por las reflexiones y obligada a sortear y traspasar todo tipo de obstáculos, la luz que llega a alcanzar el interior es tan débil que poco puede contribuir a la configuración del espacio. No obstante, ello no impide que, en determinadas circunstancias, algunos rayos de luz lleguen a manifestar su presencia física atravesando la penumbra del umbral interior de la puerta.

Por su parte, el casquete semiesférico de hormigón que cubre la cella del Pantheon se encarga de impedir con su opacidad el paso de los rayos solares hacia el interior, permitiendo solamente

110. DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 143

111. Sin embargo, hay que aclarar que este soporte central no tenía, en realidad, ninguna función estructural, pues la falsa cúpula, aunque rematada por una gran piedra plana, era capaz de cubrir el espacio y soportarse a sí misma: “Los romanos descubrieron la cúpula de dovelas que consideraron un patrón a repetir incansablemente. Sólo sus antecesores, los etruscos, hicieron un intento de conectar con la tradición en algunas tumbas, como los Tholos de Casale Marítimo, la tumba de la Montagnola del 600 a. C., o los túmulos de Cerveteri, todos ellos con un imponente soporte interior de carácter simbólico puesto que no tiene papel estructural”. ESCRIG, Félix: Las Grandes estructuras de los edificios históricos: desde la antigüedad hasta el gótico. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 1997, p. 34

112. “Óculo, columna de luz que todo lo soporta y anima”, Alberto Ustároz. Citado en DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 280. Original en USTÁROZ, Alberto: La lección de las ruinas. Barcelona: Caja de Arquitectos, 1997, p. 57

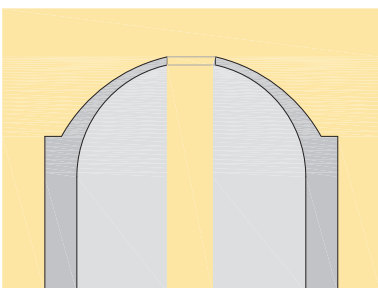
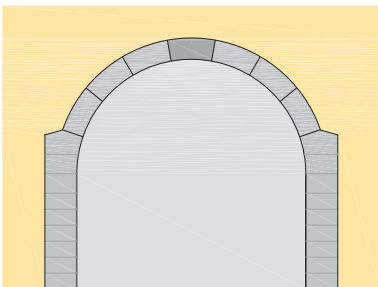
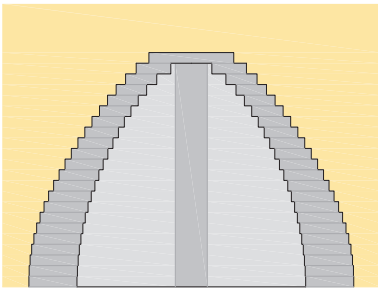
113. Sobre el comportamiento estructural de la cúpula y el principio del anillo de compresión, ver apartado III-3.4.3. La mecánica gravitatoria del espacio estructural.

114. “Un agujero sólo es el lugar de una materia más sutil”. DELEUZE, Gilles: El pliegue. Leibniz y el barroco. Barcelona: Paidós, 1898. Citado en SORIANO, Federico: Sin-Tesis. Barcelona: Gustavo Gili, 2004, pp. 63-93

115. Se juega aquí con el doble sentido de la palabra “clave”, que designa al mismo tiempo la dovela central del arco de descarga y su importancia básica, fundamental, en la configuración de la estructura del espacio del Pantheon.



F.74. Soporte simbólico central de la tumba etrusca de Casale Marítimo. ESCRIG, Félix: *Las Grandes estructuras de los edificios históricos: desde la antigüedad hasta el gótico*. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 1997, p. 35



F.75 El primigenio soporte central de la falsa bóveda se convierte en una columna de luz, y la dovela del arco de descarga en un óculo abierto a la luz en la cúpula del Pantheon. Dibujos del autor.

el ingreso de algunos rayos de Sol a través del óculo. La ausencia de materia grave en el cenit de la cúpula libera el espacio y da paso a una luz que, desde lo alto, se encarga de iluminar y configurar, por sí sola, el enorme espacio interior del Pantheon. La luminosa presencia del óculo en la cúpula romana parece constituirse así como la culminación de un largo proceso de refinamiento constructivo a lo largo del tiempo que, finalmente, acaba por liberar de los efectos de la gravedad a la parte superior de las formas de cubrición espacial precedentes, desmaterializando la estructura hasta sustituirla finalmente por la presencia de la luz.

En efecto, el monolítico soporte vertical sobre el que visualmente descansaba la *falsa cúpula* con que se cubrían las arcaicas tumbas etruscas ¹¹¹, es sustituido en el Pantheon por una ingrávida columna de luz ¹¹². Además, el óculo luminoso pone en evidencia la ausencia de la dovela central del tradicional arco de descarga, una pieza estructuralmente innecesaria en la cúpula gracias a la aplicación del principio del anillo de compresión ¹¹³. Se descubre, entonces, que algunos de los elementos estructurales sobre los que se fundamentaba el funcionamiento gravitatorio de las antiguas formas de cubrición espacial, acaban siendo reemplazados en la estructura romana por la presencia de la luz. La materia grave se sustrae en favor de un vacío estructural atravesado por un haz de luz, que se constituye en el fuste de una imaginaria columna inmaterial cuyo etéreo capitel parece ser el óculo de la cúpula ¹¹⁴. Puede afirmarse pues, con pleno sentido estructural, que en el Pantheon *la luz es la clave* ¹¹⁵.

El cilindro de luz proyectada por el óculo, de sección aproximadamente circular según la posición del haz luminoso en relación con el grueso canto de la estructura, tiene algo menos de nueve metro de diámetro y algo más de cuarenta y tres metros de altura. Reflejando el constante movimiento relativo entre la Tierra y el Sol, su directriz se desplaza por el interior del espacio con una inclinación que oscila entre la práctica horizontal y los 71° con respecto al plano del suelo, impidiendo la latitud de Roma una verticalidad mayor. Sin embargo, en su constante desplazamiento espacial, el haz de luz solamente se proyecta totalmente sobre

el suelo cuando su inclinación supera los 68° con respecto a la horizontal, cosa que ocurre únicamente durante la parte central de los días de verano ¹¹⁶. Es en ese preciso momento cuando, pese a su inevitable inclinación, la columna de luz se convierte en el único elemento capaz de manifestar su verticalidad sin ser interrumpido por ningún elemento, en contra de lo sucede con el descenso de las cargas gravitatorias, cuya intrínseca verticalidad es visualmente interrumpida en repetidas ocasiones por la horizontalidad de los entablamentos que rematan los dos estratos en que se constituye el muro ¹¹⁷.

La práctica ausencia de paramentos en los que la luz puede reflejarse durante su trayecto hacia el interior del espacio una vez atravesado el óculo provoca un fuerte contraste entre la sólida luz directa y la suave penumbra en que queda sumido el espacio interior. Bajo determinadas condiciones atmosféricas, esta circunstancia hace posible la visión del brillo emitido por las partículas de polvo que flotan en el espacio al ser directamente iluminadas por el potente haz de luz. En ese preciso momento, la luz se manifiesta ante el espectador como un fenómeno físico que, lejos de ser etéreo e impalpable, parece poseer plena entidad corpórea y material, produciéndose la falsa ilusión de poder percibir la luz misma, un fenómeno físico que pese a ser el responsable de la visión no es directamente visible si no es previamente reflejado por alguna superficie ¹¹⁸. El brillo de estas partículas parece evocar entonces la natural ambigüedad de la luz, una cuestión presente ya en las teorías físicas de la Grecia clásica heredadas por los romanos y que, pese a la inestimable aportación de Einstein, aún hoy sigue viva. El efecto óptico provocado por la presencia de estas partículas iluminadas induce a identificarlas, erróneamente, como erráticos corpúsculos de luz o ingravidas partículas de éter, las mínimas partes indivisibles en que, con un sinfín de matices y ambigüedades, se han basado todas las teorías físicas desde la Grecia antigua hasta hoy ¹¹⁹.

Sin duda alguna, la evidencia visual del haz ocular despierta también en el espectador la conciencia de la noción elemental del rayo de luz, un concepto físico-geométrico ambiguo ya desde la

116. *A partir de los 60° el haz de luz empieza a abandonar el muro para proyectarse sobre el suelo. A partir de los 64° de inclinación la superficie de luz apoyada sobre el suelo empieza a superar a la proyectada en el muro. La proyección total del haz de luz sobre el pavimento sólo se produce entre los 68° y los 71°.*

117. "Hemos de recordar lo que sucede en el Panteón, donde (...) las líneas horizontales van rompiendo la composición vertical, interrumpiendo la directa conexión de ésta hacia el infinito superior, el cielo se hace inalcanzable debido a que la vertical se interrumpe sucesivamente, distanciándonos aún más de lo superior. Tan sólo la luz proveniente del óculo no es interrumpida, es continua, y esto ocurre en algunos días señalados del año, permitiendo observar una voluntad celestial de aproximación a nuestro plano, sin que dependa de nuestro esfuerzo el conseguir o alterar dicho efecto".
MONTERO FERNÁNDEZ, Francisco Javier: El Panteón: imagen, tiempo y espacio: proyecto y patrimonio. Sevilla: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2004, pp. 121-122. *Sobre la interrupción horizontal del descenso de las cargas gravitatorias, ver el apartado III-3.4.4. La tectónica aparente de la estructura.*

118. "Esta situación hace que la luz apenas encuentre obstáculos en su camino, de modo que no puede reflejarse y tan sólo deslumbra. El espacio mantiene un nivel de penumbra que contrasta con el potente haz de luz que se precipita desde arriba. Con frecuencia se puede apreciar un efecto sorprendente, la luz ilumina pero también emite brillo desde las partículas que encuentra en el aire", Salvador Pérez Arroyo. Citado en DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 274. Original en PÉREZ ARROYO, Salvador: Notas sobre el espacio y lo contemporáneo. Madrid: COAM, 1988-89, nº 275-276, p. 47

"Cuando la luz ilumina las partículas en suspensión en el aire se produce esa "presencia física" de la luz. Podemos tocarla y atravesarla".
ARNUNCIANO PASTOR, Juan Carlos: Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 139

119. *La ambigüedad material y corpuscular de la luz ha sido ampliamente tratada en el análisis individual de las ideas sobre la luz de cada uno de los físicos estudiados en la segunda parte de presente la tesis doctoral. La cuestión se trata también, resumidamente, en el apartado II-5.2. Sobre las sucesivas teorías en torno a la luz.*



F.76. Haz de luz solar procedente del óculo de la cúpula del Pantheon.

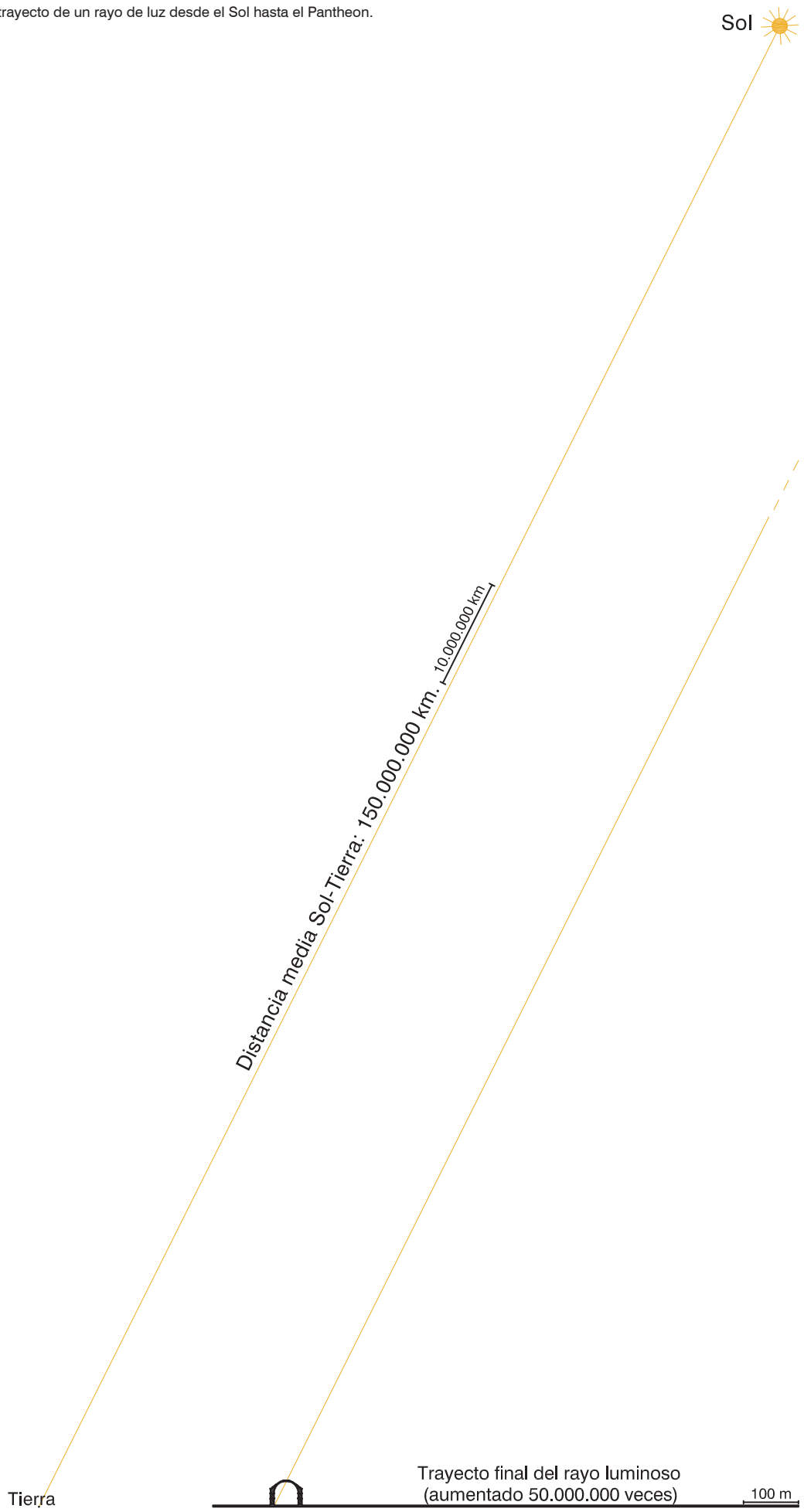
antigüedad al ser concebido por unos como una entidad física plena y considerado por otros como un útil constructo conceptual¹²⁰. Sin embargo, a pesar de la ambigüedad de su naturaleza, no cabe duda de que la experiencia cotidiana de los fenómenos relacionados con la luz se ha asociado siempre a la existencia real del rayo luminoso. Pese a ser considerado como una entidad omnipresente allí donde la luz se manifiesta, el rayo lumínico sólo se hace visible como tal cuando se da un fuerte contraste lumínico entre la luz y la sombra. Para ello es indispensable la existencia de una cierta penumbra u oscuridad causada por la presencia de un espeso cielo nublado, una densa masa vegetal arbórea, la presencia de una roca... o, también, la existencia una superficie opaca artificialmente construida. La presencia del rayo de luz en el espacio va ligada entonces a la propia manifestación de la luz, un fenómeno que por ser únicamente posible en espacios lumínicamente asimilables a un interior, ha sido objeto y objetivo de los más ambiciosos espacios interiores construidos a lo largo de la historia. Y es en este sentido que el Pantheon de Adriano se constituye a la vez en paradigma y modelo de la voluntad de manifestar la luz en el interior del espacio construido.

La presencia visual del haz de luz pone también de manifiesto una de las cualidades físicas más elementales de la luz, su propagación rectilínea, una propiedad que desde que fuera demostrada por Teón de Alejandría, toda teoría física ha tenido que poder explicar satisfactoriamente. La natural rectitud de la luz se enfatiza en el Pantheon por contraste con la intrínseca curvatura de la gravedad, al concebir la obra como una estructura gravitatoria curva atravesada por un rayo solar recto. Es así como un mismo espacio arquitectónico es capaz de expresar la distinta naturaleza geométrica de la luz y la gravedad.

Así pues, el Pantheon de Roma se configura como un enorme espacio interior donde la luz se manifiesta arquitectónicamente a través de un gran haz cenital, cuya presencia evidencia las propiedades físicas más elementales de la luz, como son su transmisión rectilínea y su ambigüedad corpóreo-material.

120. Esta cuestión se desarrolla de manera pormenorizada a lo largo de toda la segunda parte de la presente tesis doctoral, II-La gravedad y la luz como fenómenos físicos, al exponer las ideas sobre la luz de cada uno de los físicos estudiados. Para un resumen de las distintas concepciones físicas de la luz, ver apartado II-5.2. Sobre las sucesivas teorías en torno a la luz.

F.77. Representación del trayecto de un rayo de luz desde el Sol hasta el Pantheon.



III.3.5.2. La ingravidez de la luz reflejada

“Toda la tensión está puesta al servicio de lo que ocurre en su interior, concebido para contemplar el sol indirectamente a través del reflejo de los rayos de luz en las superficies de la cúpula, de las paredes y del pavimento.”¹²¹

Eduardo De Miguel

A pesar de que la enorme velocidad de la luz, de cerca de unos 300.000 m/s, permite que el desplazamiento se produzca en un breve periodo de tiempo correspondiente a algo más de ocho minutos, la distancia media recorrida por el rayo luminoso desde el Sol hasta la Tierra es de unos 150 millones de kilómetros. Este vasto trayecto se produce sin que ningún tipo de obstáculo interfiera el rayo de luz hasta que, finalmente, el objeto arquitectónico acaba por interponerse en su camino. Así pues, a pesar de la enorme distancia recorrida, la arquitectura únicamente se interesa por el infinitésimo tramo final del rayo de luz, interfiriendo su camino por medio de la materia que la conforma: *“La arquitectura tiene el privilegio y la responsabilidad de acompañar a la luz en su último trayecto, le ayuda a morir dignamente”¹²².*

El Pantheon se configura como una obra donde el final de este trayecto, justo en el momento en que atraviesa el óculo de la cúpula, adquiere unas cualidades arquitectónicas excepcionales. La mayoría de los rayos que inciden sobre él se ven impedidos por la opaca masa estructural de la cúpula y los muros. Únicamente una pequeña porción de la luz del Sol consigue atravesar el óculo, prolongando su viaje unos metros más a través del espacio interior del templo. Finalmente, la superficie que delimita el interior del templo se interpone en el trayecto del rayo luminoso, que encuentra así el primer obstáculo en su viaje desde el Sol. A pesar de ceder parte de su energía luminosa al paramento opaco que le obstruye el paso, la luz no agota aquí su travesía y se refleja nuevamente hacia el espacio. Aunque desde un punto de vista físico este momento no tiene ninguna trascendencia, desde un punto de vista arquitectónico es un momento muy especial.

121. DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 118

122. DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 321

123. "El antiguo Pantheon de Roma es un magnífico ejemplo de la eficiencia en la iluminación de un gran espacio interior. La luz entra por una única abertura (el óculo) en la parte superior de la cúpula. El área del óculo representa menos del cuatro por ciento del área del edificio en planta. Ésta es una abertura relativamente pequeña, aunque está orientada para admitir el máximo de luz desde la superficie brillante del cielo. No hay ningún cristal que reduzca la transmisión". MARK, Robert: *Light, wind and architecture: the mystery of the master builders. Cambridge: MIT, 1990, pp. 44-46.*

Recuperando los cálculos efectuados en el apartado III-3.4.3. La mecánica gravitatoria del espacio estructural, sabemos que el volumen interior del Pantheon es de aproximadamente 53.500m³ y que su superficie ronda los 7.400m². El área del óculo, considerando su radio de 4,5m es de unos 63m². Esto significa que la abertura del óculo representa un 1% de la superficie interior del templo ($R=63m^2/7.400m^2=0,01\%$ aprox.), y que por cada metro cuadrado de abertura se iluminan unos 850 metros cúbicos de espacio ($R=53.500m^3/63m^2=850m^3/m^2$ aprox.), lo cual da cuenta de la enorme eficacia lumínica de ese espacio interior.

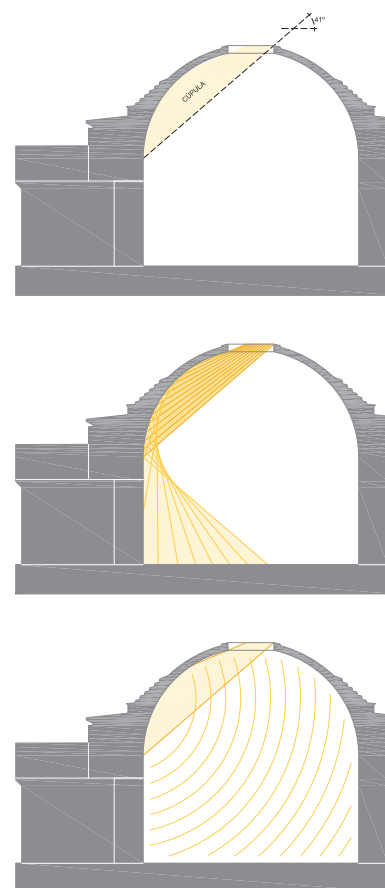
124. "La presencia de esta energía sobre los paramentos puede generar una nueva luz que varía de intensidad según las características de los materiales que definen el espacio interior: mates o brillantes, lisos o rugosos, coloreados o no. (...) Esta luz incidente no desaparece, reflexiona constantemente y cada color retiene parte de la luz existente (...). En definitiva, el control de esta nueva luz atribuible exclusivamente al receptor, una luz a partir de, que depende de la elaboración consciente de los límites en los que se refleja, de la materia elegida, de su forma, de su textura y de su color, nos permite alterar de nuevo la luz ya transformada y contribuir a la cualificación definitiva del espacio". DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, pp. 310-311.*

El rayo luminoso que, previamente seleccionado, atraviesa el óculo para ser acogido en el espacio interior del Pantheon, adquiere un pleno carácter arquitectónico aún sin haber sufrido modificación física alguna. Se produce así el primer momento en el discurrir arquitectónico de la luz, basado no tanto en su manipulación como en su selección. Sin embargo, cuando el rayo impacta en el interior de la superficie construida, sí se produce una cierta modificación de las características físicas de la luz, no tanto por lo que se refiere a su naturaleza, sino por cuanto sufre una merma en su intensidad y una modificación en su dirección. Así pues, en este segundo momento, la luz no se selecciona, sino que se manipula conscientemente por medio de un control preciso de las características físicas de la superficie donde se refleja la luz.

Esta nueva luz reflejada, indirecta, posee unas cualidades arquitectónicas muy distintas de las de la luz que fluye desde el óculo. Así, mientras que la luz ocular es una luz que aspira a manifestarse a sí misma y que poco contribuye a la conformación del espacio interior, la luz reflejada renuncia a su propia manifestación a favor de la configuración del espacio mediante la revelación de la forma, la textura y el color de las superficies que conforman sus límites. Es así, por medio de los reflejos provocados por las superficies interiores, como se consigue iluminar el enorme espacio interior del Pantheon con una aportación de luz exterior tan pequeña ¹²³. Si por alguna circunstancia -difícilmente imaginable- la luz ocular pudiera atravesar el interior Pantheon sin reflejarse en ninguna superficie, sus límites quedarían sumidos en una profunda sombra y no serían visualmente perceptibles, de modo que el espacio interior construido perdería toda cualidad arquitectónica ¹²⁴.

Según la cambiante orientación en planta e inclinación en sección del haz de luz solar a lo largo del día y del año ¹²⁵ la luz se proyecta sobre un paramento interior u otro, hecho que determina completamente la dirección y la cualidad del rayo luminoso reflejado, provocando la aparición de efectos lumínicos de muy variado carácter.

La situación lumínica más corriente en el interior del Pantheon se da cuando la inclinación del rayo solar es menor de 45° con respecto a la horizontal, momento en que la luz ocular se proyecta sobre la parte norte del intradós de la cúpula. La escasa inclinación de los rayos solares durante el invierno provoca que, a lo largo del día, el haz de luz se proyecte únicamente sobre la parte superior del paramento interior de la cúpula, correspondiente a las dos hileras superiores de casetones y la parte central lisa. Durante la primavera y el otoño la inclinación máxima de los rayos no supera los 48° , de modo que, salvo alguna tímida incursión por la parte superior del muro durante la parte central del día durante los equinoccios, el haz de luz también se proyecta únicamente en el intradós de la cúpula. No obstante, al aumentar la inclinación, aumenta también el recorrido del haz por la cúpula, barriendo una superficie mucho mayor que va desde su base hasta el cenit. La mayor inclinación de los rayos en verano permite que el haz de luz abandone la cúpula durante la parte central del día, de modo que sólo se proyecta en su intradós durante las primeras horas de la mañana y a última hora de la tarde.



F.78. Diagramas de la incidencia de la luz en el intradós de la cúpula del Pantheon. Dibujos del autor.

La curvatura de la cúpula hace posible que el rayo reflejado adquiera una componente vertical en su dirección y se precipite con más o menos inclinación hacia abajo. Se da la paradoja de que, por efecto de la curvatura y siguiendo la ley de la reflexión –según la cual el ángulo de incidencia es el mismo que el ángulo de reflexión–, los rayos cuya dirección se acerca más a la horizontal adquieren con el reflejo una componente vertical mucho más marcada que los rayos inicialmente más inclinados, cuya componente vertical poco varía al incidir sobre la superficie prácticamente vertical de la base de la cúpula. El intradós de la cúpula actúa así como un primer y principal difusor de la luz ocular que incide directamente en él, hecho que permite iluminar suavemente, tras sucesivas reflexiones, las superficies que delimitan el espacio interior del templo.

Sin embargo, la mayor parte de la superficie interior de la cubierta no es lisa sino que está finamente moldeada. En efecto, tal como se ha expuesto anteriormente, existen cinco filas de veintiocho casetones en la mitad inferior de la cúpula. Su refinado diseño geométrico permite

125. Tal como se ha comentado con anterioridad, Eduardo De Miguel desarrolla en el segundo volumen de su tesis un preciso y amplio estudio gráfico del movimiento del disco de luz ocular proyectados sobre las superficies interiores del Pantheon. Ver DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo II.



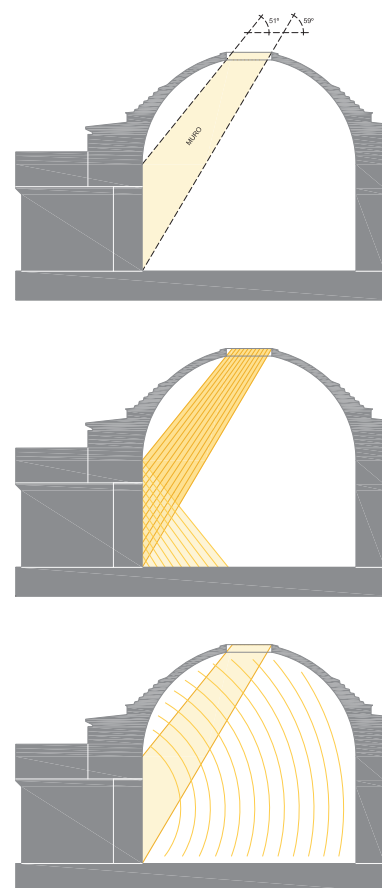
F.79. Proyección de la luz ocular sobre el intradós del óculo. Puede observarse la delicada configuración de luces y sombras del artesanado. Fotografía del autor.

percibir el retranqueo de sus distintos planos mediante la sucesión de sombras y luces propias y arrojadas, hecho que además de desmultiplicar la dirección de los rayos reflejados a fin de aumentar la dispersión de la luz por todo el espacio, aumenta de manera decisiva la sensación de profundidad y aligera visualmente la masa de la cúpula ¹²⁶.

Todos estos efectos tuvieron que verse multiplicados en la antigüedad a causa del revestimiento dorado con que parece ser se adornó el intradós de la cúpula. Sin duda alguna, la neutralidad lumínica y la apariencia estructural del revoco actual poco tiene que ver con la luminosidad que tuvo que tener el antiguo revestimiento metálico, que al cubrir y adornar toda la estructura con sus destellos y sus brillos tuvo que contribuir, de manera decisiva, a aligerar visualmente la pesada masa de la cubierta.

Desde abril hasta agosto la mayor inclinación de los rayos solares permite que el haz de luz ocular se proyecte en determinadas horas sobre las superficies del muro interior del Pantheon. La verticalidad de los paramentos de cierre estructural hace que los rayos en ellos reflejados conserven su componente vertical hasta impactar en el suelo, variando únicamente el sentido de su progresión en planta. El discurrir del haz luminoso sobre los ornamentos de los paramentos verticales no hace más que enfatizar su color, volumen y relieve. El momento más especial se produce cuando el rayo de luz impacta directamente sobre las columnas exentas de las capillas, momento en el que el color claro del elemento de soporte se ilumina destacando sobre el fondo oscuro en el que queda sumido el interior de la capilla. La columna adquiere entonces plena autonomía y gana en claridad, tanto tectónica como lumínica, con respecto a los elementos que la rodean.

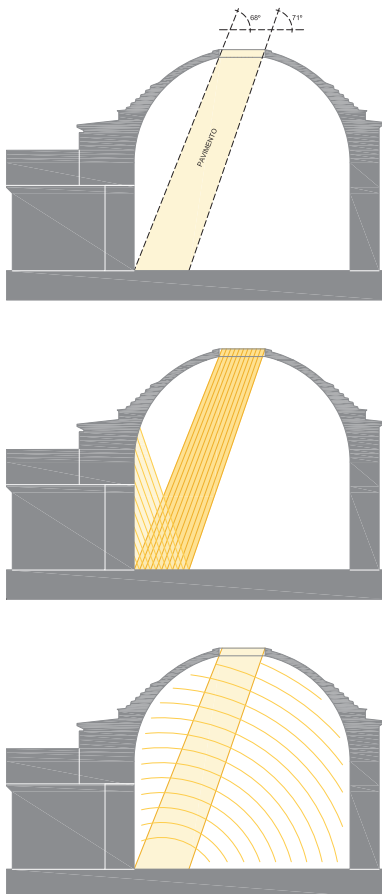
Solamente durante las horas centrales de los días de verano los rayos solares tienen una inclinación lo suficientemente vertical como para proyectarse totalmente en el pavimento del templo. Esta es la situación lumínica menos habitual en el tiempo y más acotada en el espacio, pues se produce sólo en determinadas horas de algunos días de verano y se restringe sólo al cuadrante norte del pavimento del templo. Sin embargo, es también la que produce los efectos arquitectónicos más sorprendentes.



F.80. Diagramas de la incidencia de la luz en el muro interior del Pantheon. Dibujos del autor.



F.81. Fotografía de la proyección del haz ocular de luz sobre el muro. Fotografía de Felipe Rodríguez.



F.82. Diagramas de la incidencia de la luz en el pavimento del Pantheon. Dibujos del autor.

126. "Sométidos a la luz directa proveniente del óculo, el plano inclinado del derrame del casetón es la superficie más próxima a la perpendicularidad con el sol y, por consiguiente, el plano más iluminado; en la parte superior, la sombra arrojada sobre los planos rehundidos reproduce la inclinación del derrame. Este efecto, geoméricamente simétrico y lumínicamente inverso, aumenta poderosamente la sensación de profundidad".
 DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: La Luz en la configuración del espacio, *Tesis doctoral*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, pp. 150-151

Los rayos solares se reflejan sobre el pavimento horizontal invirtiendo la componente vertical de su trayectoria. Se ven así impelidos hacia arriba, desafiando a las leyes de la gravedad ¹²⁷. En efecto, desde la Grecia clásica hasta el siglo XVII, la luz es concebida siempre como una realidad material absolutamente liviana, no sometida a las leyes de la gravedad. Es así como en el sistema aristotélico, imperante desde la antigüedad hasta el Renacimiento, la luz se imagina como formada por éter, el elemento liviano por excelencia. Sin embargo, en su estudio sobre la luz de principios del siglo XVII, Johannes Kepler se pregunta si la luz pesa o no. Aunque acaba por inclinarse por la ausencia total de peso, la mera formulación de la pregunta pone de relieve la necesidad de reflexionar sobre esta cuestión y, durante el siglo siguiente, los más eminentes científicos formulan una y otra vez la misma cuestión con idéntica respuesta.

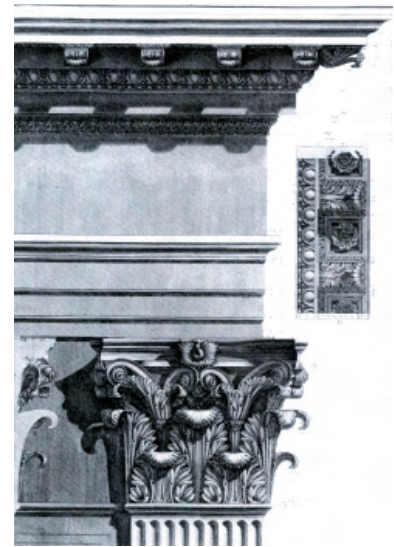
Finalmente Isaac Newton concibe la idea de que los más elementales fenómenos de la luz, como la reflexión o la difracción, se producen por el efecto de ciertas atracciones y repulsiones etéreas que provoca la materia sobre los corpúsculos de luz. Aunque Newton no vincula estas atracciones a la gravedad, sus seguidores sí lo hacen. A finales del siglo XVII Michell y Laplace proponen abiertamente la posibilidad de que la luz se vea sometida a los efectos de la gravedad cuando se encuentra bajo la influencia de enormes masas, hecho que demuestra finalmente Albert Einstein en su teoría de la relatividad general. Pese a ello, se sigue asociando aún la luz a la livianidad absoluta, la flotación, la ausencia de gravedad e, incluso, una cierta idea de ascensión ingrávica. La aparente contradicción entre la inherente ingravidez de la luz y su supuesta materialidad o corporeidad se resolvió durante siglos concibiendo la luz como una extraña y excepcional materia, corpuscular a la vez que ingrávica. El Pantheon da cuenta también de esta ambigüedad física al contraponer la materialidad de la luz sugerida por haz solar del óculo y la ingrávica dirección ascendente de esa misma luz una vez reflejada en el plano horizontal.

El reflejo ascendente provoca una inversión en la relación entre las luces y las sombras en los objetos directamente iluminados por esta nueva luz. De manera natural, el carácter cenital de la luz solar induce a la aparición de sombras en las partes inferiores de los objetos, donde el rayo no puede llegar, aunque una iluminación rasante -como la del amanecer o el atardecer- puede causar también la aparición de sombras laterales en los objetos iluminados. Sin embargo, es muy extraño que por causa natural las sombras se sitúen por encima de la luz, pues para ello es necesario invertir y reflejar su habitual dirección descendente.

En apartados anteriores ¹²⁸ se han analizado los mecanismos tectónicos empleados en el interior del Pantheon a fin de modificar la aparente capacidad portante de la estructura arquivada adosada al muro y aligerar el peso visual de la cúpula. Sin embargo, bajo los efectos de esta luz ascendente estos efectos gravitatorios se multiplican en favor de una pretendida ingravidez.

En efecto, cuando las columnas del primer estrato del muro reciben esta luz ascendente en sus partes más elaboradas, como el capitel, se produce un complejo juego de sombras invertidas que induce a sentir que, de repente, la gravedad de los elementos portantes desaparece, su peso propio se desvanece y su capacidad de encauzar carga alguna se disipa. Aunque en distinta proporción, el efecto se magnifica en los arquivados que coronan ambos estratos del muro, pues las superficies inclinadas de las cornisas se ven directamente iluminadas por la luz ascendente, hecho que provoca un gran contraste entre la blanca línea horizontal de la estructura y la oscura franja del pórfido. Esta exaltación de la horizontal por efecto de la luz acaba por interrumpir, definitivamente, el ya de por sí impedido descenso visual de las cargas, hecho que induce a que los elementos de soporte pierdan toda posible capacidad portante aparente ¹²⁹.

Por otra parte, la cúpula revela su función portante y su grosor estructural por medio de lo que, aparentemente, debería servir



F.83. Detalle del capitel y el entablamento de la pilastra de la exedra, correspondiente al primer estrato del muro, por Francesco Piranesi. WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008, p. 274.

127. "La luz procedente del óculo tiene una poderosa componente vertical, y al no existir ninguna otra fuente de luz que la contrarreste, las sombras que se crean sobre la gramática arquitectónica, al estar sometidas a la acción directa de los rayos del sol, adquieren una grave presencia. La otra luz, la procedente de la reflexión con las superficies, las suaviza, pero no es capaz de contrarrestar estas sombras, excepto cuando el disco solar en su incesante desplazamiento por el espacio cóncavo abandona el paramento vertical y comienza a deslizarse por el pulido pavimento. Como si de un espejo se tratara, un nuevo foco emisor surge ante nuestros ojos. En ese instante, todo el espacio se torna ingravido, desafiante ante las leyes físicas que rigen el universo, las sombras cambian bruscamente el sentido y son impelidas con fuerza oponiéndose a la acción de la gravedad". DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 143

"La luz es un material muy especial en el trabajo arquitectónico. Es el único que no está sometido a la fuerza de la gravedad". VALERO RAMOS, Elisa: *La Materia intangible: reflexiones sobre la luz en el proyecto de arquitectura*. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004, p. 47

128. Ver apartado III-3.4.4. La tectónica aparente de la estructura



F.84. Configuración de luces y sombras de una pilastra y una columna del interior del Pantheon bajo el efecto de la incidencia directa de la luz del óculo de la cúpula.

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral.

Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 273.



F.85. Configuración de luces y sombras de una pilastra y una columna del interior del Pantheon bajo el efecto de la luz reflejada en el pavimento.

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral.

Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 277.

para aligerarla: el artesonado. La profundidad que expresa la refinada geometría de los casetones muestra su gran grosor y, por tanto, su pesantez. Sin embargo, su original revestimiento de bronce debió contribuir, por medio de sus brillos y reflejos, a menguar el peso aparente de la cubierta, dotándola así de una cierta ambigüedad gravitatoria que la aligera visualmente.

Finalmente, la inversión de las luces y las sombras contribuye de manera decisiva a la ocultación del apoyo de la cúpula sobre los muros, ya de por sí escondido por la geometría saliente de la cornisa del estrato superior del muro. El ojo percibe una sombra arrojada en dirección ascendente donde debería encontrar un potente apoyo estructural, de modo que la cúpula parece descansar por completo sobre la sombra, hecho que sin duda contribuye a enfatizar su levedad.

Así pues, la dirección ascendente de la luz contribuye de manera decisiva a menguar la supuesta capacidad portante de los elementos de soporte, restar pesantez visual a la cúpula y ocultar el verdadero apoyo de la cubrición, factores que en conjunto transmiten una cierta sensación de ingravidez ¹³⁰. Es imposible averiguar si estos efectos fueron conscientemente proyectados antes de la construcción del Pantheon o si, por el contrario, fueron un regalo inesperado de la luz una vez concluida la obra. En cualquier caso, así suceden, y su preciso análisis debe servir para la manipulación consciente de la luz en la creación de nuevas arquitecturas.

La arquitectónica sensación de ingravidez puede explicarse, nuevamente, a partir de la cosmología elaborada por Aristóteles, donde se establece que el mundo se organiza mediante esferas concéntricas correspondientes a cada uno de los elementos naturales, siendo la interior la más grave y la exterior la más ligera. En efecto, el lugar natural de los cuerpos terrosos y pesados se corresponde con el centro del mundo, mientras que el lugar natural de la ligera luz etérea se sitúa en la esfera exterior. Esta particular visión de la relación entre la luz y la



F.86. Fotografía de la proyección del haz ocular de luz en el pavimento. Se puede observar el efecto provocado por las sombras invertidas proyectadas por la luz ascendente. DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 283.

129. "Hemos de recordar lo que sucede en el Panteón, donde la combinación intencionada de un determinado material (por ejemplo el pórtido rojo en los entablamentos), junto a la luz subrayan el efecto buscado, la suspensión ingravida de los elementos superiores sobre los inferiores, de tal manera que los elementos se desarticulan, se liberan y el espacio se hace etéreo, también gracias a la suspensión inmaterial de las masas" MONTERO FERNÁNDEZ, Francisco Javier: *El Panteón: imagen, tiempo y espacio: proyecto y patrimonio*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2004, pp. 121-122.

130. "La búsqueda de la ingravidez se convierte en una constante aspiración estética de la arquitectura. Parece como si el dominio de la forma condujese de manera natural al arquitecto hacia una sublimación del peso que origina una fuerza ascendente capaz de contrarrestar visualmente el efecto gravitatorio. Un ejemplo lo tenemos en las grandes cúpulas de la Antigüedad como la del Panteón de Roma o la de Hagia Sofía en Estambul. El enorme esfuerzo constructivo que implica la erección de esas cúpulas se disimula y se compensa por medio de recursos arquitectónicos ligados al empleo de la luz, la textura y la geometría". ARNUNCIANO PASTOR, Juan Carlos: *Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 10

gravedad, el arriba y el abajo, conlleva la asimilación de que los cuerpos graves tienden a establecerse forzosamente en las partes inferiores del espacio, mientras que la luz tiende a ocupar los estratos superiores¹³¹. Es por ello que cuando por algún motivo la luz, materia aparentemente ligera e ingrávida, queda atrapada debajo de un elemento supuestamente grave y pesado, se produce una transfiguración total de la relación natural entre la luz y la gravedad.

Esta antinatural inversión lumínico-gravitatoria puede tener dos lecturas. La más habitual, de raíz aristotélica, es la que considera que la luz no sólo mantiene su condición ingrávida, sino que la comparte con el elemento situado en la parte superior, que pierde entonces toda su gravidez. Al ser ambas realidades absolutamente ligeras, su posición relativa acaba por ser, entonces, una cuestión meramente circunstancial. Esta interpretación evoca una ligereza absoluta, una ausencia total de gravedad en el elemento iluminado que parece flotar en el espacio.

Pero existe otra posible interpretación, fundamentada en la noción de *gravedad específica* ideada siglos más tarde por Galilei¹³². Basándose en el concepto de *peso específico* introducido por Arquímedes en su tratado de hidrostática, Galilei explica el movimiento natural de los cuerpos según la relación entre la gravedad del cuerpo y la del medio: cuando el cuerpo tiene una gravedad específica mayor que la del medio tiende a moverse hacia abajo; cuando su gravedad específica es menor que la del medio tiende a moverse hacia arriba. De ello se deduce que cuando ambas son iguales, el cuerpo queda suspendido en el medio, como flotando, en reposo. Galilei sustituye con esto la vieja distinción aristotélica de *grave/ligero* por la de *más grave/menos grave que el medio*, hecho que supone un enorme avance conceptual en tanto que todo cuerpo, con independencia de su composición material, es considerado como “grave”. De acuerdo con esta idea, es posible considerar la luz como una realidad que, aunque enormemente liviana,

131. Sobre la cosmología aristotélica, ver apartado II-2.1.1. La *gravedad* como tendencia natural de los cuerpos pesados.

132. Ver apartado II-3.1.1. El principio del fin de la gravedad aristotélica.

posee cierta gravedad. El hecho de que por encima de la ella pueda permanecer en reposo algún cuerpo induce a considerar, entonces, que la luz no sólo pesa, sino que pesa igual o más que el cuerpo situado sobre ella. Aunque la sensación de ingravidez y flotación descrita en ambas interpretaciones es la misma, esta segunda otorga al elemento suspendido sobre la luz una gran ligereza sin negar la existencia de una cierta gravedad que, por pequeña que sea, sigue actuando sobre el cuerpo en suspensión.

En efecto, la ingravidez o no del fenómeno de la flotación ha sido siempre una cuestión relevante en las grandes teorías físicas sobre la naturaleza de la gravedad. Para Newton, la flotación y la gravedad fueron cuestiones íntimamente relacionadas, pues según su concepción física un cuerpo sólo puede flotar en el espacio bien si sobre él no actúa ninguna fuerza gravitatoria, o si la resultante de las que actúan es cero. Partiendo de esta consideración, cabe plantear que la flotación de los cuerpos en el espacio extraterrestre se debe a la ausencia de gravedad en ese espacio, una idea que entra en contradicción con la explicación newtoniana del movimiento planetario, basada precisamente en la atracción gravitatoria que ejerce el Sol sobre los planetas a través de ese mismo espacio que acabamos de considerar ingrávico. En el fondo de este equívoco subyace la antigua distinción entre la gravedad solar y la gravedad terrestre, que Newton intentó unificar a través de su ley de gravitación universal. En base a esta distinción pre-newtoniana, la flotación puede ser considerada entonces como ausencia de *gravedad terrestre*, o lo que es lo mismo, ausencia de *peso*.

Para Einstein, en cambio, el concepto de flotación difiere de la idea newtoniana, pues no depende de la gravedad. Einstein afirma que todo cuerpo tiende a la flotación libre en el espacio-tiempo, tanto en zonas libres de toda gravedad, como en zonas sometidas a la acción de un campo gravitatorio. La contraposición antes apuntada entre la idea de peso y la noción de flotación se conserva en la teoría einsteiniana, aunque con un

carácter muy distinto, pues Einstein no considera el peso como una cualidad física de origen gravitacional, sino que considera que su manifestación se debe a la física del estado sólido y a la elasticidad de la materia. Paradójicamente, para Einstein la noción de peso aparece, precisamente, cuando le es negado a un cuerpo terrestre su tendencia a la flotación libre, tal como ocurre cuando un proyectil cae al suelo o cuando se sostiene una piedra en la mano ¹³³.

Así pues, en las concepciones físicas sobre la gravedad de Newton y Einstein se invierte la relación entre la gravitación, el peso y la flotación. Para Newton la flotación se da en ausencia de peso, mientras que para Einstein el peso se da en ausencia de flotación. Es por ello que la aparente sensación de flotación de un elemento arquitectónico no debe asociarse, ineludiblemente, a la ingravidez absoluta o de ligereza extrema. Esta es una experiencia arquitectónica muy personal que, en base a las distintas concepciones científicas sobre la relación física entre la luz y la gravedad que se han sucedido a lo largo del tiempo, puede ser interpretada por cada uno de manera distinta.

Sobre la sensación de ingravidez provocada por determinados efectos lumínicos en el interior del Pantheon se ha escrito en muchas ocasiones con tanta razón como poética. Las palabras han contribuido a aumentar y exaltar una sensación arquitectónica que, aunque es cierto que llega a producirse, no lo hace con la potencia y la cotidianeidad que cabría esperar tras la lectura de algunos textos. En efecto, tal como se ha apuntado anteriormente, el reflejo ascendente de la luz en el pavimento es una situación lumínica que sólo se da a ciertas horas de determinados días de verano y, además, la latitud de Roma provoca que el rayo solar incida con una inclinación tal que las sombras invertidas solamente pueden ser claramente percibir en el cuadrante norte de la planta circular. La sensación de ingravidez queda así acotada a un intervalo espacio-temporal muy reducido, hecho que sin duda ha debido contribuir a aumentar el carácter excepcional de estos efectos lumínico-gravitatorios.

¹³³. Ver apartado II-4.2.1.2. La flotación libre de la materia en el espacio-tiempo curvo.

III.3.6. EL ENCAUZAMIENTO DE LA GRAVEDAD Y LA INTERIORIZACIÓN DE LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO INTERIOR

El Pantheon de Adriano es una obra maestra donde confluyen de manera única toda una serie de cuestiones relacionadas con el espacio, la estructura, la gravedad y la luz, que marcaron el rumbo de la historia de la arquitectura durante prácticamente los dos milenios posteriores.

Durante la época romana se producen dos percataciones científicas en torno a la gravedad de una gran importancia y trascendencia, no sólo para la posterior investigación física de su naturaleza, sino también para su comprensión arquitectónica. En efecto, es en Roma donde, por primera vez, se tiene conciencia de la noción de “gravedad” como una cualidad física omnipresente que no se agota, únicamente, en los fenómenos concretos del peso y la caída libre. La ampliación del rango de fenómenos naturales de posible origen gravitatorio -como por ejemplo el movimiento de los planetas- que se deriva de tal constatación, permite introducir en la comprensión científica de esta fuerza física una nueva cualidad, la curvatura. Este descubrimiento intuitivo es, sin duda, la gran contribución de Roma al conocimiento físico de la gravedad.

En conjunción con una tecnología constructiva altamente desarrollada, la intuición de la inherente curvatura física de la gravedad induce al abandono de la resistente estructura arquiteada en favor de una portante estructura abovedada. El paso del dintel arquiteado al arco de descarga, con sus estadios intermedios, supone un cambio fundamental en la manera de percibir el papel de los fenómenos gravitatorios del peso y la caída libre sobre la estructura pues, mientras éstos son considerados la principal amenaza de la estructura adintelada, en la estructura curva se constituyen en su garantía de estabilidad. La dicotomía presente en la estructura arquiteada entre la natural dirección vertical de la gravedad y su opuesta la horizontal, desaparece en la forma estructural curva, donde el paso de una dirección a la otra

se produce de manera gradual y progresiva a lo largo de todo el elemento. La gravedad pasa de ser un fenómeno que provoca la aparición de peligrosos esfuerzos a flexión en los elementos de cubrición, a ser un fenómeno cuyos esfuerzos de compresión sobre la materia hay que encauzar adecuadamente para construir la arquitectura. De la inútil oposición y resistencia contra la gravedad que caracteriza a las primeras soluciones estructurales, se pasa a la comprensión del necesario encauzamiento de las cargas gravitatorias en las estructuras portantes. Ya no se trata de resistir a la gravedad, sino de portarla. La sabia combinación de materia grave y vacío estructural permite construir una sólida estructura espacial en la que el descenso de las cargas se produce a través de elementos de cubrición curvos o soportes verticales. La progresiva gradación de la materia según su peso y la gradual esbeltez de la estructura son síntomas del reconocimiento de la naturaleza telúrica de la gravedad. Aunque con variaciones técnicas y estilísticas propias de cada época, todas estas cuestiones están presentes en el uso de las formas curvas de cubrición estructural, que a partir de la época romana devienen en una constante en la construcción de la arquitectura.

Los romanos reconocen la necesidad de dotar de expresividad tectónica a la estructura portante. Sin embargo, lejos de limitarse a la mera manifestación de las cualidades de la estructura, advierten las posibilidades arquitectónicas que ofrece la manipulación tectónica de los principales atributos de la estructura, sea ésta real o aparente. Las limitaciones de la técnica quedan superadas por medio de sutiles y precisas operaciones visuales que permiten alterar conscientemente los atributos gravitatorios fundamentales de la estructura arquitectónica, como su peso propio o su capacidad portante. Se descubre, entonces, que el sino de la arquitectura no es otro que lidiar con la gravedad a fin de aprehender sus propiedades físicas fundamentales, no solamente para poderles dar cauce a través de la estructura y hacer posible así la construcción del espacio, sino también para poder transgredirlas convenientemente a fin de subrayar o reducir, a voluntad, la apariencia de los efectos que se manifiestan sobre la materia que conforma el espacio arquitectónico.

Los romanos inauguran una nueva concepción espacial, acorde con su idea física de la gravedad y su tecnología estructural, en la que la luz adquiere un protagonismo indiscutible. La arquitectura pone el acento en la conformación del espacio interior, cuyas cualidades dependen fundamentalmente de la luz que lo configura, deviniendo la construcción de esta luz motivo y fin último del hecho arquitectónico. Se trata, pues, de construir una luz interiorizada y particular, propia y apropiada para cada espacio, físicamente idéntica a la vez que arquitectónicamente distinta de la natural luz solar del exterior. En tanto que ésta no puede ser modificada en origen, es el propio objeto arquitectónico el que debe encargarse de seleccionar y aislar una porción de la infinita luz solar con el fin de introducirla en el interior del espacio, modificando y transformando sus propiedades a fin de cualificarla en una luz arquitectónica.

Para que esta luz pueda manifestarse en el espacio construido es preciso aislarla de la luz exterior y, a tal efecto, resulta imprescindible la construcción previa de una sombra interior. A tal efecto son cuestiones de vital importancia la orientación del edificio y la construcción precisa -en lo cuantitativo y en lo cualitativo- de la sombra a fin de configurar el espacio y de articular espacialmente la luz. En efecto, construir espacio es construir luz, y para manifestar la luz es necesaria la sombra. El espacio interior es, pues, un espacio de luz en la sombra.

En tanto que materialmente opaca y gravitatoriamente ineludible, la estructura se convierte en el primer y más importante elemento configurador de esta sombra, especialmente en aquellos casos en que el mismo material estructural cierra y cubre el espacio. No obstante, la ausencia de materia en algunas de sus partes como resultado de la necesidad de liberar el espacio, permite a la luz penetrar en la sombra construida por la estructura, manifestándose en el espacio que al mismo tiempo contribuye a configurar. Así pues, aunque la estructura gravitatoria se constituye como el principal elemento opositor al paso de la luz, es también la que permite y hace posible su ingreso al interior del espacio. Ahí reside, desde el punto de vista de la luz, su importancia.

A pesar de no realizar ninguna aportación particular al ambiguo conocimiento griego sobre la luz, los romanos revierten en la construcción de la arquitectura algunos de los atributos físicos que se le suponen, como su rectitud y su materialidad, mediante su manifestación física en el interior del espacio. Sin embargo, no se contentan con su empleo a fin de definir y configurar los límites del espacio, sino que descubren también la posibilidad de utilizarla para modificar las cualidades gravitatorias de la estructura. Mediante su reflejo en los paramentos interiores del espacio, la intensidad y la dirección del rayo solar se manipula consciente a fin de subvertir la relación natural entre la sombra y la luz. Así, ascendiendo por el espacio en contra de las leyes de la gravedad, la luz parece demostrar su pretendida ingravidez, cualidad que es capaz de contagiar a los elementos estructurales que conforman el espacio. Se descubre entonces una intensa relación estructural entre la luz y la gravedad que afecta a la percepción de la propia forma de la estructura más allá de sus cualidades espaciales.

La manera de concebir el espacio arquitectónico por medio de la luz, la capacidad espacial atribuida a la estructura gravitatoria y la posibilidad de subvertir la gravedad mediante juegos de luz observables en el Pantheon son cuestiones sobre las que las arquitecturas posteriores han intentado ahondar. El Pantheon reúne de manera magistral una serie de cuestiones en torno al espacio, la estructura, la gravedad y la luz que inauguran un nuevo ciclo en la historia de la arquitectura, y lo hace de tal manera que se convierte en modelo a seguir durante los siglos posteriores.

LA VICTORIA DE LA LUZ SOBRE LA GRAVEDAD EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO INTERIOR EXTERIORIZADO

III.4.1. El Palais des Machines de 1889

III.4.2. La gravedad superada

III.4.2.1. La gravedad ausente del siglo XIX

III.4.2.2. El gran espacio diáfano: más espacio con menos materia

III.4.2.3. La forma estructural como optimización de la función portante

III.4.2.4. La nueva articulación entre la carga y el soporte

III.4.2.5. La ligereza de la línea estructural

III.4.3. El descubrimiento de una nueva luz

III.4.3.1. La luz vitrificada como cerramiento espacial

III.4.3.2. De la luz estructural a la luz desestructurada

III.4.3.3. El peso de la transparencia

III.4.4. La victoria de la luz sobre la gravedad en la estructuración del espacio interior exteriorizado



F.01. Imagen aérea del conjunto expositivo del Champs de Mars. www.loc.gov/pictures

III.4.1. EL PALAIS DES MACHINES DE 1889

"Nunca antes, en opinión de los ingenieros de todos los países que lo han visitado, ha sido un edificio, en proporción a sus enormes dimensiones, construido con una tal combinación de solidez, ligereza y gracia, fluyendo la luz libremente por todas las partes del palacio." ⁰¹

Civil Engineering, Public Works and Architecture

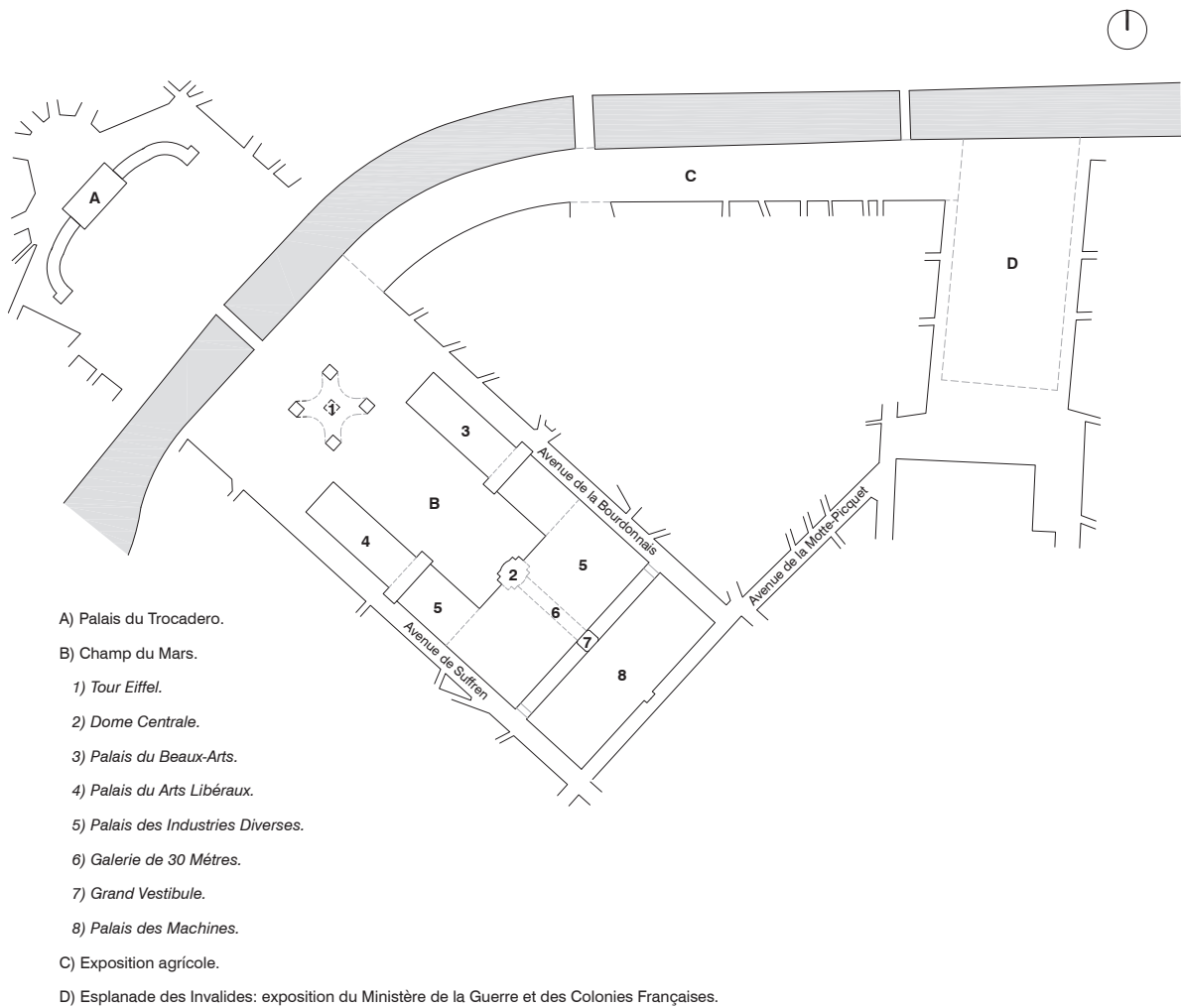
Durante casi dos milenios se utilizó la pesante y opaca materia estructural para delimitar el espacio arquitectónico interior, únicamente iluminado por una luz solar que, previamente, había sido seleccionada y filtrada. Sin embargo, el progreso de la ciencia aplicada, los enormes avances tecnológicos e industriales ⁰² y la demanda de nuevas tipologías arquitectónicas, hacen posible la aparición, a lo largo del siglo XIX, de una nueva concepción espacial en la que, debido a su mayor eficacia mecánica, la materia estructural se reduce y aligera hasta tal punto que su capacidad de delimitación visual, espacial y lumínica se ve enormemente alterada. La luz, imponiéndose a la gravedad, hace del espacio arquitectónico interior un espacio lumínicamente exterior, donde la gravedad de las sombras es sustituida por una lumínica ligereza. Se configura así una arquitectura con más luz y menos gravedad.

Esta nueva arquitectura se construye en hierro y vidrio, el primero como estructura y el segundo como cerramiento. Aunque ambos materiales se conocían ya desde antiguo, nunca se les había atribuido importancia semejante a la que adquieren a partir de la revolución industrial de principios del siglo XIX⁰³. Es precisamente la industrialización conjunta de ambos materiales, en combinación con el progreso de la teoría y el cálculo estructural, y el conocimiento de las propiedades de los materiales, lo que permite explotar de manera exponencial sus propiedades arquitectónico-espaciales. Se construyen grandes estructuras metálicas cubiertas por vastas superficies acristaladas que dan lugar a una espacialidad sin precedentes, cada vez de mayor dimensión, ligereza y luminosidad.

01. WATSON, William: Paris Universal Exposition 1889, Civil Engineering, Public Works and Architecture. Washington D.C., 1892, p. 833. Citado en STAMPER, John, W.: The Galerie des Machines of the 1889 Paris world's fair en THORNE, Robert (ed): Structural Iron and steel, 1850-1900. Aldershot: Ashgate, 2000, p. 272

02. "Esta disponibilidad tecnológica coincide con los nuevos resultados prácticos de la 'explosión científica' del siglo XVIII; de hecho, gran parte de nuestros conocimientos básicos sobre resistencia de materiales, incluyendo el análisis de la flexión o la teoría de la elasticidad, se presentan y discuten en esos años". ARAUJO ARMERO, Ramón: Construir en acero: forma y estructura en el espacio continuo, en TECTÓNICA: monografías de arquitectura, tecnología y construcción. Nº 9: Acero (I), 4a Ed, Junio 2005. Madrid: ATC Ediciones, 2005, p. 6

03. "El hierro, como todos sabemos, no es en manera alguna un material nuevo; su empleo se remonta a la edad prehistórica. Se usó, no obstante, muy poco en los grandes edificios de la antigüedad clásica. Tanto los griegos como los romanos prefirieron el bronce, por su mayor resistencia a los cambios atmosféricos. Tampoco en el Renacimiento se puso mucha fe en el hierro como material de construcción. (...) En el momento en que su producción fue industrializada, el hierro adquirió una importancia nueva. Para poder producir el metal en forma industrial era requisito indispensable conocer su sistema molecular. Pero antes del último cuarto del siglo XVIII no se habían obtenido ni los instrumentos ni los conocimientos suficientes para el estudio de la estructura molecular de los materiales. La historia del hierro, como substancia de extensa aplicación, es consecuentemente una parte de la historia de la química, de la física y del estudio comparativo de la resistencia de los materiales. Estos estudios, al hacerse posible la producción del industrial del hierro, lo convirtieron en algo semejante a un material prácticamente nuevo. Y la obtención en gran escala del hierro, a su vez, condujo a que progresaran mucho aquellas ciencias concernientes a su producción". GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, pp. 169-170



F.02. Fotoplano actual del área de exposición y esquema en planta de la Exposición Universal de Paris de 1889. Dibujo del autor, E 1:1.500.

De las nuevas tipologías arquitectónicas concebidas en el siglo XIX, son los *palacios de exposiciones* de las exhibiciones nacionales e internacionales realizadas a lo largo de la segunda mitad de siglo los que, sin duda alguna, realizan una mayor contribución al desarrollo arquitectónico -que no tecnológico, pues éste se produce en el ámbito de la ingeniería civil- de la construcción en hierro y vidrio. Más que constituirse en meros contenedores expositivos, estas efímeras estructuras se conciben como productos de la revolución industrial y, como tales, no se limitan a mostrar el progreso ya realizado por la industria de la construcción, sino que contribuyen también, de manera activa, a la experimentación de nuevas soluciones espacio-estructurales nunca antes ensayadas. La construcción del *Crystal Palace*, diseñado por Joseph Paxton para la primera Exposición Universal celebrada en Londres en el año 1851, se constituye en un punto de inflexión que marca un antes y un después en la manera de comprender los fenómenos de la gravedad y de la luz en el ámbito de la arquitectura. A partir de ese momento, las efímeras construcciones en hierro y vidrio en las que se celebran las sucesivas exposiciones internacionales reflejan la voluntad de indagar en una nueva manera de entender el hecho arquitectónico ⁰⁴.

La Exposición Universal de París de 1889 se constituye como el momento culminante de la construcción metálica decimonónica⁰⁵. Dada la gran cantidad de expositores, los organizadores de la exposición se ven obligados a organizar el conjunto de las exhibiciones de modo un tanto disperso. El gran grueso de la exposición se ubica en el *Champ de Mars*, mientras que la parte correspondiente a la industria armamentística francesa se ubica en la *Esplanade des Invalides*. Ambos recintos de exposición quedan vinculados por una franja expositiva dedicada a la agricultura dispuesta a lo largo de la orilla sur del Sena, sobre la *Quai d'Orsay*. El *Champ de Mars* se organiza axialmente sobre un eje que se dispone en dirección noroeste-sureste y que une, a través el *Pont d'Iéna*, el *Palais du Trocadero* con la *École Militaire*. Sobre el eje y a modo de gran punto focal, se erige la gran *Torre Eiffel* que, con sus algo más de trescientos metros de altura, marca el punto de acceso al recinto de exposición. El paseo de aproximación hacia

04. "Los edificios para exposiciones eran construcciones ligeras, rápidamente erigidas y rápidamente desmontadas: laboratorios para los edificios industriales. (...) La historia de las exhibiciones se convierte en la historia de la construcción en hierro. Siguiendo las primeras tentativas de 1851 (Londres) y 1855 (París), fue habitual emplear soluciones en sucesivas exhibiciones que no habían sido antes probadas y en las que un grupo de constructores estaba trabajando. (...) Las exposiciones no sólo sintetizaban los resultados del desarrollo sino que también los anticipaban. En la historia de las exhibiciones uno puede trazar directamente la transformación de los antiguos sentimientos estáticos de carga y soporte en un nuevo sistema de equilibrio suspendido". *GIEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p.120. Para un resumen conciso de la evolución arquitectónica de las exposiciones universales ver pp. 122-142 de la misma publicación.*

05. "La nueva Exposición Universal de París de 1889 marcó el momento culminante, a la vez que la fase de conclusión, de un largo periodo. Las grandes estructuras en hierro que para este evento se levantaron son el resultado de la experimentación formal y técnicas de etapas anteriores a la vez que culminación de la búsqueda de un mundo arquitectónico nuevo". *ANTIGÜEDAD, María Dolores; AZNAR, Sagrario: El siglo XIX: el cauce de la memoria. Madrid: Istmo, 1998, p. 249*

"Louis Rousselet, en un popular reportaje de la Exhibición Universal declaró: '(...) la Exposición de 1889 representa (...) el rotundo triunfo del hierro en la construcción moderna. La Torre Eiffel y la gran Galería e las Máquinas muestran qué grado de perfección han alcanzado la ciencia y la ingeniería". *DURANT, Stuart: Palais des Machines: Ferdinand Dutert. London: Phaidon, 1994, p. 4*

"La Exposición de París, en 1889, marcó el momento culminante, a la vez que la fase de conclusión de un largo periodo. (...) La larga, pero sencilla Galería de las Máquinas de 1855, la enorme galería circular, que Krantz y Eiffel construyeron en 1867, y las dos grandes naves del Halle des Machines, construidos por De Dion en 1878, son fases del desarrollo que culmina en el Palais des Machines de 1889". *GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. 276*



F03. Planos del conjunto expositivo. Exposition Universelle de 1889.

Plan Général des Divers Palais. Paris: Bernardin-Béchet et fils, 1889. Fotografía del autor.

la gran *Dome Centrale* que, situada sobre el eje, sirve de acceso principal a las zonas expositivas, queda flanqueado a lado y lado por el *Palais du Beaux-Arts* y el *Palais du Arts Libéraux*. Ambos edificios quedan finalmente unidos por las galerías de exposición del *Palais des Industries Diverses*, dispuestas transversalmente en forma de “U”. Estas crujías transversales son atravesadas por la *Galerie de 30 Mètres*, que une axialmente la *Dome Centrale* con el *Grand Vestibule*, que articula la masa edificada de la parte anterior del conjunto con el enorme *Palais des Machines*, que se erige en telón de fondo de todo el recinto expositivo.

El Palacio, también conocido como *Galerie des Machines* o *Hall des Machines* ⁰⁶, fue conjuntamente diseñado por el arquitecto Charles Louis Ferdinand Dutert (1845-1906) y el ingeniero Victor Contamin (1840-1893) ⁰⁷ para albergar, como su nombre indica, la nueva maquinaria exhibida en la exposición. El edificio se configura como una gran pieza rectangular de unos 421 metros de largo, correspondientes a la anchura total del *Champ de Mars*, por unos 145 metros de ancho, dispuesta perpendicularmente sobre el eje principal del recinto de exposición. El espacio protagonista del edificio es la imponente nave central, estructurada por una sucesión de grandes arcos de hierro triarticulados y en celosía que cubren una luz de más de cien metros y que alcanzan una altura de más de cuarenta. A ambos lados de la nave se dispone en sentido perpendicular a la nave central una secuencia de galerías laterales. A excepción de ciertos paramentos cerámicos, las fachadas se cierran prácticamente con la sola ayuda del vidrio, especialmente en las dos grandes fachadas transversales. La enorme cubierta se cubre en su parte central únicamente con vidrio, mientras que las bandas laterales y las crujías que concluyen ambos extremos de la nave, así como las cubiertas a dos aguas de las naves laterales, se cubren con un cerramiento opaco de zinc. Por último, a fin de mantener su propia autonomía formal, el edificio construye un espacio intersticial que lo separa del *Palais des Industries Diverses*.

El *Palais des Machines* de 1889 refleja, al mismo tiempo, las dudas y los logros arquitectónicos propios del siglo XIX, un periodo de

06. “Ha sido llamado el ‘Hall des Machines’ y la ‘Galerie des Machines’, pero es incontestable el hecho de que la entrada de la avenida de la Bourdonnais está audazmente decorada con las palabras ‘Palais des Machines’”. *DURANT, Stuart: Palais des Machines: Ferdinand Dutert. London: Phaidon, 1994, p. 5*

07. “El proyectista de la Galería des Machines, Ferdinand Dutert (1845-1906) se graduó en la École des Beaux-Arts y ganó el Premio de Roma en 1869. Él concibió la idea del edificio, preparó los planos y supervisó los detalles decorativos durante la construcción. El ingeniero fue Victor Contamin (1840-1893) un profesor de la École Centrale des Arts et Manufactures. El prescribió las dimensiones, hizo los cálculos estructurales y supervisó la erección de la estructura. Contamin fue asistido por Charton, ingeniero adjunto en jefe; Pierron, ingeniero; Escande, quien estuvo al cargo de los detalles de la metalistería”. *STAMPER, John, W.: The Galerie des Machines of the 1889 Paris world's fair, en THORNE, Robert (ed): Structural Iron and steel, 1850-1900. Aldershot: Ashgate, 2000, p. 265-266*

08. *Sobre las diferencias entre el espacio como interior y el espacio moderno ver GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. XXIX*

09. *DURANT, Stuart: Palais des Machines: Ferdinand Dutert. London: Phaidon, 1994, p. 27*

10. “Los dos edificios más logrados del periodo de las grandes exposiciones -el Palacio de Cristal del 1851, y la Galería de las Máquinas del 1889- han desaparecido. El primero fue destruido por un incendio en 1937; el segundo fue insensatamente demolido en 1910. Su pérdida es consecuencia típica de la inestabilidad reinante en nuestra época. Sólo nos quedan unas pocas fotografías y grabados como testimonio de que durante el siglo XIX se había logrado, en forma magnífica, superar la acción de la gravedad, dando construcciones que parecían casi flotar (que es lo esencial en todos los problemas que a la cobertura se refieren)”. *GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. 255*



F.04. Vista frontal del conjunto expositivo desde la Torre Eiffel. A la izquierda se encuentra el Palais du Beaux-Arts y a la derecha el Palais du Arts Libéraux. Al fondo en primer plano la Dome Centrale, detrás el Palais des Industries Diverses y, al fondo, el gran Palais des Machines. www.nga.gov

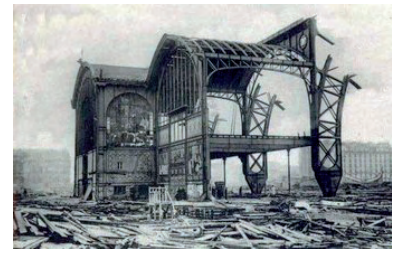
transición entre la clásica concepción del espacio como interior y la fluidez espacial propia del movimiento moderno ⁰⁸: “Es, en consecuencia, mucho más que un mero ejemplo de un importante tipo constructivo histórico. Representa un momento crucial en la historia colectiva del mundo moderno. Esto puede ser dicho de muy pocos edificios, quizá incluso, de ningún otro” ⁰⁹. Aunque como el resto de construcción de la exposición fue concebido como estructura efímera, se mantuvo en pie durante más de dos décadas. No obstante, finalmente no corrió la misma suerte que la Torre Eiffel y fue insensatamente derribado en 1910 ¹⁰. Esta circunstancia no impide, sin embargo, reconocer su importancia y su enorme influencia en la arquitectura posterior. A través de los textos, las fotografías y los dibujos que documentan este magnífico edificio, es posible indagar en una nueva relación espacio-estructural entre la luz y la gravedad sin precedentes en la historia de la arquitectura.

III.4.2. LA GRAVEDAD SUPERADA

“Un examen mayor, un mejor conocimiento de sus propiedades estructurales confirmará que el hierro es la base del sistema de cubierta del futuro, estructuralmente superior a los sistemas helénicos y medievales, al igual que el sistema medieval de arcos superó al sistema adintelado monolítico de la antigüedad.” ¹¹

Karl Bötticher

Ante la ausencia de un estilo propio y apropiado para la época, a lo largo de todo el siglo XIX se multiplican los proyectos basados en estilos arquitectónicos del pasado. Los arquitectos decimonónicos se enfrascan así en un enérgico y a la vez estéril debate sobre la conveniencia en la utilización de unos u otros estilos que les impide advertir los enormes progresos de las construcciones metálicas desarrolladas en el ámbito de la ingeniería civil ¹². Aunque inicialmente sólo fuera empleado en construcciones de carácter utilitario, es decir, no consideradas por sus contemporáneos obras de arquitectura en cuanto que “arte bello” ¹³, el hierro pronto



F.05. Demolición del Palais des Machines en 1910.
<http://paris1900.lartnouveau.com>

11. BÖTTICHER, Karl: *The Principles of Hellenic and Germanic Way of Building (trad. inglesa de Wolfgang Herrmann en In What Style Should We Build?)*, p. 158. Citado en FRAMPTON, Kenneth: *Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX*. Madrid: Akal, 1999, pp. 88-89

12. “Las verdaderas tradiciones de la antigüedad fueron olvidadas y se produjeron en el arte monumental las más extrañas aberraciones que vemos hoy en día. La arquitectura contemporánea en efecto no se contenta con copiar todos los estilos y todos los órdenes, los combina y los amalgama a veces sin discernimiento ni gusto. Asistimos dolorosamente a la decadencia del arte arquitectónico. (...) ¿Por qué la arquitectura se quedó atrás, no siguió un carácter original conforme a las tendencias, a las necesidades y al genio de nuestra época?”. Ch. Labro, *ingeniero del pabellón de exposiciones Arts et Manufactures de la Exposición Universal de París en 1889*. En VIGREUX, Charles: *Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture*. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, p. 16

13. Arthur Schopenhauer, filósofo de la primera mitad del siglo XIX analizado en la primera parte de esta tesis, se refiere a la arquitectura en tanto que arte bello abstraído de su función utilitaria. De ello se desprende que las construcciones utilitarias sin pretensiones artísticas, entre las que incluye las estructuras de hierro, no deben ser consideradas arquitectura. Ver apartado el I-3.3.1. Arthur Schopenhauer: luz y gravedad.

14. “Quizá hubo una guerra de estilos, pero no de materiales –o más bien fue una cuestión económica más que estética-”. MIGNOT, Claude: *Architecture of the 19th century*. Fribourg: Evergreen, 1983, p. 168

15. "El concepto de arquitectura está vinculado a la piedra. Pesantez y monumentalidad pertenecen a la naturaleza de este material (...). Las grandes dimensiones que requiere la piedra son para nosotros normales". *GIEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 90*

16. *El edificio que ostentó la mayor luz libre de soportes hasta la construcción del Palais des Machines de 1889, la St. Pancras Station en Londres (1867), sigue este mismo esquema en estilo gótico. El Manufactures and Liberal Arts Building de la Exposición Universal de Chicago de 1893, el edificio que usurpó el récord de luz libre de apoyos del Palais des Machines de 1889 de París, sigue también el esquema pétreo pero esta vez con un lenguaje clásico.*

17. "Allí donde las estructuras de hierro de cierta dimensión permanecen visibles y solas, su absoluta resistencia al diseño artístico se hace aparente. La esperanza de que el futuro brinde la solución no puede ser considerada como nada más que ilusoria. (...) La descarnada delgadez y tedia rigidez de las partes estructurales; la adherencia del sistema al cálculo estructural; la uniformidad externa de los elementos que en general no permite reconocer las diferencias entre su carga (resistencia a la tensión o a la compresión); la confusa cantidad de entrecruzamientos, casi líneas incorpóreas en grandes construcciones, cuyo sentido y finalidad pueden ser entendidas sólo por un razonamiento técnicamente entrenado y no simplemente sentido; todo esto hace que la construcción en hierro se nos aparezca indiferente – incluso reconociendo, debemos admitir, que a menudo hay un cierto encanto estético en el contorno general de sus trabajos (puentes arqueados, la Torre Eiffel) o en el efecto de sus enormes interiores que sólo ellos hacen posible. Sin embargo, aún las más grandes estructuras de hierro no tendrán éxito al evocar una importante, profunda y verdadera sensación artística". *STREITER, Richard Von: Architektonische Zeitfragen, eine Sammlung und Sichtung verschiedener Anschauungen, mit besonderer Beziehung auf Professor Otto Wagners Schrift Moderne Architektur. Berlin: Cosmos, 1898, p.110. Citado en GIEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 29*

deviene en símbolo de progreso y empieza a ser utilizado, también, en la construcción de la arquitectura que debe satisfacer las nuevas necesidades de la era industrial.

Así pues, pese al inicial recelo a la utilización del hierro por parte de los arquitectos, sus excelentes propiedades estructurales acaban por convertirlo en un material estructural imprescindible. Con ello, el hierro se introduce también en el debate arquitectónico sobre los estilos, hecho que obliga a plantear cuál debe ser su nuevo papel en la construcción de la arquitectura y cómo puede ennoblecerse un material que, pese a sus excelencias constructivas e industriales, parece no poseer dignidad arquitectónica suficiente¹⁴.

La optimización matemática de la enorme capacidad mecánica del hierro permite satisfacer grandes solicitaciones estructurales con una mínima cantidad de materia, hecho que da lugar al diseño de elementos de una gran esbeltez y ligereza. Sin embargo, a pesar de que estas cualidades mecánicas hacen del hierro un material idóneo para la cubrición de grandes espacios, también lo convierten en un material difícil de encuadrar dentro de los cánones de la arquitectura monumental, cuya masiva estructura se basa en un sistema de proporciones acorde con la solidez y la pesantez de la piedra¹⁵. Así pues, a fin de no renunciar a la monumentalidad de la piedra ni a la capacidad estructural del hierro, a lo largo de la segunda mitad del siglo proliferan los diseños arquitectónicos donde se combinan ambos materiales. Por lo general, y con independencia de su función, estos edificios alojan en su interior un gran vacío, cubierto por una esbelta y diáfana estructura metálica y rodeado por una pétreo construcción mural que, en muchas ocasiones, no es más que un revestimiento de la verdadera estructura metálica. De esta manera se consigue ocultar la estructura metálica tras unos aparentemente sólidos muros de carga que, convenientemente contruidos en base a un determinado estilo histórico, dotan al conjunto edificado del deseado carácter monumental. Éste es, por ejemplo, el esquema desarrollado en el Palais du Beaux-Arts y en el Palais du Arts Libéraux de la Exposición Universal de París de 1889¹⁶.

Sin embargo, en el conjunto formado por la Dome Centrale, la Galerie de 30 Mètres y el Grand Vestibule de la misma exposición, puede observarse otra manera de “dignificar” la utilitaria estructura metálica sin necesidad de recurrir al empleo de la piedra. A diferencia del caso anterior, estas arquitecturas explotan al máximo las nuevas propiedades estructurales y espaciales del hierro mediante la construcción de grandes espacios abiertos y luminosos sin emplear gruesos muros portantes. Sin embargo, aunque se considera adecuada en construcciones utilitarias, la forma matemática y la apariencia industrial de esta osamenta lineal no se corresponden con la cualidad que se espera de una arquitectura representativa. A fin de paliar esta deficiencia se procede a decorar y engalanar en abundancia la estructura mediante superficies acristaladas, estucos y revestimientos cerámicos, todos ellos profusamente coloreados y adornados por medio de esquemas geométricos o imágenes figurativas. Se trata, en última instancia, de emplear la pintura y la escultura como artes auxiliares con los que embellecer las carencias de lo que se considera un sistema estructural que, por sí solo, no posee dignidad arquitectónica suficiente como para constituirse en arte bello.

Estas actitudes derivan de la valoración de las excepcionales propiedades espacio-estructurales de la construcción en hierro en base a los cánones propios de la arquitectura monumental. Sin duda ésto conduce a un juicio erróneamente negativo¹⁷ sobre sus verdaderas posibilidades arquitectónicas, pues las características de este nuevo material se resisten ser encuadradas dentro de los parámetros propios de la arquitectura del pasado¹⁸. De esta manera, aquellas mismas propiedades de la construcción en hierro que desde el ámbito de la academia habían sido consideradas hasta entonces como dificultades insalvables en el diseño de una arquitectura monumental devienen en las principales cualidades de una nueva manera de concebir el hecho arquitectónico¹⁹. El hierro se constituye entonces en el material que hace posible una nueva arquitectura, ajena a los parámetros espacio-estructurales del monumentalismo histórico²⁰. Aunque esta idea había sido ensayada y discutida desde la construcción del Crystal Palace, a

18. Refiriéndose al Crystal Palace de Paxton: “Al contemplar el primer gran edificio no construido a base de sólida albañilería, los observadores no tardaron en comprender que era un edificio que no podía ser juzgado a través del mismo patrón por el cual había sido medida hasta entonces la arquitectura”. *BUCHER, Luthar: Kulturhistorische Skizzen aus der Industrieausstellung aller Völker. Frankfurt: 1851, p. 174. Citado en GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. 260*

19. “[Joseph August] Lux no fue tan lejos como para proponer una gramática de la forma ingenieril, pero sí que esbozó las características formales de la construcción en hierro. En el proceso, reinterpretó positivamente los reproches que habían sido hechos contra los trabajos de los ingenieros durante sesenta años de debate. Así el antimonumental efecto de la construcción en hierro deviene en una de sus mayores virtudes, la inclinación hacia la ‘desmaterialización’ su ley suprema, etc. En contraste con la arquitectura en piedra, cuyo objetivo era la creación de recintos espaciales, la construcción en hierro era una materia ‘de contornos meramente lineales, de un esqueleto descarnado o de una trama abierta, en resumen, el soporte que transmite las energías y representa líneas de fuerza’. Igual que Hofmann antes que él, Lux enfatiza la linealidad de la construcción en hierro como una marca esencial de este efecto estético. A través de esto surgieron ‘nuevas imágenes espaciales’. La belleza de la construcción en hierro demanda un ‘nuevo ojo’”. *GIEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 13*

20. "Cualquier monumento de cualquier estilo puede confirmar nuestra idea de que la forma de cubrir determina el estilo y su desarrollo final. También resulta una verdad evidente la explotación total de todas las formas posibles de utilización de la piedra para cubrir el espacio (...) hasta tal punto que las posibles aplicaciones estructurales del material se han agotado totalmente. La piedra sola nunca podrá volver a formar un nuevo sistema estructural que pertenezca a una etapa de desarrollo superior. La fuerza reactiva de la piedra, pero también la relativa, se ha agotado por completo. Sólo podrá aparecer un sistema nuevo y desconocido de cubierta (que traerá consigo un mundo nuevo de formas artísticas) si adoptamos un material desconocido o, mejor, un material que todavía no se haya empleado como principio rector. Tendrá que ser un material cuyas propiedades físicas permitan espacios más amplios, con menos peso y una mayor exactitud que las producidas por la piedra sola. Respecto al diseño espacial y a la construcción, debe cubrir cualquier necesidad espacial o topográfica concebible. (...) El peso total del sistema de cubierta debe confiarse a la presión vertical, es decir, a la fuerza reactiva de muros y soportes. (...) El material en cuestión es el hierro, que ya ha sido empleado para estos propósitos a lo largo de nuestro siglo. Un examen mayor, un mejor conocimiento de sus propiedades estructurales confirmará que el hierro es la base del sistema de cubierta del futuro, estructuralmente superior a los sistemas helénicos y medievales, al igual que el sistema medieval de arcos superó al sistema adintelado monolítico de la antigüedad." *BÖTTICHER, Karl: The Principles of Hellenic and Germanic Way of Building (trad. inglesa de Wolfgang Herrmann en In What Style Should We Build?), p. 158. Citado en FRAMPTON, Kenneth: Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal, 1999, pp. 88-89*

21. "El diseño estructural adquiere un protagonismo absoluto, y el tipo arquitectónico se confunde prácticamente con el tipo estructural". *ARAUJO ARMERO, Ramón: Construir en acero: forma y estructura en el espacio continuo, en TECTÓNICA: monografías de arquitectura, tecnología y construcción. Nº 9: Acero (I), 4a Ed, Junio 2005. Madrid: ATC Ediciones, 2005, p. 6*

lo largo del siglo XIX las posibilidades arquitectónicas del hierro no se expresan nunca con la potencia y la claridad que exhiben las enormes estructuras de la Torre Eiffel y del Palais des Machines de la Exposición de París de 1889.

En ellas la estructura adquiere tal importancia que la forma arquitectónica acaba por identificarse con la forma estructural²¹, resultado a su vez de la optimización matemática de su función portante. De manera análoga al orden griego en sus orígenes, la forma estructural del hierro deviene en expresión de su función y, por tanto, en forma bella en sí misma. Ya no es necesario ningún revestimiento pétreo ni ninguna decoración superpuesta para dignificar una forma estructural que, al quedar desnuda y mostrarse en su totalidad, deviene ella misma en su propio ornamento. La estructura metálica construye así una nueva tectónica propia y apropiada al material que la conforma²².

Esta nueva estructura se rige por unos parámetros de optimización matemática que nada tienen que ver con los sistemas de proporciones de las pétreas estructuras adinteladas o abovedadas, hecho que permite la construcción de unas estructuras de cubrición espacial con unos valores gravitatorios totalmente nuevos, capaces de construir espacios de unas dimensiones y unas cualidades arquitectónicas hasta el momento nunca vistas²³.

III.4.2.1. La gravedad ausente del siglo XIX

*"Una de las misiones de la ingeniería estructural durante el siglo XIX fue la de representar el subconsciente que dormitaba en la arquitectura de aquel periodo. En este siglo todo ha cambiado."*²⁴

Sigfried Giedion

La conjunción de la aparición de unas necesidades funcionales inexistentes hasta entonces con el desarrollo de una potente

tecnología estructural, es un factor necesario pero no suficiente para el desarrollo de una nueva manera de concebir el espacio arquitectónico. El desarrollo conceptual de esta nueva estructura espacial se debe, en gran medida, a un cambio en la comprensión física de la naturaleza de la gravedad.

A pesar de la potencia de la Ley de Gravitación Universal formulada por Isaac Newton a finales del siglo XVII, ésta no estuvo nunca exenta de inconsistencias teóricas. Debido a ello, no fueron pocos los físicos que se resistieron a aceptar una teoría que presentaba a la gravedad como una fuerza de atracción instantánea entre las masas provocada por diferencias de densidad en el éter que rodea los cuerpos. Sin embargo, los físicos de finales del siglo XVII y principios del XVIII fracasaron en la formulación de una teoría alternativa y, debido al evidente éxito práctico de la teoría newtoniana, ésta acaba por ser generalmente aceptada ²⁵.

No obstante, a mediados del siglo XIX ciertos descubrimientos ponen en crisis la validez de las bases de la física newtoniana. En 1831 Michael Faraday describe el fenómeno electromagnético sin necesidad de recurrir a ningún tipo de fuerza a distancia, hecho que evidencia la artificiosidad de un concepto que, aunque fundamental para la física newtoniana, había sido puesto en duda ya a finales del siglo XVII por carecer de explicación mecánica. De hecho, el propio Newton reconoce en las revisiones posteriores a su primera edición de los *Principia* la necesidad de fundamentar su teoría sobre la gravitación en algo más sólido que unas misteriosas fuerzas a distancia. Para suplir esta inconsistencia, construye una explicación complementaria en la que el origen de dichas fuerzas se encuentra en el éter. Pero en 1887 Michelson y Morley publican los resultados de unos experimentos sobre la luz en los que se concluye que el éter no existe. Invalidadas las fuerzas a distancia y demostrada la inexistencia del éter, la gravitación universal de Isaac Newton se desmorona sin ninguna teoría alternativa en el horizonte ²⁶.

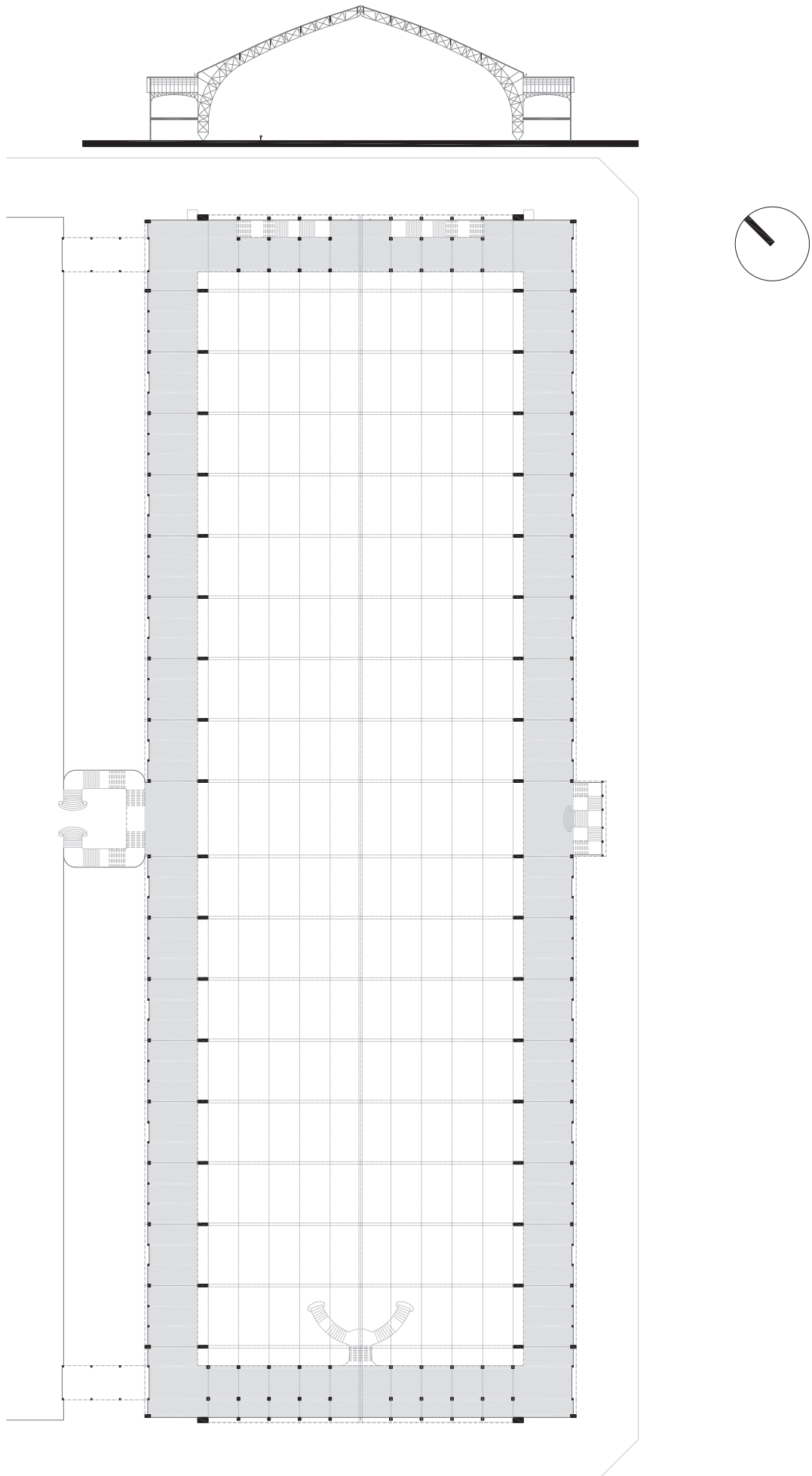
La invalidación de la noción de fuerza a distancia y la demostración

22. "El valor del hierro en términos del efecto que produce se manifiesta especialmente en la torre Eiffel y sobretodo en la Galerie des Machines por medio de líneas que se cruzan descarnadamente. La osamenta bien aparente de estos edificios afirma totalmente su estabilidad. Estas cualidades primordiales, buscadas por los griegos, producen en ellos una sensación de impresión artística". *Ch. Labro, ingeniero del Palais du Arts et Manufactures de la exposición de París de 1889. VIGREUX, Charles. Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, p. 18.*

"Su objetivo [el de la ciencia de la ingeniería] es el cumplimiento del propósito y -delegando en las cuestiones estéticas- se esfuerza por expresarse con una consistencia implacable y desnuda, inexorablemente verdadera. (...) Y en tanto que la intencionalidad puramente técnica no requiere transfiguración a través de la belleza, ya que su apariencia visual es sólo la expresión de la función que realiza, esto es, función que deviene en forma, tales artefactos puramente intencionales transmiten en su construcción también la explicación de su existencia, de su necesidad". *LIPSIUS, Constantin: "Uber die aesthetische Behandlung des Eisens im Hochbau". Deutsche Bauzeitung, 7 September 1878, pp. 363-66. Citado en GIEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 13*

"No hemos conquistado artísticamente la forma de trabajo del hierro, más bien, la forma de trabajo del hierro nos ha conquistado a nosotros y nos ha forzado a verla como bella, porque es racional y producto de una idea creativa". *GURLITT, Cornelius: Die deutsche Kunst des neunzehnten Jahrhunderts; ihre Ziele und Taten (2nd Ed). Berlin: Georg Bondi, 1900. Citado en GIEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 24*

"Ciertamente la Galerie no fue la primera forma estructural que determinaba la expresión formal. Pero marcó el punto en el que la ingeniería analítica, el material y el método industrial se convirtieron en forma. En 1851 el Crystal Palace había expresado su sistema abierto por omisión porque no había habido tiempo de cubrir la estructura adecuadamente. Treinta y ocho años después, la Galerie des Machines expresó el sistema y la estructura por elección". *PETERS, Tom F.: Building the nineteenth century. London: The MIT Press, 1996, p. 278*



F.06. Sección transversal y planta baja del Palais des Machines de Paris de 1889. Dibujo del autor. E 1/200

de la inexistencia del éter no solo elimina toda posible explicación de la causa eficiente de la gravedad, sino que cuestiona la esencia de la gravedad newtoniana y pone en duda la naturaleza gravitatoria del fenómeno del peso, considerada por Newton como una fuerza a distancia de carácter gravitatorio. Estas dudas se expresan también en la estructura arquitectónica decimonónica, en la que, como veremos, los tradicionales atributos arquitectónicos de la gravedad se niegan hasta tal punto que la gravedad, entendida en un sentido clásico, parece estar ausente del hecho constructivo. La pesantez y la masividad de la grave materia estructural de las arquitecturas del pasado se sustituyen por una ligereza y una esbeltez nunca vistas, que hacen de la estructura metálica una construcción aparentemente ajena al fenómeno gravitatorio. La obsolescencia de la gravedad newtoniana en el ámbito de la física conduce a la reformulación de los valores tradicionalmente atribuidos a la gravedad estructural en la arquitectura. Libre de la opresión de las masas pesantes que lo configuran, el espacio se abre y se expande entonces en todas direcciones.

III.4.2.2. El gran espacio diáfano: más espacio con menos materia

*“El diáfano volumen espacial supone una conquista de la materia sin precedentes. Nada de una época anterior se le puede comparar.”*²⁷

Sigfried Giedion

La implantación del ferrocarril a lo largo del siglo XIX obliga a alcanzar un nivel de desarrollo de la industria del hierro y del cálculo estructural que permita la construcción de grandes puentes capaces de salvar los accidentes topográficos del paisaje. A pesar de que esta labor no tiene en principio ninguna finalidad espacial, la aspiración de todo puente de cubrir un vacío con la menor cantidad de soportes acaba por tener su correspondencia arquitectónica, que se traduce en la posibilidad de cubrir espacios libres de apoyos intermedios cada vez de mayor dimensión en planta.

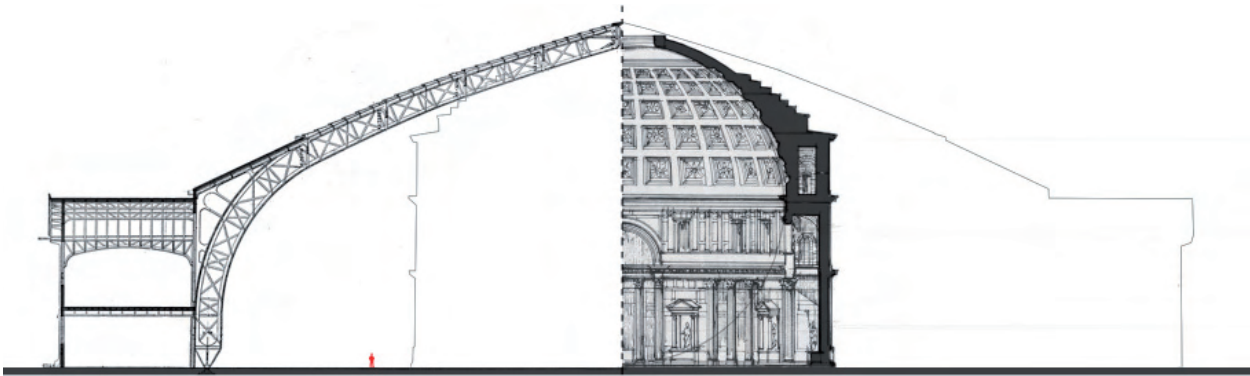
23. “El interior del palacio es realmente espléndido (...) un espacio colosal (...) más alto que la más alta de las catedrales. Se eleva sobre delicadas bóvedas (...), gigantes ojivas resuelven el vertiginoso empuje hacia abajo (...) La forma de esta cámara está inspirada por la virtuosidad de la construcción del gótico, pero aquí es sobrepasada (...), no podría haber sido nunca construida en piedra. (...) Desde el punto de vista del arte, este espacio se constituye como el más impresionante logro que la industria del metal ha logrado”. *HUYSMANS, Joris-Karl: Certains. Paris, 1889. Citado en DURANT, Stuart: Palais des Machines: Ferdinand Dutert. London: Phaidon, 1994, p. 58, n. 4*

24. *GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. XVI*

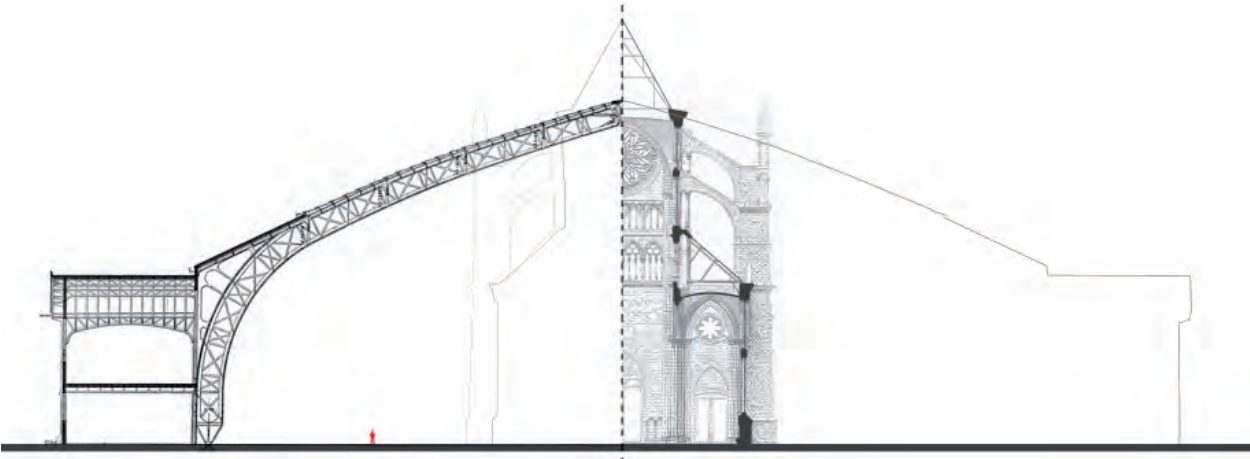
25. *Ver la introducción del apartado II-4.2. Albert Einstein: gravedad, geometría y espacio,*

26. *Sobre la desestimación de la noción de fuerza a distancia a propósito del estudio del fenómeno electromagnético y el descubrimiento de la inexistencia del éter, ver el apartado II-4.1.1.2. Faraday y Maxwell: la luz como onda electromagnética.*

27. *Comentario referido al Palais des Machines de 1889. GIÉDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p.137*



F.07. Sección comparativa entre el Palais des Machines (Paris, 1889) y el Pantheon (Roma, 128). Dibujo del autor. E 1/100



F.08. Sección comparativa entre el Palais des Machines (Paris, 1889) y la Catedral de Notre-Dame de Amiens (Amiens, 1220). Dibujo del autor. E 1/100



F.09. Vacío interior de la gran nave central del Palais des Machines. GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: *Building in France, building in iron, building in ferro-concrete*. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 140.

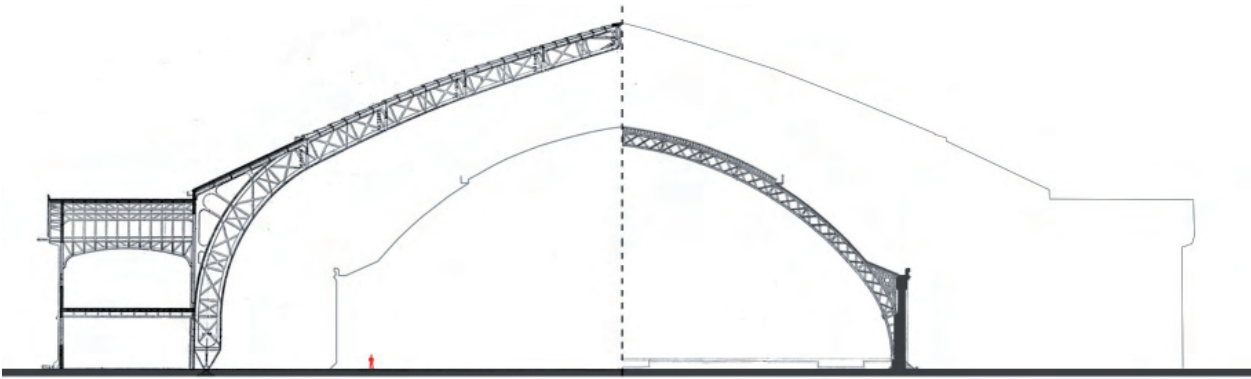
Más allá de satisfacer las nuevas necesidades funcionales que requieren ciertos programas, la construcción de estos grandes espacios cubiertos acaba por convertirse en un fin en sí mismo, símbolo y expresión del desarrollo tecnológico de la estructura metálica. Las exposiciones universales intentan expresar esta voluntad mediante la construcción de espacios expositivos diáfanos cada vez de mayor dimensión. Tanto es así que, a pesar de tener unas necesidades expositivas similares, la anchura libre de la crujía central del célebre Crystal Palace de la Exposición de Londres de 1851, de algo más de 20 metros, se duplica en la Exposición de Viena de 1873 y se triplica en la de Philadelphia de 1876. Ese mismo año se construye en Londres la St. Pancras Station que, con sus más de 70 metros de luz, se constituye en la estructura arquitectónica de mayor luz construida hasta la fecha. Sin embargo, tres décadas más tarde la estructura metálica del Palais des Machines de París de 1889 se convierte, con sus cerca de 115 metros de luz, en el espacio cubierto de mayor anchura libre de soportes intermedios jamás construido por el ser humano²⁸.

Al margen de las necesidades expositivas reales del edificio, en el pliego de condiciones particulares del plan general de la exposición se establece esta enorme anchura como un requisito previo que el diseño final debe satisfacer de un solo trazo²⁹. Aunque es cierto que las pésimas condiciones mecánicas del suelo donde debía erigirse el edificio hacían preferible un diseño estructural que redujera la cantidad de apoyos sobre el terreno, es evidente que la construcción de un espacio cubierto de tal anchura sin soportes intermedios responde, también, a la voluntad de los organizadores de la exposición de impresionar al visitante por medio de la expresión del potencial espacial y estructural de la industria metalúrgica francesa³⁰. Los 114,30 metros de anchura total y los 106,90 metros de luz interior libre del Palais suponen un aumento más que considerable si se compara con su precedente arquitectónico inmediato. No obstante, cabe señalar que durante aquellos mismos años se estaban construyendo varios puentes de luces superiores al medio kilómetro³¹, de modo

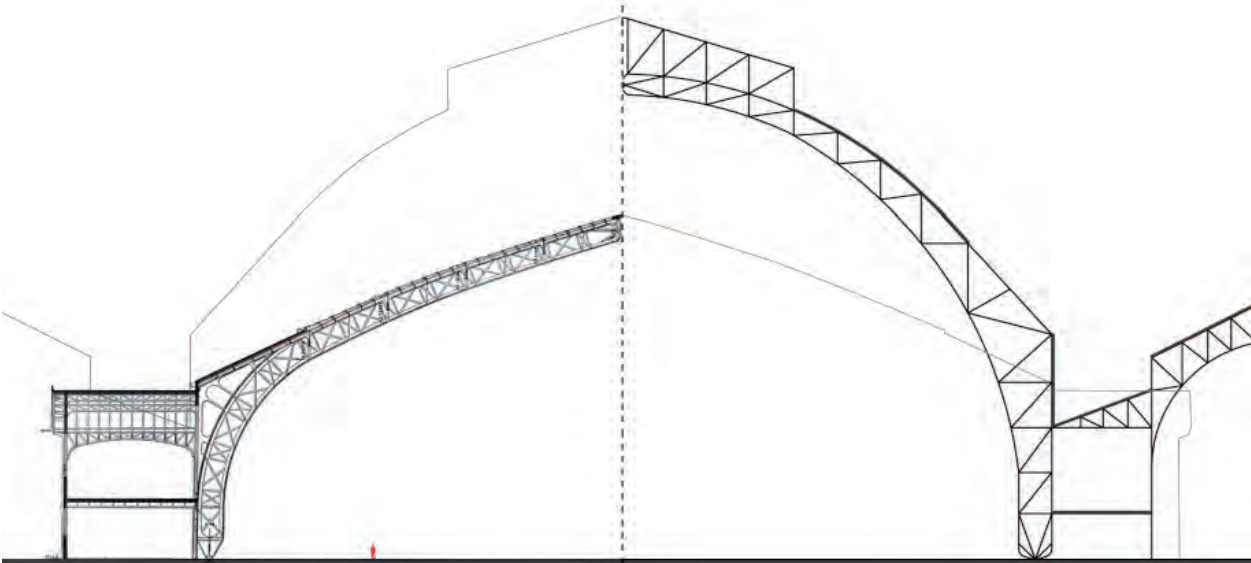
28. "Cuando la Galerie des Machines fue completada para la exposición Universal de París de 1889, fue la estructura de mayor luz jamás construida. Descrita en su momento como '*una de las maravillas de la era de la construcción*', es aún vista hoy como representación del desarrollo revolucionario de la tecnología constructiva en hierro durante el curso del siglo XIX". WALTON, William: Chefs-d'oeuvre de l'Exposition Universelle de Paris, 1889. *Paris: 1889*, p. XXI. Citado en STAMPER, John, W.: The Galerie des Machines of the 1889 Paris world's fair, en THORNE, Robert (ed): Structural Iron and steel, 1850-1900. Aldershot: Ashgate, 2000, p. 261

"Los más importantes de estos edificios son inconcebibles sin la experiencia lograda en otros tipos de construcción, -invernaderos para el Crystal Palace de Paxton, puentes ferroviarios para la Galerie des Machines o la Torre Eiffel-. Hubieran sido impensables sin el soporte de la industria ferroviaria, cuya expansión aseguró que la investigación se llevase a cabo en cada campo de la tecnología del metal. A la inversa, ellos también proporcionaban la oportunidad de ser los "primeros", que era lo que más publicidad daba. Los más prestigiosos de aquellos edificios tenían esas cualidades espaciales novedosas que cambiaron la sensibilidad arquitectónica de manera drástica. El área cubierta crecía considerablemente de una exposición a otra, -la de la exposición de Londres de 1851 fue doblada en la de Viena de 1873 y triplicada en la de Philadelphia de 1876-. (...) Se redoblaron esfuerzos para lograr la espectacular y culminante Galerie des Machines (destruida en 1910) de Charles Dutert (1845-1906). Ésta tenía arcos que cubrían una luz de 115 metros, mientras que la mayor luz de los pabellones de 1867 sólo tenía 35 metros. Esta inútil ansia de superar los records de dimensión fue evidentemente obvia en la Exposición Universal de Chicago de 1899, donde se decidió que los arcos del *Manufactures and Liberal Arts Building* serían un poco más largos para superar el récord mundial logrado por la Galerie des Machines". MIGNOT, Claude: Architecture of the 19th century. *Fribourg: Evergreen, 1983*, pp. 194-199

Cabe señalar que, aunque la estructura de la nave central del Manufactures and Liberal Arts Building superaba en tres pies y diez pulgadas (algo más de un metro) la anchura a la nave del Palais des Machines y que era visualmente más ligera que la estructura parisina, el edificio en su conjunto fue concebido como una gran pieza neoclásica en piedra que, sin realizar ninguna aportación en el campo de la tectónica del hierro, simplemente se limitó a ampliar el tamaño de un esquema arquitectónico ya ensayado en edificios anteriores.



F.10. Sección comparativa entre el Palais des Machines (Paris, 1889) y la St Pancras Station (Londres, 1867). Dibujo del autor. E 1/100



F.11. Sección comparativa entre el Palais des Machines (Paris, 1889) y el Manufactures and Liberal Arts Building (Chicago, 1893). Dibujo del autor. E 1/100



F.12. Interior de la gran nave central del Palais des Machines con la maquinaria expuesta.

que La construcción de una estructura de las dimensiones de la nave central del Palais des Machines de Paris de 1889 puede ser considerada excepcional en tanto que hecho espacial, pero en absoluto puede tener esa misma consideración desde un punto de vista puramente estructural.

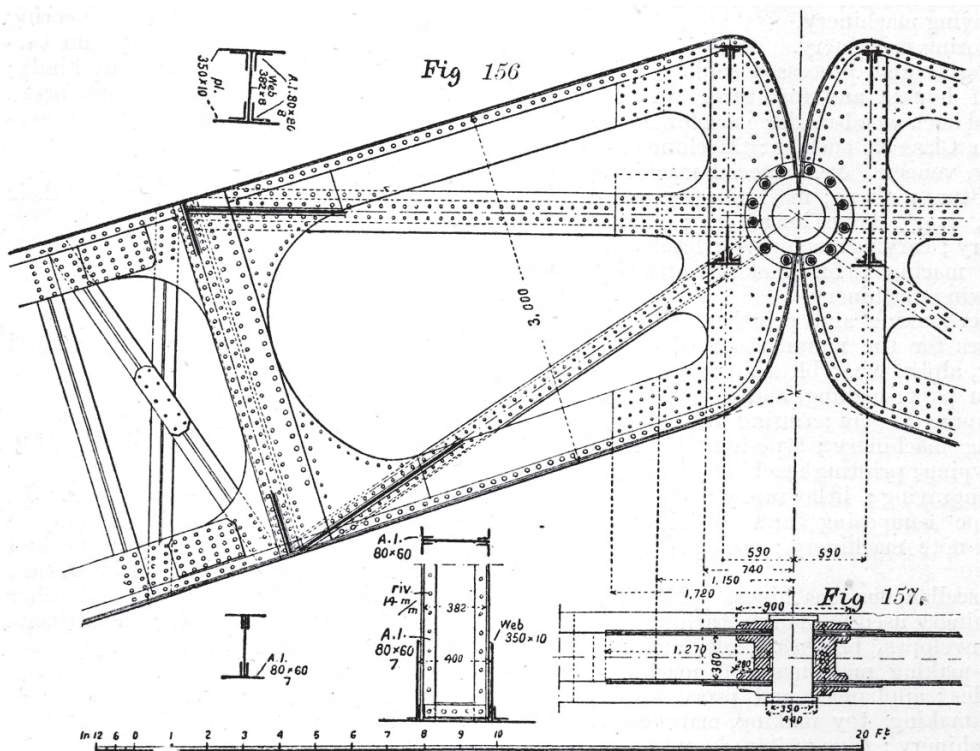
La voluntad de cubrir un espacio de tal anchura sin soportes intermedios obliga al diseño de una estructura de una altura total de 46,65 metros en la cúspide y una altura libre interior máxima de 43,50 metros. No cabe duda alguna que estas dimensiones, solamente comparables con la altura del Pantheon de Roma o de la Catedral de Amiens, resultan excesivas en relación a las necesidades reales de un espacio expositivo destinado a mostrar maquinaria industrial. Los 421,7 metros de longitud de la nave se corresponden con la longitud total del edificio. Como se ha avanzado anteriormente, ésta viene determinada por la voluntad de disponer el edificio transversalmente a los *Champs de Mars* a fin de ocupar la totalidad de la anchura del solar.

Así pues, la estructura de la gran nave central del Palais des Machines permite cubrir un inmenso y diáfano espacio único de aproximadamente 420 metros de longitud, 115 metros de anchura y 45 metros de altura. Aunque el peso total de la estructura de la nave no es en absoluto desdeñable (7.713.832 kg), si se mide en relación a la superficie en planta que permite cubrir (48.119 m²) o al volumen espacial que delimita (1.738.684 m³), se obtienen unas ratios de peso por unidad de superficie (160,3 kg/m²) y por unidad de volumen (4,436 kg/m³)³² que dan cuenta de la óptima relación que existe entre el peso de la materia estructural y la cantidad de espacio cubierto por esta imponente estructura de hierro. La construcción de espacios cada vez más grandes empleando para ello cada vez menos materia estructural convierte a la histórica aspiración de la arquitectura por la ligereza en una realidad alcanzable. La pesantez y la masividad propias de la arquitectura monumental se sustituyen por la ligereza y la esbeltez inherentes a la construcción metálica³³. Se consigue de esta manera construir cada vez *más espacio con menos gravedad*.

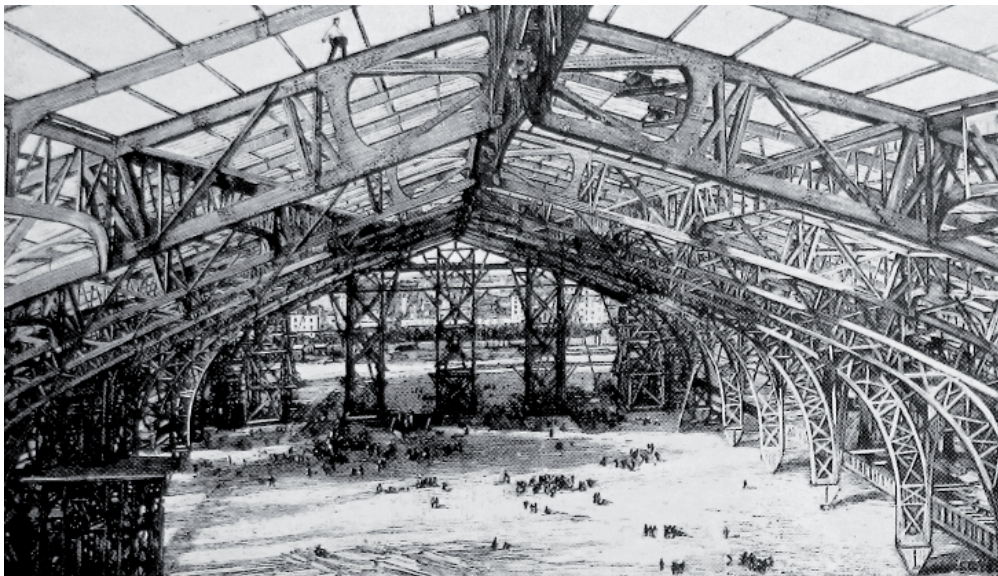
29. "A pesar del progreso realizado en las construcciones metálicas de grandes dimensiones, todavía había grandes dificultades para resolver la excepcional altura y luz especificadas en el programa general del Palais proyectado para la Exposición de 1889. La Dirección general de los trabajos había decidido alojar las máquinas en un palacio único de 400 metros de largo por 115 de ancho sin ningún soporte vertical intermedio. Éste era un programa difícil de cumplir". VIGREUX, Charles. *Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, p. 86*

30. "Este proyecto, presentado al *Conseil des Travaux* y a la *Commission de controle*, dio lugar a discusiones bastante largas y finalmente fue adoptado. De hecho, había muchas razones a favor: el efecto artístico prometía ser el más nuevo y el más interesante; la impresión producida sobre los visitantes por la gigantesca nave (...); la reducción en el número de puntos de apoyo fue impuesta por el suelo del Champs de Marte (...); por último, la ejecución de tales obras ofrece un magnífico campo de experimentación de la industria metalúrgica francesa, mostrando las maravillas que es capaz de producir". ALPHAND, Adolphe; GEORGES BERGUER, M.; ALFRED PICARD, M.: *Exposition Univeselle Internationale de 1889 a Paris. Monographie. Palais, Jardins, Construccions Diverses, Installations Gènèrales. Paris: J. Rothschild, 1892-1895, Vol. I, pp. 396-397.*

31. "Este récord pertenecía a los 486 metros del Brooklyn Bridge [1883], pero fue rápidamente superado por los 521 metros del Firth of Forth [1883-1890]. El puente de Garabit de Eiffel de 1884 cerca de Calermoent-Ferrand, el Douro Bridge de Théophile Seyrig de 1877 en Portugal y el Puente del Mississippi de James Eads de 1874 en St Louis fueron todos ellos mayores que la Galerie des Machines". PETERS, Tom F.: *Building the nineteenth century. London: The MIT Press, 1996, p. 432, n. 118*



F.13. Detalles de la articulación superior del pórtico. E 1/50. ANON: *Engineering*, XLVII, 3 May, 1889, p. 463.



F.14. Gravado del espacio central del Palais des Machines durante su fase de construcción.

PETERS, Tom F.: *Building the nineteenth century*. London: The MIT Press, 1996, p. 276

III.4.2.3. La forma estructural como optimización de la función portante

*"No existe, de hecho, ninguna contradicción entre los productos de un correcto cálculo matemático y un saludable sentido de belleza... Si nuestras matemáticas nos llevan a formas feas, significa que no todas las influencias han sido correctamente equilibradas en la concepción de la fórmula; el sentido de belleza debe servirnos de guía que prevenga a nuestras matemáticas"*³⁴

Gustav Lang

La planta rectangular del solar del Palais des Machines induce a concebir una estructura unidireccional, una tipología caracterizada por encauzar la gravedad y construir el espacio en dos direcciones claramente diferenciadas, una principal y otra secundaria. La decisión de salvar la anchura total de la nave sin la ayuda de soportes intermedios obliga a soportar la gravedad mediante potentes pórticos estructurales lógicamente dispuestos en sentido transversal. La profundidad total del espacio queda determinada por la repetición de veinte de estos pórticos, que guardan entre sí una separación de 21,50 metros de centro a centro, distancia que aumenta hasta los 25,20 metros en las crujías laterales y los 26,40 metros en la crujía central³⁵. En sentido longitudinal el espacio se cubre con un total de doce vigas metálicas que recorren toda la dimensión de la nave, conectando los veinte grandes pórticos por el plano de la cubierta. La necesaria rigidización longitudinal de los pórticos transversales se confía a los forjados planos de la planta piso y a las cubiertas inclinadas que cubren sendas naves laterales. Esta jerarquización bidireccional de los esfuerzos longitudinales y transversales no sólo facilita la comprensión del comportamiento estático de la estructura sino que, además, simplifica e independiza el cálculo de cada uno de los elementos que la configuran.

Como prácticamente todas las estructuras de gran luz decimonónicas, el pórtico que salva transversalmente el espacio central del Palais tiene una forma sensiblemente arqueada. Su forma sigue reconociendo así, en cierto modo, la curvatura inherente de la

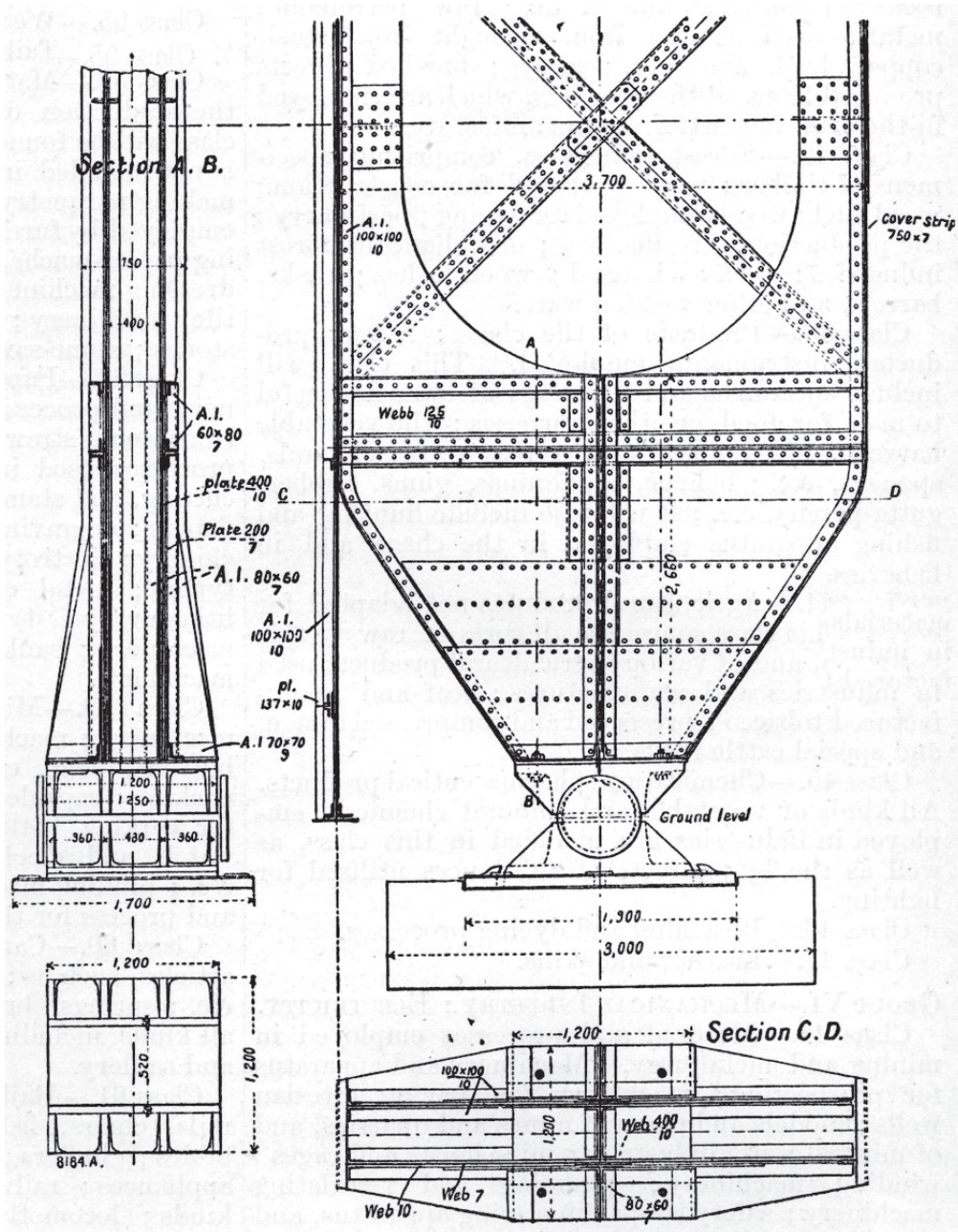
32. "El Palais des Machines, erigido en el Champ-de-Mars, enfrente de la École Militaire, es la más grande construcción metálica de la Exposición Universal de 1889. Este es en efecto el Palais que exigió más metal debido a sus excepcionales dimensiones, anchura y altura": L. A. Barré, en VIGREUX, Charles: *Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, p. 21. Los datos numéricos sobre la estructura han sido extraídos de las páginas 87-88 de la misma publicación. De la tabla mostrada en ALPHAND, Adolphe; GEORGES BERGUER, M.; ALFRED PICARD, M.: Exposition Univeselle Internationale de 1889 a Paris. Monographie. Palais, Jardins, Construccions Diverses, Installations Gènerales. Paris: J. Rothschild, 1892-1895, Vol. 1 pp. 61-62, se desprende que el coste de la totalidad de los trabajos en hierro del Palais des Machines representa el 70% del coste final del edificio, hecho que da cuenta de la enorme importancia de su estructura.*

33. Sobre la ligereza de la estructura metálica ver apartado III-4.2.5. La ligereza de la línea estructural.

34. LANG, Gustav: *Wissenschaft und Wirklichkeit im Bauwesen. Deutsche Bauzeitung 25 (1891) pp. 563 - 564. Citado en la Introducción de Georgiadis en GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, pp. 9-10*

35. Dimensiones especificadas en VIGREUX, Charles: *Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, p. 22 y 95.*

36. Sobre la expresión de la curvatura de la gravedad en la forma estructural ver apartado III-3.4. El espacio estructurado por la curvatura de la gravedad..



F.15. Detalles de la articulación inferior del pórtico. E 1/50. ANON: *Engineering*, XLVII, 3 May, 1889, p. 463.

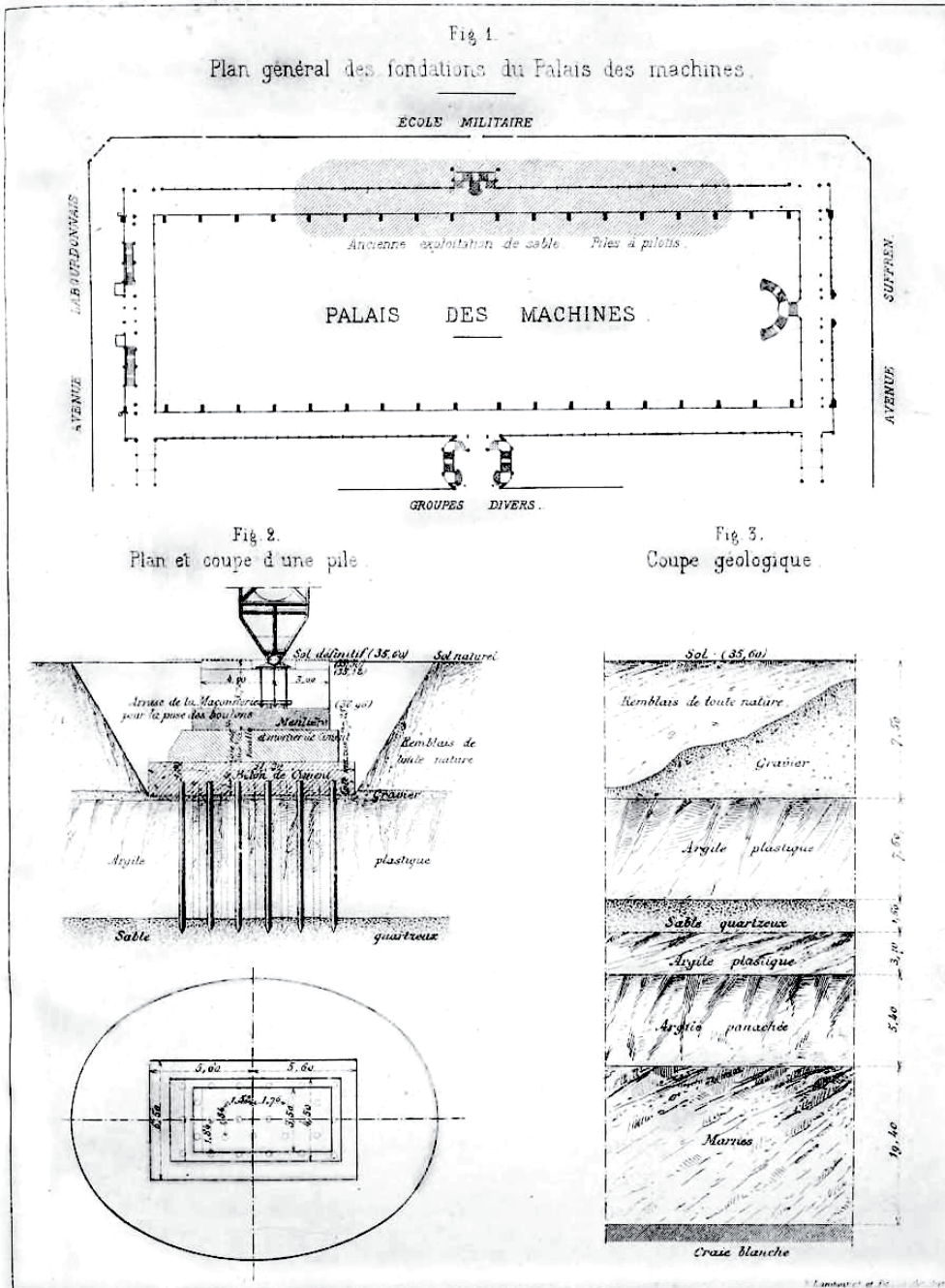
acción de la gravedad sobre la materia intuida ya milenio y medio atrás³⁶, aunque la planeidad de su trazado no se corresponde con las necesidades estructurales de las bóvedas comprimidas. Además, el del Palais des Machines es un arco triarticulado, una forma estructural inventada por los ingenieros alemanes C. Köpke y J. W. Schwedler en 1861³⁷, formada por dos semi-arcos rígidos descansados en el suelo sobre uno de sus extremos y recíprocamente apoyados en la otra extremidad. Su principal característica reside en que estos tres puntos de contacto, dos en la base y uno en la cúspide, se resuelven mediante rótulas. Esta triple articulación presenta importantes ventajas frente al arco rígido en lo que se refiere a su cálculo, a su respuesta frente a los movimientos provocados por los cambios de temperatura o los asentamientos diferenciales, y al contrarresto de los empujes laterales transmitidos a la cimentación³⁸.

En lo que se refiere al cálculo matemático de la estructura, existen diferencias notables entre el arco rígido, un sistema hiperestático, y el arco triarticulado, una tipología isostática. La naturaleza estática de la estructura tiene una importante repercusión en el cálculo de las reacciones y los momentos a los que se va a ver sometida, pues el sistema de ecuaciones utilizado para obtener dichos valores, necesarios para dimensionar correctamente los elementos de la estructura, resulta ser matemáticamente indeterminado en la estructuras hiperestáticas, mientras que en las estructuras isostáticas es determinado. Esto hace que el cálculo de una estructura isostática, mecánica y matemáticamente determinada, sea mucho más sencillo que el cálculo de una estructura hiperestática³⁹. Este hecho resultó ser determinante en la decisión de Víctor Contamin, Ingeniero en Jefe de las Construcciones Metálicas de la Exposición Universal de París de 1889, de descartar la propuesta inicial de Dutert de cubrir la gran nave central del Palais des Machines por medio de un arco rígido elíptico semejante al de la St Pancras Station de Londres. En su lugar propuso un sistema triarticulado, de cálculo mucho más sencillo⁴⁰. La celebrada elección de la estructura triarticulada con que se cubre el espacio no responde pues a una idea arquitectónica sino a una pragmática decisión relativa a su mayor o menor facilidad de cálculo. El cálculo no se limita a optimizar las características mecánicas de una forma

37. Antes de ser empleado en el gran Palais des Machines de 1889, el arco triarticulado había sido ya utilizado con éxito en varios puentes y estaciones ferroviarias de luz moderada construidos en Alemania y Austria. Además, coincidiendo con las primeras etapas del proyecto del Palais, Paul Bodin diseñó en 1887 un puente triarticulado sobre el río Viaur cuyo arco central cubre una luz de 220 metros, que se construye entre 1896 y 1902. Para una información más detallada sobre los precedentes del arco triarticulado ver: STAMPER, John, W.: The Galerie des Machines of the 1889 Paris world's fair en THORNE, Robert (ed): Structural Iron and steel, 1850-1900. Aldershot: Ashgate, 2000, pp. 270-272; PETERS, Tom F.: Building the nineteenth century. London: The MIT Press, 1996, p. 432 n. 119; DURANT, Stuart: Palais des Machines: Ferdinand Dutert. London: Phaidon, 1994, p. 21; y MIGNOT, Claude: Architecture of the 19th century. Fribourg: Evergreen, 1983, pp. 198-199

38. "Lo que se persigue es la estructura óptima a través del diseño de la directriz, de la solución a los empujes, del diseño de las piezas trianguladas para lograr una sección variable acorde a la distribución de esfuerzos, del diseño de los acuerdos para evitar concentraciones de tensiones y lograr un montaje sencillo y eficiente... un proceso que nos recuerda al perfeccionamiento de la catedral gótica". ARAUJO ARMERO, Ramón: Construir en acero: forma y estructura en el espacio continuo, en TECTÓNICA: monografías de arquitectura, tecnología y construcción. Nº 9: Acero (I), 4a Ed, Junio 2005. Madrid: ATC Ediciones, 2005, p. 6

39. "Los arcos principales del edificio no son excepcionales únicamente por su dimensión, sino también por su construcción triarticulada. Las conexiones en el centro y en los extremos de cada arco hacen que sean estáticamente determinados, hecho que permite un cálculo más preciso de las fuerzas que sobre ellos actúan. Una estructura es determinada si no tiene más de tres fuerzas a resolver: la vertical, la horizontal y la flexión. Un arco rígido es indeterminado porque tiene seis fuerzas a determinar: dos componentes verticales y dos horizontales, más un momento en cada extremo. Estas fuerzas son provocadas por el propio peso de la estructura y por las cargas del viento y la nieve. El grado de indeterminación en este caso es de tres porque hay tres fuerzas desconocidas de más en las ecuaciones del cálculo. (...) La introducción de articulaciones elimina los momentos y reduce el número de ecuaciones requerido para calcular la estructura". STAMPER, John, W.: The Galerie des Machines of the 1889 Paris world's fair en THORNE, Robert (ed): Structural Iron and steel, 1850-1900. Aldershot: Ashgate, 2000, p. 270



F.16. Detalles de la cimentación de los pórticos de la nave central. VIGREUX, Charles: *Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture*. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, lámina 1.

estructural previamente escogida en base a una determinada voluntad arquitectónica, sino que determina ya desde el inicio la elección del propio tipo estructural, que acaba finalmente por constituirse en forma arquitectónica. La forma sigue al cálculo.

Otra característica importante de este tipo de arcos es que su triple articulación permite que se produzcan movimientos en la construcción sin que éstos alteren el esquema de tensiones al que se ve sometida la estructura. Esta tipología permite la dilatación o la contracción de los dos segmentos de arco en sentido transversal, motivada por cambios importantes de temperatura, sin necesidad de disponer de juntas de dilatación y sin someter al arco o a la cimentación a esfuerzos adicionales ⁴¹. La triple articulación permite, además, que se produzcan asentamientos diferenciales en la cimentación sin que ello suponga la aparición de tensiones suplementarias en la estructura, hecho especialmente importante en el diseño del Palais des Machines si se tiene en cuenta la pésima calidad del suelo sobre el que debía construirse ⁴².

Importante es también la reducción de los empujes laterales que presenta el arco triarticulado con respecto al arco rígido. En cada uno de sus extremos el pórtico de la nave central del Palais transmite un esfuerzo axial de 412.000 kg a una zapata de cimentación formada por tres estratos pétreos diferentes. A fin de no someter al suelo a esfuerzos superiores a los que puede soportar, es necesario repartir el peso aumentando la superficie de contacto entre el terreno y la cimentación. A tal efecto, cada estrato de la zapata aumenta su dimensión con respecto al superior, hasta alcanzar los 11,20 metros de largo por 6,50 de ancho en la losa inferior de hormigón. En la mayoría de los casos la zapata se apoya directamente sobre un lecho de grava situado a siete metros y medio de profundidad, pero cuando este lecho no es lo suficientemente profundo es necesario recurrir también a la cimentación por pilotes hasta alcanzar un estrato de arena de cuarzo situado a quince metros de profundidad. Aunque la ausencia de momentos en la articulación de la base del arco reduce ostensiblemente la fuerza lateral que éste descarga sobre la cimentación, ésta debe hacer frente a un empuje de 120.000kg.

40. "[Dutert] propuso una cubierta de forma elíptica con apoyos encastados que resultó muy difícil de calcular a Contamin. Finalmente, la determinación estática de la configuración del arco triarticulado propició su elección; ello permitió a Contamin dimensionar los elementos estructurales utilizando una serie de cálculos que tuvieron en cuenta las fuerzas verticales y horizontales y los momentos que actuaban sobre el edificio". STAMPER, John, W.: *The Galerie des Machines of the 1889 Paris world's fair en THORNE, Robert (ed): Structural Iron and steel, 1850-1900. Aldershot: Ashgate, 2000, p. 266. Contamin prescribió también la utilización del arco triarticulado en otras construcciones de la exposición, como por ejemplo el Palais des Beaux-Arts et des Arts-Liberaux.*

41. "La estructura articulada [del Palais des Machines] permitió que la estructura se deformase por efectos de los cambios térmicos sin juntas de expansión, y sin causar tensiones secundarias en la estructura, la cimentación o la cubierta acristalada". PETERS, Tom F.: *Building the nineteenth century. London: The MIT Press, 1996, p. 278*

42. "El sistema de articulaciones tiene otra ventaja: que no modifica sensiblemente la repartición interior de los esfuerzos moleculares, en el caso de un leve asentamiento de la cimentación o de variaciones de temperatura". ALPHAND, Adolphe; GEORGES BERGUER, M.; ALFRED PICARD, M.: *Exposition Univeselle Internationale de 1889 a Paris. Monographie. Palais, Jardins, Construccions Diverses, Installations Génèrales. Paris: J. Rothschild, 1892-1895, Vol. I, p. 47*

43. *Entre 1845 y 1849 Victor Horeau desarrolló una propuesta que nunca se llevó a cabo para Les Grandes Halles de París. Se trataba de una gran estructura de directriz parabólica de 86 metros de luz cuyos empujes se pretendía contrarrestar por medio de enormes pilotes de plomo (ver GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición, 5a ed. Madrid: Dossat, 1978, pp. 237-238 y 269-267). Unos veinte años más tarde, el problema de los empujes en los arcos de la St Pancras Station, de menor luz que los proyectados por Horeau, se resuelve atando sendos apoyos de cada arco mediante cables subterráneos que, trabajando a tracción, evitan la separación de los soportes, una solución compleja y costosa (ver STAMPER, John, W.: The Galerie des Machines of the 1889 Paris world's fair en THORNE, Robert (ed): Structural Iron and steel, 1850-1900. Aldershot: Ashgate, 2000, p. 270).*



F.17. Visión del apoyo del pórtico sobre la articulación inferior. STAMPER, John, W.: *The Galerie des Machines of the 1889 Paris world's fair*.
En THORNE, Robert (ed): *Structural Iron and steel, 1850-1900*. Aldershot: Ashgate, 2000, p. 263

A fin de evitar tener que recurrir a pesados contrafuertes laterales o cables subterráneos traccionados entre soportes ⁴³, soluciones que sin duda hubieran complicado y encarecido la cimentación ⁴⁴, se confía el contrarresto de dicho empuje a la contención lateral de la tierra y al rozamiento entre la cimentación y el terreno, descentrando en sentido transversal hacia a fuera la zapata en relación al punto de apoyo del pórtico ⁴⁵.

Aunque la elección del arco triarticulado en el Palais responde únicamente a la necesidad de dar respuesta a determinadas dificultades de carácter estructural, permite también disponer la materia que cubre y soporta el espacio de un modo totalmente nuevo.

III.4.2.4. La nueva articulación entre la carga y el soporte

“Existe aquí un potencial incalculable. Todos los viejos conceptos están cambiando. Las relaciones entre carga y soporte han cambiado. Conseguir que enormes bóvedas descansen virtualmente sobre puntos es algo nuevo.” ⁴⁶

Friedrich Naumann

Desde el punto de vista de la comprensión arquitectónica de la gravedad a través de la forma estructural, el rasgo más llamativo del Palais des Machines es sin duda la manera en que se apoya la cubierta sobre el suelo. Cada medio arco descansa únicamente sobre la articulación de su base, concentrando todo el peso en un punto. Las excepcionales propiedades mecánicas del acero con que se conforma el perno de esta articulación permiten disponer de una cantidad de materia realmente reducida en comparación con las grandes dimensiones del pórtico. Esta condición inmaterial del apoyo queda enfatizada, además, por el progresivo ahusamiento del soporte desde una altura de dos metros y medio hasta alcanzar la cota del pavimento. De esta forma se libera de materia a la base del apoyo, una zona donde tradicionalmente se había concentrado siempre la mayor cantidad de masa del soporte estructural en reconocimiento a la natural disposición cónico-piramidal de la materia inerte bajo la acción de la gravedad ⁴⁷.

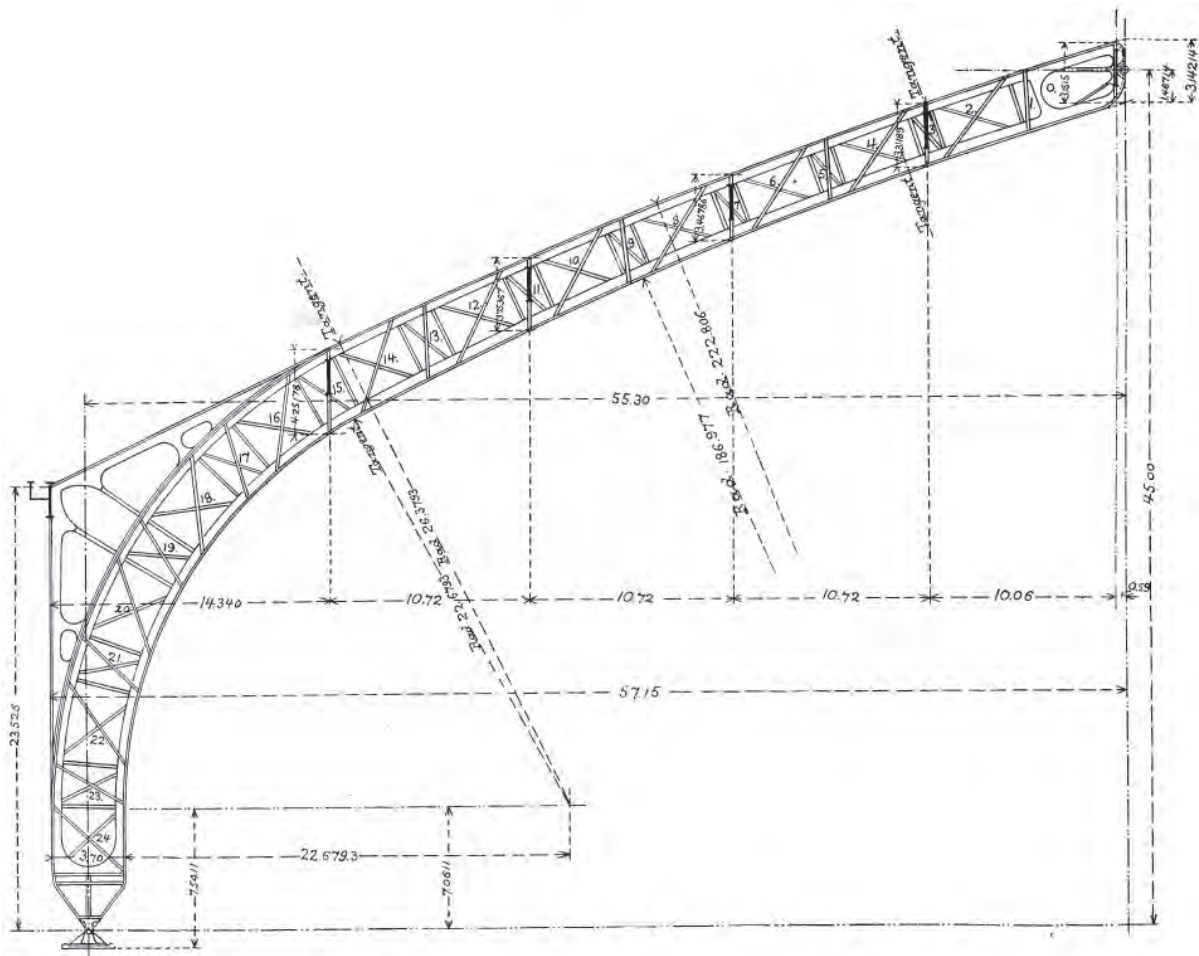
44. “Los constructores de la Galerie eligieron el arco triarticulado porque el subsuelo era inestable. Dispusieron la flexible Galerie sobre gruesos bloques de hormigón, algunos de ellos sobre pilotes de madera. Las articulaciones inferiores no transmitían momentos a la cimentación y acababan con la necesidad de bloques de cimentación excéntricos o barras tensadas bajo el suelo. Esto los hacía simples y más baratos que cualquier otra solución imaginable”. *PETERS, Tom F.: Building the nineteenth century. London: The MIT Press, 1996, p. 269*

45. Los datos aquí expuestos sobre la cimentación se han extraído de *ALPHAND, Adolphe; GEORGES BERGUER, M.; ALFRED PICARD, M.: Exposition Univeselle Internationale de 1889 a Paris. Monographie. Palais, Jardins, Construccions Diverses, Installations Gènèrales. Paris: J. Rothschild, 1892-1895, Vol. I, pp. 399-406.*

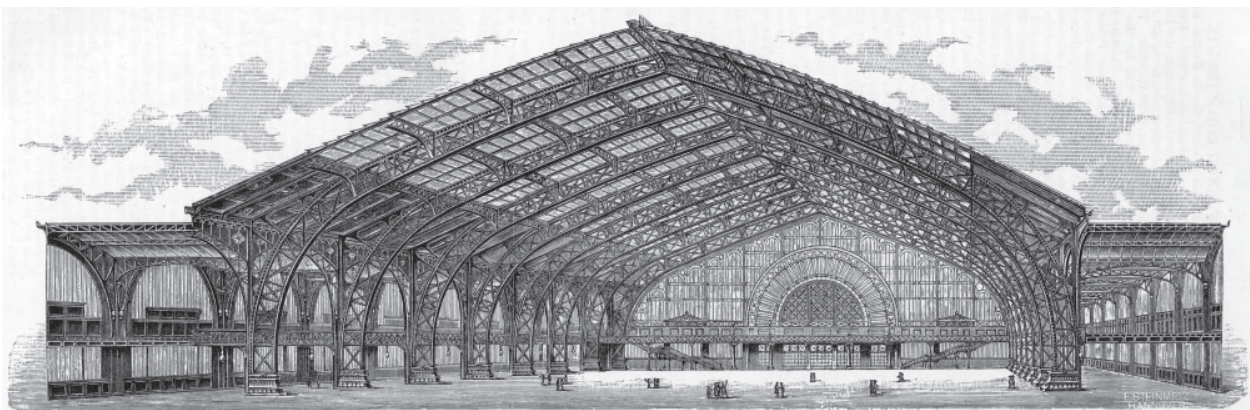
46. *NAUMANN, Friedrich: Die Kunst im Zeitalter der Maschine, 1904. Citado en la Introducción de Georgiadis en GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 27*

47. “Abajo, la cercha se estrecha hasta apenas tocar el suelo. Arriba, se expande, consiguiendo un gran impacto. Las proporciones usuales parecen exactamente invertidas, los sentimientos estáticos tradicionales perturbados e interrumpidos: ARCOS CON TRES ARTICULACIONES”. *GIEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 139*

48. “[La Galería de las Máquinas del 1889] fue insensatamente demolida en 1910. Su pérdida es consecuencia típica de la inestabilidad reinante en nuestra época. Sólo nos quedan unas pocas fotografías y grabados como testimonio de que durante el siglo XIX se había logrado, en forma magnífica, superar la acción de la gravedad, dando construcciones que parecían casi flotar (que es lo esencial en todos los problemas que a la cobertura se refieren)”. *GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. 255*



F.18. Pórtico acotado. E 1:400. www.flickr.com/photos/ya3hs3



F.19. Versión de con las articulación de la base del pórtico ocultas por peanas de madera.
 DURANT, Stuart: *Palais des Machines: Ferdinand Dutert*. London: Phaidon, 1994, p.17

La ponderación visual de la pesantez de cualquier cubrición estructural se establece, más o menos inconscientemente, en relación a la robustez del soporte, presuponiendo su sección proporcional a la carga y considerando la masividad de su parte inferior como una garantía de estabilidad. En este sentido, el peso real de la enorme cubierta del Palais des Machines se ve visualmente minorado por la delicadeza del apoyo sobre el que descansa, prácticamente reducido a un contacto puntual que, aun siendo verdadero, parece inverosímil.

Sin embargo, de manera análoga a cómo la basa de una columna clásica parece expresar el aplastamiento provocado por el peso soportado, el hundimiento de la cota inferior de la articulación en el pavimento parece responder al enorme peso de la estructura. Se produce así una cierta contradicción entre la ligera delicadeza del apoyo en su contacto con el plano del suelo⁴⁸ y la pesantez que parece revelar su encuentro constructivo con el terreno, contraposición capaz de provocar en el espectador la máxima impresión. A fin de apaciguar la incomodidad manifestada por algunos de los organizadores de la exposición en relación al diseño del apoyo articulado, Dutert tuvo que presentar una propuesta alternativa donde las articulaciones de las bases quedaban ocultas por decorativas peanas de piedra⁴⁹. Afortunadamente esta propuesta no prosperó y las articulaciones de la base quedaron finalmente expuestas.

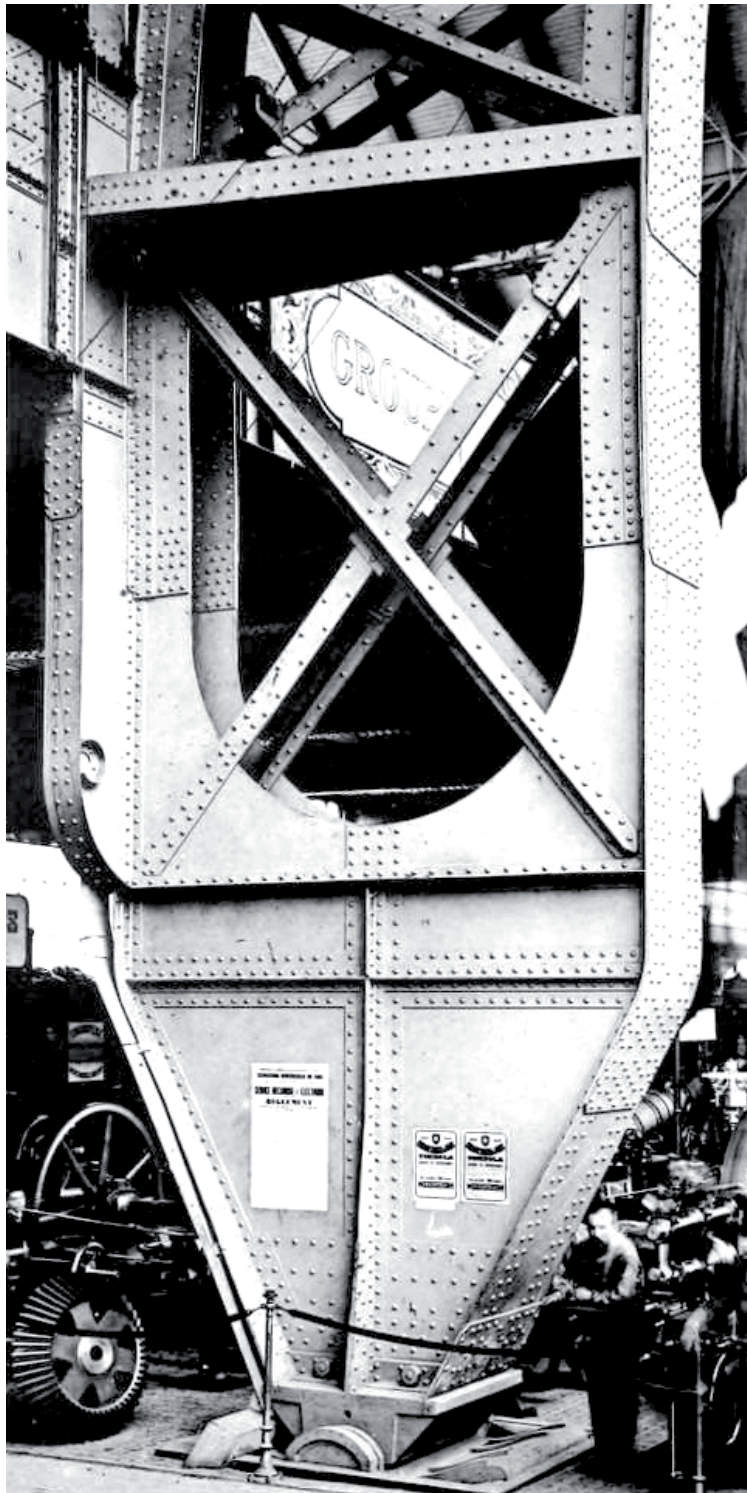
A medida que abandona la vertical y se curva hacia el vacío, el perfil del arco presenta un progresivo adelgazamiento de su sección, apenas perceptible⁵⁰, insuficiente en su misión de aligerar de manera efectiva el peso de la estructura. Más allá del sencillo recurso de la reducción de la sección, cada época ha desarrollado unos mecanismos de aligeramiento estructural propios que, en muchas ocasiones, han quedado ocultos al espectador⁵¹. En tanto que no es posible emplear hierro de distintas densidades en un mismo elemento, en la estructura metálica dicho aligeramiento se logra reduciendo el número y el grueso de las pletinas que lo conforman⁵². Es así como los arcos triarticulados del Palais aligeran la acción de la gravedad sin que apenas se perciba visualmente.

49. "En un determinado momento del proceso de diseño, Dutert preparó un dibujo alternativo donde las bases de los arcos estaban revestidas en piedra. Esto se hizo para apaciguar a los organizadores de la exposición que no se encontraban cómodos con el radical ahusamiento de la base de los pórticos y su articulación. Finalmente, sin embargo, Dutert y Contamin consiguieron que se aprobase su expresiva estructura". *STAMPER, John, W.: The Galerie des Machines of the 1889 Paris world's fair en THORNE, Robert (ed): Structural Iron and steel, 1850-1900. Aldershot: Ashgate, 2000, p. 266*

50. *La sección pasa de los 3,70 x 0,90 metros en la base, a una altura de dos metros y medio, a los 3,00 x 0,70 metros en la cúspide. Esta reducción de 70 centímetros en el canto del pórtico es apenas perceptible si se tiene en cuenta que la directriz del arco se prolonga unos 75 metros.*

51. *El aligeramiento el elemento estructural a través de la disminución de la sección se ha tratado a propósito de los menhires del Stonehenge y al analizar la sección del Pantheon. Igual que en el caso del Palais des Machines, en el Pantheon se observa una segunda estrategia de aligeramiento basada en la estratificación horizontal del elemento estructural empleado cada vez materiales más ligeros. Sobre esta cuestión en relación al Stonehenge, ver apartado III-2.4. Gravedad y luz como realidades contrapuestas; en cuanto al Pantheon, consultar apartado III-3.4.3. La mecánica gravitatoria del espacio estructural.*

52. "El proceso de producción limitaba el grueso de las pletinas. Los elementos más gruesos tenían 10 mm, pero muchos de ellos eran de sólo 7 mm de grueso. Cuando las fuerzas eran importantes, se disponían juntas hasta seis pletinas, fijadas mediante roblones. Una ventaja de la delgadez de estas pletinas es que los cambios en el grueso de la sección apenas se hacían perceptibles". *DURANT, Stuart: Palais des Machines: Ferdinand Dutert. London: Phaidon, 1994, p. 56*



F.20. Detalle de la base del pórtico en su apoyo sobre el suelo.

L. A. Barré, en VIGREUX, Charles: *Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture.*

Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, lámina 16.

Cada medio arco se eleva verticalmente hasta alcanzar la cota inferior del forjado de la planta piso, momento en el que empieza a curvarse con un radio interior de 22,67 metros. Esta curvatura se mantiene hasta alcanzar la viga longitudinal de cubierta, punto en el que la directriz continúa con una curvatura apenas perceptible, de 186,97 metros de radio interior. Esta leve curvatura se mantiene por más de treinta metros de proyección en planta hasta llegar a la altura correspondiente a la penúltima viga de la cubierta antes de llegar a la cúspide, momento en el que recupera su directriz rectilínea hasta apoyarse en la otra mitad del pórtico. Cada medio arco se constituye, pues, como una única forma estructural cuya directriz rebajada y apuntada permite encauzar la gravedad de manera continua y sin interrupción, hecho que parece eliminar la clásica distinción estructural entre la carga y el soporte ⁵³, expresada históricamente por medio de una discontinuidad mecánica, material, geométrica o direccional ⁵⁴.

Sin embargo, en el análisis de la relación entre carga y soporte en el arco triarticulado del Palais puede incluirse también la cimentación, que no por quedar oculta es inexistente. Aunque enterrada, la cimentación puede entenderse como el ineludible soporte pétreo de la gran cubierta metálica. En base a esta consideración puede recuperarse la dicotomía entre carga y soporte, siendo la zapata un elemento telúrico, pétreo, pesado, comprimido y oscuro, y la cubierta metálica autoportante un elemento ligero, luminoso y aéreo que se eleva a flexión sobre el suelo. Se preserva así la intrínseca oposición estructural que se da entre la gravedad y la luz, una relación de contraposición que se descubre inevitable si se tiene en cuenta que todo edificio necesita de algún tipo de cimentación sobre la que apoyarse y devolver a la tierra su gravedad. La operación realizada en el Palais no consiste pues en anular la relación entre carga y soporte por medio de la eliminación del soporte, sino en dotarla de una mayor sutileza ⁵⁵. Se aprovecha el hecho de que el soporte debe quedar naturalmente enterrado y oculto para diseñar un elemento de cubierta aparentemente autoportante que, por su continuidad geométrica y material, aparenta ser al mismo tiempo carga y soporte.

53. "Aquí la tectónica clásica, que había sido presentada siempre como un problema en la relación entre "soporte y carga", había sido superada. El espacio de pilares y columnas, en cuyo diseño del espacio arquitectónico estaba basada esta división, se había demostrado obsoleto como principal forma del diseño del espacio en la arquitectura. La jerarquía de ejes de expansión del sistema espacial clásico se había puesto boca abajo. La altura ya no era el eje dominante, sino la profundidad, la dirección del libre movimiento. La amplitud jugaba ahora un papel principal en la caracterización del espacio. El espacio unificado –Einraum, como lo denominó [Alfred Gutthold] Meyer- era una consecuencia de la cubierta auto-portante, que era posible sólo gracias a la construcción en hierro". *GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 34*

54. En el capítulo anterior se ha ahondado en las especificidades de la relación gravitatorio-estructural entre carga y soporte a propósito del Pantheon de Roma. Para un mayor detalle, consultar los apartados III-3.3. La forma de la gravedad clásica y III-3.4. El espacio estructurado por la curvatura de la gravedad.

55. "La historia de las exposiciones muestra no solamente la evolución en las construcciones en hierro, sino también importantes cambios en el sentido estético. El nuevo sistema estructural de resolver el problema de la carga y el soporte condicionaron también soluciones de un nuevo tipo estético. En el pasado la gente había sido formada con la idea de que, en un edificio, esta relación de equilibrio entre carga y soporte tenía que hacerse evidente a primera vista. En cambio, lo que ocurrió en la introducción de los nuevos métodos de construcción en hierro fue que se hizo cada vez más difícil la distinción entre carga y soporte, pues comenzó a afirmarse un nuevo sistema de equilibrio nivelador de todas las partes de una construcción". *GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. 253*

56. Para más detalles, ver el apartado III-3.3.1.

La tectónica de la estructura arquiteada.

57. LIPSUS, Constantin: Über die ästhetische Behandlung des Eisens im Hochbau. *Deutsche Bauzeitung*, 12(1878)72, pp. 163-66. Citado en la Introducción de Georgiadis en GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 13

58. "La importancia [del hierro] reside en su potencial para condensar enormes tensiones en dimensiones muy reducidas". GIEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 101

59. "Cuando los nuevos materiales de construcción -hierro y hormigón armado- asumen las formas de la gravedad y la "monumentalidad", están esencialmente mal empleados". GIEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 90

60. Ver apartado II-3.5.1. La gravedad, una fuerza universal.

61. Ver apartado I-3.2.1. Wren, arquitecto: la belleza de la luz y la estática estructural.

62. "Desde que la mecánica racional, a partir del siglo XVIII, encontró con sus aplicaciones vectoriales, campo abonado para desarrollarse en la técnica de la construcción, las estructuras trianguladas fueron dejando entrever mayores posibilidades, aun con la misma madera que siempre acusa el defecto de sus ensambles en tracción. (...) Y cuando el acero laminado acaparó el dominio de las estructuras, el desarrollo de la triangulación fue tan rápido, exuberante y atrevido como demuestran, entre tantos otros, la torre Eiffel y el puente de Firth of Forth". TORROJA MIRET, Eduardo: Razón y ser de los tipos estructurales (3a Ed). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007, p. 139

Por otra parte, si en este análisis se abandona el plano transversal y se incluye también la dirección longitudinal, la propia naturaleza unidireccional de la estructura refuerza la distinción entre carga y soporte. Las vigas que cubren longitudinalmente la nave y que soportan toda la subestructura de cubierta sólo pueden ser consideradas como una carga que, en último término, se transmite a un enorme soporte arqueado.

La manera en que se produce esta necesaria transmisión del peso de la viga al pórtico principal modifica la relación geométrica tradicional entre la carga y el soporte. El modo más sencillo de fijar la posición de un cuerpo a una determinada altura de la tierra consiste en disponer un elemento capaz de ofrecer un *plano de apoyo horizontal* sobre el que el cuerpo pueda posarse de manera estable. La satisfacción estructural de esta primitiva necesidad gravitatoria fue desarrollando con el tiempo una tectónica ricamente elaborada, en la que la unidad arquiteada clásica es probablemente su más refinada expresión. El conjunto formado por un arquiteado soportado por dos columnas posee la particularidad de que cada uno de los elementos de soporte ofrece, siempre, un plano de horizontal apoyo cuya superficie es mayor que la del plano de apoyo del elemento soportado. Así pues, el capitel de la columna no es más que la ampliación de la sección del fuste a fin de aumentar estructural y visualmente la superficie de apoyo sobre la que descansa el arquiteado. De igual manera, la unidad formada por el friso, el entablamento y el arquiteado no hace más que ampliar progresivamente la superficie de apoyo sobre la que descansarán visualmente de las vigas que conforman la cubierta⁵⁶. Así pues, en la unidad clásica la transmisión de la gravedad de la carga al soporte se produce por medio de un plano horizontal de apoyo que, al soportar el peso del elemento soportado, opone resistencia en la misma dirección de la gravedad pero en sentido opuesto.

No obstante, la tecnología propia de la estructura metálica hace posible una nueva relación entre la carga y el soporte que ya no tiene por qué producirse, necesariamente, a través de un plano horizontal de apoyo. Las nuevas técnicas de unión, primero el roblonado y después la soldadura, permiten fijar elementos estructurales metálicos en

cualquier plano y mediante una superficie realmente reducida. Como consecuencia, el elemento de cubrición puede transmitir su peso al soporte de manera tangencial, es decir, solamente por contacto a través de un plano vertical, sin riesgo de caída. Así ocurre, por ejemplo, en la transmisión del peso de la cubierta por parte de las vigas al pórtico articulado: en vez de disponerse apoyadas sobre el plano superior del pórtico, éstas se entregan directamente contra los montantes verticales de su canto. Las vigas no son de sección constante, pues la parte central es la más delgada y van ganando canto progresivamente a medida que se acercan a los extremos. Finalmente, cuando llegan al pórtico aumentan considerablemente su sección para quedar encajadas en el interior de la sección del pórtico. Visualmente quedan apoyadas sobre el perfil inferior del pórtico aunque, en realidad, desde un punto de vista mecánico no sería necesario tal apoyo. Aunque la técnica permite el contacto tangencial, el ojo sigue demandando aún la tranquilidad del apoyo horizontal.

Esta relación tangencial se repite en otras partes del Palais pero, sin duda, donde produce el mayor efecto es en el contacto entre el forjado de la planta piso de las naves laterales y el canto del gran pórtico arqueado. Al carecer de apoyo horizontal, y pese a las escuadras visibles a ambos lados de cada pórtico, el forjado parece en ese punto como suspendido en el aire y, al no precipitarse hacia el vacío, transmite una cierta sensación de ingrátida levedad.

III.4.2.5. La ligereza de la línea estructural

“La menor cantidad de material utilizado en el logro de los máximos resultados con la mínima dimensión, ¡el gran triunfo!”⁵⁷

Constantin Lipsus

Tal como se ha apuntado anteriormente, el hierro tiene la capacidad de concentrar grandes esfuerzos en secciones muy reducidas⁵⁸, lográndose con ello una respuesta mecánica máxima con un mínimo de materia. Tal como muestran las columnas



F.21. Columnas cruciformes metálicas de soporte del forjado perimetral de la planta primera. L. A. Barré, en VIGREUX, Charles: *Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture*. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, lámina 16.

63. "La ingeniería estructural se desarrolló gracias a los nuevos métodos de cálculo y a los nuevos sistemas productivos de la industria siderúrgica. Para hacer posibles los cálculos todas las partes de estructurales eran concebidas como elementos lineales: las fuerzas venían obligadas a seguirlos y a actuar en una dirección preestablecida con objeto de poder ser previamente controladas por medio de los cálculos. Los esfuerzos eran conducidos por medios de vigas, travesaños, o bien, por un sistema de tubulares. (...) Antes de 1890 este desarrollo ha llegado a su culminación con espléndidos puentes, con la Torre Eiffel y el Halle des Machines de 1889". GIEDION, *Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición* (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. XVI

64. *La teoría de los sistemas estructuras desarrollada por Heino Engel* (ENGEL, Heino: *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2006, P.139) resulta aquí especialmente esclarecedora. Entre los sistemas expuestos por el autor, interesan aquí tres: 1) el sistema de "sección activa", en la que la sección es la que resiste las fuerzas exteriores, siendo la viga su expresión más clara; 2) el sistema de "forma activa", en el que la transmisión de las fuerzas exteriores se confía al diseño de una forma adecuada, como ocurre con el arco; 3) el sistema de "vector activo", en el que la transmisión de fuerzas exteriores se realiza mediante un conjunto de barras, como ocurre con la celosía. Estos tres sistemas reflejan los tres modos de encauzar la gravedad que se han presentado hasta el momento en esta tercera parte de la presente tesis doctoral.

65. "En contraste con la arquitectura en piedra, cuyo objetivo era la creación de recintos espaciales, la construcción en hierro era una materia 'de contornos meramente lineales, de un esqueleto descarnado o de una trama abierta, en resumen, el soporte que transmite las energías y representa líneas de fuerza' [LUX, Joseph August: *Ingenieur-Ästhetik*. Munich: Lammers, 1919, p. 14]. Igual que Hofmann antes que él, Lux enfatiza la linealidad de la construcción en hierro como una marca esencial de este efecto estético". Citado en la Introducción de Georgiadis en GIEDION, *Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete*. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 32

cruciformes que soportan puntualmente los tramos intermedios de las escaleras y algunas zonas del forjado de la planta piso del Palais des Machines, esta cualidad se percibe como una excelente oportunidad para adelgazar hasta el extremo las secciones de las tipologías estructurales hasta entonces construidas en piedra, como los sistemas arquitebados clásicos o las formas abovedadas góticas, concebidas como un conjunto de elementos de cierto peso y dimensión, cuya forma y proporción responden con eficiencia a las características mecánicas específicas de la piedra, un material que si bien ofrece una gran resistencia a compresión, presenta una pobre respuesta mecánica a tracción. Pero, además de la capacidad de concentrar grandes tensiones, el hierro tiene la particularidad de presentar un óptimo comportamiento mecánico tanto a compresión como a tracción, una característica muy particular que difícilmente puede aprovecharse por medio de la imitación directa de las formas estructurales comprimidas⁵⁹. Al hierro le corresponde una tectónica propia y apropiada a su capacidad mecánica, que haga de la tracción la nueva protagonista del fenómeno tensional.

El hallazgo de esta nueva forma estructural solamente es posible gracias a una nueva manera de entender y concebir el fenómeno resistente. En el siglo XVII-XVIII se desarrolla la noción física de *fuerza* entendida como *magnitud vectorial*, un concepto matemático representado geoméricamente en el espacio euclidiano como un segmento de recta con un determinado módulo, dirección y sentido. Como ya se ha señalado, Isaac Newton basa su célebre Ley de Gravitación Universal en esta idea, concibiendo la gravedad como una fuerza vectorial de atracción mutua entre masas⁶⁰. Pero son Christopher Wren y Robert Hooke quienes aplican este constructo geométrico-matemático al diseño de la estructura⁶¹. La intuición y la experiencia dejan paso a las matemáticas y al cálculo, que en el siglo XIX alcanzan ya un elevado grado de sofisticación⁶².

En base a esta nueva noción geométrico-matemática, tanto el peso propio como las sobrecargas, así como el resto de fuerzas que actúan sobre la construcción, se identifican como fuerzas vectoriales que se transmiten a través de los elementos estructurales hasta

alcanzar la cota de cimentación. La reacción presentada por la estructura a la acción de estas fuerzas se representa, también, por medio de vectores. Este sistema vectorial de acciones y reacciones se aplica tanto al conjunto de la estructura como a cada una de sus partes, debiéndose cumplir en todo momento la condición de que la resultante de las fuerzas y momentos debe ser nula. Sólo así se considerará la estructura en equilibrio estático.

En el siglo XIX el tipo estructural capaz de hacer de la tracción la protagonista de un fenómeno tensional matemáticamente representado por vectores es la *celosía*. Trascendiendo su condición abstracta, el cálculo decimonónico se adentra en el ámbito de la forma arquitectónica y cada uno de los vectores matemáticos resultantes de la descomposición vectorial de las fuerzas que actúan sobre la estructura acaba por identificarse con una barra⁶³. La estructura entendida como conjunto de elementos masivos, pesantes y de una cierta dimensión que soportan la acción de la gravedad por medio de la sección y la forma, deja paso a una nueva concepción estructural basada en la acción solidaria de una gran cantidad de *barras* o elementos cortos, rígidos, rectos y de mínima sección⁶⁴.

La masa deja paso a la línea a la hora de resistir y encauzar la acción de la gravedad⁶⁵, puesto que se requiere una mayor cantidad de piedra que de hierro para construir el espacio. En efecto, mientras que las estructuras pétreas precisan de grandes secciones o enormes masas abovedadas que confieren a la estructura un peso considerable⁶⁶, la capacidad de las estructuras metálicas de encauzar la gravedad por medio de una adecuada disposición de barras de mínima sección permite reducir considerablemente la cantidad de materia estructural y, por tanto, su peso total⁶⁷. Es por esta razón que, a pesar de que el hierro en sí no pueda ser considerado un material ligero, ya que su densidad triplica a la de la piedra⁶⁸, la estructura en celosía metálica es comúnmente considerada como una construcción "ligera"⁶⁹. La masa deja paso al espacio, el aire y la luz, adquiriendo la nueva estructura portante una ligereza visual y real al mismo tiempo.

66. "La belleza de un edificio se debe parcialmente al hecho de que hay un superávit de materia más allá del material necesario para su soporte". *LUCAE, Richard: Über die ästhetische Ausbildung der Eisen-Konstruktionen, besonders in ihrer Anwendung bei Räumen von bedeutender Spannweite, en Deutsche Bauzeitung, IV. 1870, Núm. 2, 13.1.1870, pp. 9-12. Citado en la Introducción de Georgiadis en GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 11*

"El concepto de arquitectura está vinculado a la piedra. Pesantez y monumentalidad pertenecen a la naturaleza de este material, así como la división entre el soporte y lo soportado. Las grandes dimensiones que requiere la piedra son para nosotros normales". *GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 90*

67. "La técnica" sublimada como parte real de la idea de progreso tenía que ver con la racionalización de la construcción, con los principios económicos y, en última instancia, con la ligereza de los edificios y por lo tanto con su mayor o menor peso. Esto, que no es más que un problema reducible a términos económicos, alcanza la categoría de emblemática. Las fórmulas $CONSTRUCCIÓN \times PESO = MONUMENTALIDAD$ y $CONSTRUCCIÓN/PESO = TÉCNICA$ proclamadas por Hans Schmidt adquieren el valor de un manifiesto, según el cual los edificios deben optar por la ligereza, por la disminución del peso como condición inexcusable". *ARNUNCIIO PASTOR, Juan Carlos: Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 128*

68. Aunque la densidad del hierro depende de las sustancias que tenga aleadas, puede considerarse que está en torno a los 7.900 kg/m³, un valor que triplica los 2500 kg/m³ de densidad media de la piedra.

69. *El peso total de la estructura de la nave es de 7.713.832 kg, un valor en absoluto desdeñable. Datos extraído de VIGREUX, Charles: Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, p. 87*

70. "Los elementos cortos, rígidos y rectos, es decir, las barras, son elementos estructurales que, por su reducida sección en comparación con su longitud, sólo pueden transmitir solicitaciones que actúan en la dirección de las barras, es decir, fuerzas normales (tracciones o compresiones): barras a tracción y barras a compresión. Las barras traccionadas o comprimidas unidas de manera que formen un triángulo forman una unidad estable que, si se sustenta adecuadamente, puede transmitir diferentes cargas, incluso asimétricas, a los extremos. Las barras traccionadas o comprimidas colocadas y unidas de manera determinada para formar un sistema con nudos articulados forman mecanismos que pueden dirigir las fuerzas y transmitir las cargas a lo largo de grandes espacios sin pilares: sistemas de vector activo (vector = línea que representa la magnitud y el sentido de la fuerza). La característica de los sistemas de estructuras de vector activo es la triangulación. (...) Los sistemas estructurales de vector activo son conjuntos de barras cuya eficacia se basa en el comportamiento conjunto de los diferentes elementos que trabajan a tracción o a compresión". *ENGEL, Heino: Sistemas de estructuras. Barcelona: Gustavo Gili, 2006, p. 133*

71. "La triangulación puede mirarse como un elemento estructural más; tanto más interesante cuando se aplica, por igual, a la formación de casi todos los otros, sean soportes, vigas, arcos o pórticos. (...) La triangulación es una disposición especialmente apta para elementos que han de trabajar a flexión. Aún los que lo hacen fundamentalmente o exclusivamente en compresión, como los soportes, lo que buscan en la triangulación es el arriostamiento que evite la flexión parcial o total de sus elementos longitudinales y del conjunto de la pieza". *TORROJA MIRET, Eduardo: Razón y ser de los tipos estructurales (3a Ed). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007, p. 139*

Por su reducida sección en comparación con su longitud estas barras sólo pueden transmitir solicitaciones que actúen en su dirección, es decir, fuerzas normales de compresión o tracción⁷⁰. Estos elementos lineales se disponen formando agrupaciones triangulares estables en sí mismas y capaces de hacer frente, por medio de una correcta combinación de barras traccionadas y comprimidas, a cualquier tipo de solicitación externa. La posibilidad de combinar trianguladamente elementos a tracción y compresión hace de la celosía un tipo estructural especialmente indicado para resolver elementos de cubrición, pues en los elementos a flexión se combinan al unísono la compresión y la tracción. También es acertada su utilización en elementos de soporte, a fin de evitar la aparición de flexiones laterales provocadas por una inadecuada relación de esbeltez y compresión excesivas ⁷¹.

Pero el diseño matemático de los elementos en celosía es tan racional como poco intuitivo. El protagonismo de las tracciones y la multidireccionalidad de las barras dificultan la comprensión de su comportamiento mecánico en base a las leyes de la tectónica clásica ⁷². La noción de descenso de cargas se sustituye por la descomposición vectorial de las fuerzas en todas direcciones, y la clásica relación entre la carga y el soporte deja paso a una noción más amplia de *equilibrio* ⁷³, en la que se renuncia a los principios formales clásicos basados en cánones de proporción derivados de la figura humana como referencia de validez universal ⁷⁴.

La directriz sensiblemente arqueada de los grandes pórticos que cubren la nave central del Palais des Machines alude, sin duda, al intuitivo encauzamiento gradual de las cargas gravitatorias desde la clave hasta el apoyo. Pero el diseño de su alma en celosía cruzada elude la comprensión intuitiva de su comportamiento mecánico interno. Desde un punto de vista puramente estructural, la viga en celosía presenta ciertas ventajas con respecto a la viga de alma llena, pues al concentrar los esfuerzos en elementos independientes se aprovecha al máximo el material empleado sin riesgo de pandeo, hecho que supone una importante reducción del peso propio y un aumento exponencial de la luz libre de apoyos ⁷⁵. Pese a que la viga en

celosía precisa de mayor canto que la viga de alma llena, la posibilidad de que la luz la atravesase le confiere una mayor ligereza visual.

El alma del pórtico de la nave central del Palais no consta únicamente de una sección central, sino que se desdobra en dos planos paralelos situados a una cierta distancia del eje. Ambas almas están unidas transversalmente por dos pletinas macizas, que se constituyen en las alas superior e inferior de la viga. De esta manera se duplica la sección resistente, se rigidiza lateralmente la viga, y se aumenta exponencialmente su inercia, construyendo una viga cajón de entre setenta y noventa centímetros de ancho. Cada una de estas dos almas está formada a su vez por dos pletinas centrales macizas independientes, una en contacto con el ala superior y otra con la inferior. A cada lado de dichas pletinas se disponen varios perfiles en "T", cuyos extremos contactan paralelamente con la pletina inferior y la superior por medio del ala. Algunos de estos perfiles se disponen perpendicularmente a la directriz del pórtico y otros guardan una inclinación opuesta a ambos lados de cada pletina central, configurando un esquema en cruz. Así pues, el alma del pórtico está formada por dos cruces encuadradas y simétricamente dispuestas con respecto al eje de la viga.

La diagonalización en cruz es hiperestática y duplica el número de barras con respecto a una diagonalización simple, requiriendo más hierro y presentando una mayor complejidad constructiva. Pero su elección responde a la necesidad de prever una correcta respuesta mecánica del pórtico ante distintos estados de carga. Hubiera podido optarse por una diagonalización simple tipo Pratt, como la utilizada en las vigas de cubierta de la planta piso de las naves laterales o en la subestructura que soporta longitudinalmente la gran cubierta de la nave central, en las que los montantes verticales, más cortos, se someten a compresión y las diagonales, más largas, trabajan a tracción. Pero esta disposición de las barras solamente garantiza una correcta distribución de las tracciones y las compresiones cuando es sometida a cargas simétricas. Ante estados de carga asimétricos, provocados por ejemplo por sobrecargas parciales, movimientos diferenciales de la cimentación o movimientos térmicos, ambas partes del gran

72. "La descarnada delgadez y tedia rigidez de las partes estructurales; la adherencia del sistema al cálculo estructural; la uniformidad externa de los elementos que en general no permite reconocer las diferencias entre su carga (resistencia a la tensión o a la compresión); la confusa cantidad de entrecruzamientos, casi líneas incorpóreas en grandes construcciones, cuyo sentido y finalidad pueden ser entendidas sólo por un razonamiento técnicamente entrenado y no simplemente sentido; todo esto hace que la construcción en hierro se nos aparezca indiferente, incluso reconociendo, debemos admitir, que a menudo hay un cierto encanto estético en el contorno general de sus trabajos (puentes arqueados, la Torre Eiffel) o en el efecto de sus enormes interiores que sólo ellos hacen posible" : *STREITER, Richard: Architektonische Zeitfragen: eine Sammlung und Sichtung verschiedener Zeitfragen; mit besonderer Beziehung auf Prof. Otto Wagners Schrift "Moderne Architektur". Berlin: Cosmos, 1898. Citado en la Introducción de Georgiadis en GLEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 29*

73. *A propósito del Palais des Machines de Paris de 1889: "El esqueleto ha encontrado su verdadera forma. Un juego de enormes fuerzas que se mantienen en equilibrio. Pero no rígidamente, como la carga y el soporte, más bien, casi flotando. Se trata de un conjunto de barras en equilibrio audazmente dispuestas para soportar las fuerzas continuamente cambiantes. (...) Un elástico equilibrio es logrado con respecto a los cambios que se dan dentro de la estructura, fuera, y en la cimentación: equilibrio con respecto al cambio de su propia estructura molecular; equilibrio con respecto a las presiones externas (viento, nieve); equilibrio con respecto a las fluctuaciones superficiales (cimentación)". GLEDION, Sigfried: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 142*

74. "Para que se dé la idea de equilibrio ha de esta presente como posibilidad verosímil el fracaso de esa posición, deben de enfrentarse cuestiones que "luchen" entre ellas. Que sea estático pero que quepa la evidencia de que puede dejar de serlo. De otro modo habría estatismo o indiferencia. (...) Podría darse (se da de hecho con frecuencia) la paradoja de arquitecturas en condiciones de equilibrio estático que, por el contrario, presentasen desequilibrios notables en su composición. (...) En realidad el concepto de equilibrio es absolutamente moderno. Forma parte de la esencia, de los atributos inherentes a la modernidad. La renuncia a principios formales en los que la figuración y la simetría, la referencia a la figura humana y los cánones de proporción derivados de ésta constituirían las bases de un sistema lingüístico de validez universal, derivó, cuando se dislocó todo el sistema, en la exaltación, o mejor, en la utilización de nuevos parámetros, nuevos modos de reinterpretar la realidad, en los que conceptos como la abstracción sustituirían a la figuración; principios de economía formal y de autenticidad, a la retórica lingüística, y en los que se renunciaba a sistemas universales y se proponía cada obra como el ámbito de su propia legitimación". *ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, pp. 123-125*

75. "La viga triangulada no permite esbelteces tan grandes como las de alma llena (...); pero sí permite disminuciones de peso y, por tanto, aumentos de luz enormes (...) La viga de celosía conserva las cabezas de la viga maciza; pero el alma se descompone en dos familias de elementos, unos en compresión y otros en tracción, que absorben los fenómenos de esfuerzo cortante del alma. En la viga de alma llena de gran canto es frecuente que el material no pueda aprovecharse bien porque el pequeño espesor del alma facilita el pandeo. En la viga triangulada, este peligro se aleja porque la concentración de esfuerzos, sobre elementos independientes, permite dar a éstos mayor rigidez y disminuir el peso del conjunto, al mismo tiempo que facilita la construcción". *TORROJA MIRET, Eduardo: Razón y ser de los tipos estructurales (3a Ed). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007, pp.139-140*

pórtico triarticulado se deforman de manera desigual, pudiendo llegar a invertirse el esquema original de tracciones y compresiones en las barras del pórtico. Los delgados perfiles a tracción podrían verse sometidos entonces a fuertes esfuerzos de compresión, exponiéndose a contraproducentes pandeos y perdiendo su eficacia mecánica. A fin de prevenir esta posibilidad, se opta por duplicar el número de barras, todas ellas idénticas y dispuestas en cruz, de modo que sea cual sea el estado de cargas haya siempre una barra diagonal sometida a tracción en cada recuadro de la celosía. El conjunto de las barras gana así en esbeltez ⁷⁶.

Con ello se explica el motivo por el cual se opta por un esquema en cruz, pero no por qué en el diseño del pórtico se alternan cruces estrechas y cruces anchas ⁷⁷. Esta particular disposición responde a la voluntad de que las vigas Pratt que recorren longitudinalmente la nave para soportar la subestructura de apoyo del cerramiento de la cubierta, se entreguen perpendicularmente y guardando la vertical contra los montantes del alma del pórtico. Una disposición regular de cruces con un mismo intereje hubiera imposibilitado tal geometría, y las vigas longitudinales hubieran ido perdiendo, a medida que se acercasen a las naves laterales, su verticalidad. Estas vigas longitudinales guardan entre ellas una distancia en planta de 10,72 metros, quedando siempre entre ellas una cruz estrecha libre de viga pero, a pesar de la constancia de su separación en planta, la curvatura variable de la directriz del pórtico hace que la anchura de las cruces estrechas aumente progresivamente a medida que se acercan al suelo.

El Palais des Machines de 1889 se constituye en paradigma de un nuevo modo de encauzar la gravedad en la arquitectura decimonónica. Las nuevas necesidades funcionales y espaciales, las excepcionales propiedades mecánicas del hierro, los novedosos sistemas de cálculo estructural y la crisis de la comprensión newtoniana del fenómeno de la gravedad inducen, a lo largo del siglo XIX, a una nueva manera de concebir la estructura gravitatoria que hace posible la construcción de enormes espacios libres de apoyos intermedios. La forma arquitectónica se identifica con una

forma estructural que resulta de la optimización matemática de su función portante. La gravedad monumental desaparece de la forma arquitectónica y la masividad y la pesantez, atributos gravitatorios que cualificaron a la arquitectura durante milenios, se sustituyen por la esbeltez y la ligereza de un espacio inundado de luz.

III.4.3. EL DESCUBRIMIENTO DE UNA NUEVA LUZ

*“En la arquitectura, como también en la pintura, la luz material fue perdiendo cada vez más esa transparencia que hacía referencia a una luz mística y espiritual. Buena prueba de ello es la evolución de la construcción en hierro y vidrio. Nacida en los invernaderos –en los que la búsqueda de luz tenía una motivación aún eminentemente práctica, como más tarde ocurrirá con las fábricas, aunque por motivos prácticos completamente diferentes-, alcanza un significado simbólico extraordinario, para terminar después, involuntariamente, en una apoteosis de la luz natural del sol. La colosal sala de máquinas en vidrio de Dutert y Contamin, presentada a la Exposición Mundial de París de 1889, podría parecer, a alguien de espiritualidad trascendente, un templo de una desconocida religión de la luz. (...) Una enorme sed de luz se apodera del hombre, que ha perdido tanto la luz interior como la espiritual. Se exige la abundancia de luz natural y material: el culto a la luz de los “palacios de cristal”, del plein-air, de la fotografía; la completa iluminación de los espacios de vivienda (hasta un punto que hoy se vuelve a considerar pernicioso), el culto de los baños de sol y la transformación de la noche en día mediante la invención de nuevas fuentes de luz que rivalizan con el sol casi para superarlo. Todo ello, en el fondo, no es sino una compensación de una grave ausencia.”*⁷⁸

Hans Sedlmayr

Gracias a la larga sombra de su autor más que a la consistencia de la propia teoría, la concepción corpuscular formulada por Isaac

76. “En general, interesa mantener, dentro de límites aceptables, la esbeltez de las piezas; pero más especialmente las que han de sufrir esfuerzos axiales de compresión, que están, por tanto, expuestas a pandear. Por eso, puede ser preferible la viga Pratt que, a plena carga, trabaja con los montantes verticales, más cortos, en compresión, y las diagonales, más largas, en tracción (...). Claro que está que, para sobrecargas parciales no ocupando más que un trozo de la luz, los esfuerzos pueden invertirse y perderse buena parte de esa ventaja. Para evitarlo, se pensó en duplicar las diagonales con objeto de que siempre hubiese una, en cada recuadro, dispuesta a trabajar en tracción, y por consiguiente, ninguna de ellas necesitase ser resistente a compresión. Pero, la ventaja queda compensada con creces por el exceso en el número de barras; y además, el hiperestatismo de la estructura hace que las barras, que habrían de trabajar en compresión, aunque innecesarias para el equilibrio isostático, sufran realmente ese tipo de esfuerzo que la deformación les impone, y tiendan a pandear, perjudicando, con ello, los enlaces y el mismo trabajo de las otras piezas”. TORROJA MIRET, Eduardo: Razón y ser de los tipos estructurales (3a Ed). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007, p.142

77. “Los miembros diagonales de las cerchas forman un patrón donde se alternan inter-ejes más anchos y otros más estrechos, aumentando gradualmente la anchura de los inter-ejes estrechos. El objetivo de ello es proveer de elementos verdaderamente verticales capaces de recibir y fijar las vigas en celosía longitudinales de la cubierta”. DURANT, Stuart: Palais des Machines: Ferdinand Dutert. London: Phaidon, 1994, p. 56

78. SEDLMAYR, Hans: La luz en sus manifestaciones artísticas. Madrid: Lampreave, 2012, p. 39

Newton⁷⁹ se mantiene vigente durante todo el siglo XVIII sin que se produzca ningún avance significativo en el conocimiento físico de la naturaleza de la luz. Pero el siglo XIX nace ansioso de luz y una nueva revolución científica se propone iluminar las sombras de una teoría corpuscular que, a la luz de los nuevos descubrimientos, acaba por apagarse. A principios de siglo Thomas Young (1801) y Augustin Jean Fresnel (1826) demuestran que ciertos fenómenos lumínicos no pueden ser correctamente explicados en base a una noción corpuscular de la luz. Se desecha entonces la noción de rayo luminoso y la luz recupera su carácter ondulatorio-etéreo⁸⁰. No obstante, la demostración experimental de la inexistencia del éter por Michelson y Morley a finales de siglo (1882) pone fin a tres milenios de teorías físicas basadas en la existencia de un éter imperceptible. Invalidada la hipótesis etérea, acaba por imponerse la teoría ondulatorio-electromagnética sobre la naturaleza de la luz formulada por Michael Faraday (1831) y James Clerk Maxwell (1865)⁸¹. La física decimonónica invierte todo un siglo en redescubrir la naturaleza de la luz. A diferencia de la gravedad, en la que la invalidación de la teoría newtoniana se produce sin una teoría alternativa, la observación de insólitos fenómenos lumínicos y electromagnéticos induce a una nueva manera de comprender la naturaleza física de la luz y, en tan sólo un siglo, esta abandona su condición etéreo-corpuscular en favor de una nueva naturaleza ondulatorio-electromagnética.

En paralelo a este desarrollo científico la luz ve modificada también su condición arquitectónica, tanto en lo que se refiere a su relación con la estructura portante como en cuanto a su capacidad de cualificar y configurar el espacio arquitectónico. Cuestiones tan importantes como la noción de *luz estructural* o la reciprocidad entre ligereza y luminosidad se ven alteradas por una nueva relación entre la gravedad y la luz provocada por un ansia de luz sin precedentes en la historia de la arquitectura.

79. Ver apartado II-3.5.2. La luz corpuscular.

80. Ver apartado II-4.1.1.1. Young y Fresnel: de vuelta a la teoría ondulatoria de la luz.

81. Ver apartado II-4.1.1.2. Faraday y Maxwell: la luz como onda electromagnética.

Es inherente al hecho arquitectónico que allí donde la estructura manifiesta el peso de la gravedad no hay lugar para la luz, pues la opacidad de la materia pesante se opone al paso de la luz.

Presupuesta la opacidad de la cubrición espacial, la noción de “luz estructural”⁸² nace de la tensión entre la opacidad del muro, garante de la sombra interior, y la necesidad de introducir luz en ese mismo interior a fin de hacerlo mínimamente perceptible y habitable. Suponiendo la cubierta opaca, e inamovible la sección del soporte, esta luz estructural depende únicamente de la separación entre los apoyos, cumpliéndose que una mayor distancia entre soportes viene acompañada de una mayor luz intersticial. En este sentido, la estructura metálica puede considerarse una estructura de “gran luz”, en tanto que permite cubrir grandes espacios empleando una cantidad mínima de materia en la construcción del apoyo⁸³. Se obtiene así un espacio diáfano en cuyo interior, libre de soportes, fluye libremente la luz.

Pero lo cierto es que en la estructura decimonónica el aumento de la distancia entre los apoyos llega a alcanzar tal desproporción que se pierde la referencia entre la masa opaca del soporte y la luz libre intersticial⁸⁴. A ello hay que añadir, además, que la condición lineal de los elementos que configuran la propia estructura permite que la luz fluya libremente a través de las celosías sin apenas oposición. Por efecto de la difracción de la luz y bajo determinadas condiciones lumínicas ambientales, los elementos estructurales más esbeltos -como los cables o los tensores metálicos- pueden ver considerablemente mermadas las sombras por ellos proyectadas sobre las superficies inferiores. A medida que aumenta la distancia entre el elemento que se opone a la luz y la superficie donde ésta se proyecta, la sombra pierde progresivamente nitidez y se difumina hasta llegar incluso a hacerse imperceptible⁸⁵.

Todo ello no hace más que restar tensión a la histórica contraposición entre la opacidad de la masa gravitatoria y la luz estructural pues, penetrando libremente por todos lados, la luz consigue anular la opacidad de la materia y, también, su sombra. La doble condición *diáfana*⁸⁶ -en tanto que libre de soportes y lumínicamente transitiva- de la estructura metálica la convierte, efectivamente, en una estructura de *gran luz estructural*, aunque no en el sentido original de la expresión.

82. Ver apartado III-2.6. El nacimiento de la luz estructural.

83. Ver apartado III-4.2.2. El gran espacio diáfano: más espacio con menos materia.

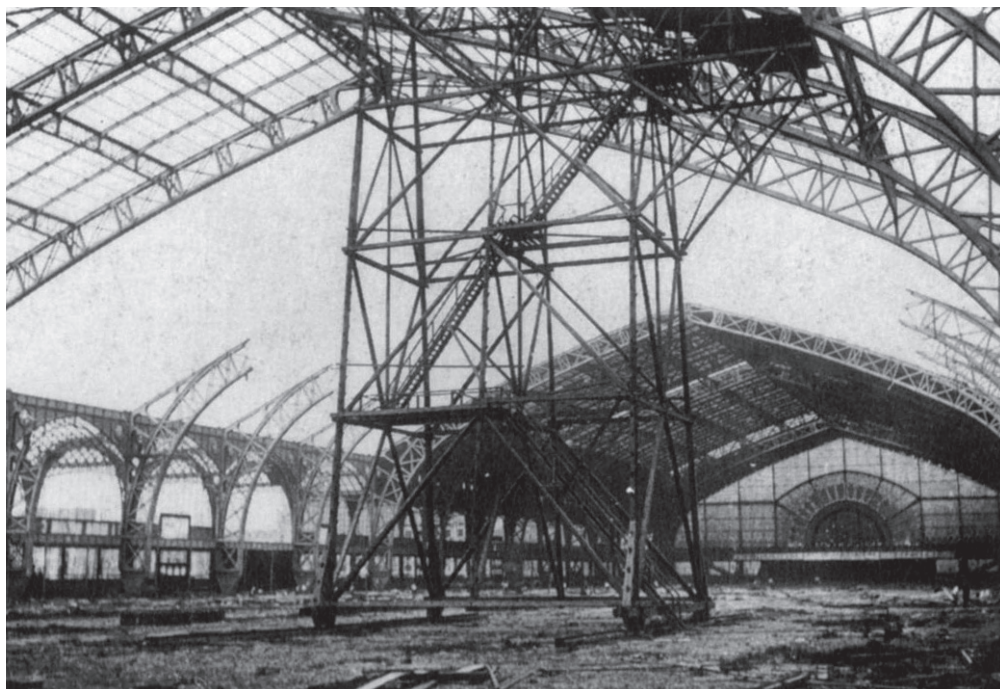
84. En los órdenes clásicos, el espacio libre entre columnas equivale aproximadamente a tres veces el diámetro de la columna. En cambio, en el Palais des Machines el canto del pórtico en la base es de 3,70 metros y la luz libre es de 106,9 metros, lo que da una relación de que casi supera en diez veces la proporción clásica.

85. “[Meyer] Habló del “espacio sin límites”, del “espacio luminoso” que acarrea la ausencia de sombras”. MEYER, Alfred Gutthold: Eisenbauten, ihre Geschichte und Ästhetik. Esslingen: Paul Neff, 1907, p. 49. Citado en la Introducción de Georgiadis en GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 34

86. Según la RAE, diáfano es “dicho de un cuerpo, que deja pasar a su través la luz casi en su totalidad”. En el ámbito de la arquitectura, está propiedad luminosa se identifica con aquellos espacios libres de soportes estructurales, lo que supone una muestra más de la intrínseca relación que existe entre la estructura gravitatoria y la luz con fines espaciales.



F.22. Espacio abierto definido por la sola estructura, abierta y permeable a la luz. Imagen tomada durante la construcción de la gran nave central. GIEDION, Sigfried: *Building in France, building in iron, building in ferro-concrete*. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 70



F.23. Estructura de la nave central durante su demolición.

DURANT, Stuart: *Palais des Machines: Ferdinand Dutert*. London: Phaidon, 1994, p.27

Por otro lado, la idea de *ligereza* adquiere en la estructura metálica un significado pleno. La ligereza decimonónica no sólo alude a la disminución real del peso de la construcción⁸⁷, sino que hace referencia también a su luz. El término “ligero” proviene precisamente del francés “léger” [luz], que a su vez deriva del latín “levis” [leve], vocablo opuesto a la palabra “gravis” [grave]. En consonancia con la física aristotélica, que concibe la luz como una realidad ingravida -y por tanto carente de peso⁸⁸-, la ligereza debe vincularse a la escasez de peso y, también, a la abundancia de luz⁸⁹, cualidades ambas que se dan conjuntamente en la estructura en hierro.

A lo largo de la historia la primera y primigenia dificultad de toda operación constructiva ha sido siempre resistir a la acción de la gravedad, soportando y dando cauce al peso de la masa a fin de construir el espacio. Inevitablemente opaca, esta masa gravitatoria se opone al paso de la luz, de modo que la introducción de la luz solar en el interior del espacio se supedita al diseño de la estructura portante. Durante siglos, aún en aquellas arquitecturas donde su manipulación alcanza un mayor grado de sofisticación, el diálogo con la luz es posible sólo una vez resuelto, con más o menos dificultad, el problema de la gravedad.

Pero el problema de la gravedad adquiere un nuevo matiz gracias el desarrollo de la tecnología estructural del siglo XIX, resultado de la necesidad de dar solución a las pragmáticas exigencias de la ingeniería civil. A pesar de que los requerimientos estructurales de la edificación son muy inferiores a los de las infraestructuras⁹⁰, los sistemas estructurales de origen ingenieril se van incorporando, progresivamente, al ámbito de la arquitectura. Concebidas y optimizadas para responder a solicitudes mecánicas mucho más adversas, aplicadas a la edificación estas estructuras permiten resolver los problemas gravitatorios de la arquitectura con cierta comodidad. Superados los límites mecánicos y espaciales de los tipos estructurales abovedados empleados en épocas anteriores, las estructuras concebidas a partir del siglo XIX parecen proporcionar un pleno dominio sobre la gravedad, que acaba por perder el peso específico que hasta entonces había tenido en el problema de la

87. Ver apartado III-4.2.2. El gran espacio diáfano: más espacio con menos materia.

88. Ver apartado II-2.1. Aristóteles: gravedad telúrica y luz etérea.

89. La vinculación de la luz a la noción de ligereza es evidente en la lengua inglesa, donde el término anglosajón “light” significa al mismo tiempo “luz, claridad” y “ligereza, levedad”.

90. Tal como se ha expuesto anteriormente, la luz entre soportes de algunos puentes contemporáneos al Palais des Machines de París de 1889 llegaban a quintuplicar la luz estructural de los pórticos de su nave central.

91. “La aspiración a la desmaterialización del “Palacio de Cristal” de Joseph Paxton, que Le Corbusier una vez describió como la victoria de la luz sobre la gravedad”. FRAMPTON, Kenneth: Labour, work and architecture: collected essays on architecture and design. London, Phaidon, 2002, p. 102

“En este salón [la nave central del Palais des Machines de 1889], por el hecho de que la luz entra a chorro limpio por la parte superior, desaparece la visión de todo trabajo estructural. Por lo que se refiere a la impresión óptica la bóveda aparece ante nosotros como si flotara o se mantuviera en el aire”. GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. 279

“Los sistemas de estructuras de vector activo, debido a su transparencia, expresan convincentemente la capacidad humana de inventiva para manipular las fuerzas y dominar la gravedad”. ENGEL, Heino: Sistemas de estructuras. Barcelona: Gustavo Gili, 2006, p. 133

92. "La segunda concepción espacial consideraba el espacio sinónimo de espacio excavado interior. A pesar de las profundas diferencias, esta segunda concepción espacial abarca todo el periodo desde el Panteón hasta fines del siglo XVIII. El siglo XIX constituye un eslabón intermedio. El análisis espacial de sus edificios indicaba que en él las fases precedentes del segundo estadio se entremezclan conjuntamente. Mas la unidad espacial precedente iba desapareciendo continuamente. Los edificios especialmente representativos, venían dispuestos en posición aislada sin vínculos espaciales". GIEDION, *Sigfried*: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. XXIX.

"La tercera fase de la evolución arquitectónica fue prefigurada en los comienzos del siglo XIX. Este siglo actuó como periodo de transición. En apariencia fueron empleadas indiscriminadamente todas las formas estilísticas, junto con medios de formación del espacio interior tomados de todas las épocas. Pero en las estructuras más anónimas de este siglo se hallan sugerencias e indicios que solamente podían adquirir contenido artístico y vida con la apertura de la tercera concepción espacial en los comienzos de nuestro siglo". GIEDION, *Sigfried*: El Presente eterno: una aportación al tema de la constancia y el cambio. Madrid: Alianza, 1981, p. 491

93. *Sobre la luz en la arquitectura como espacio interior ver apartado III-3.5. La luz como presencia espacial y ausencia gravitatoria.*

94. "¡Pobre terreno para el arte! No puede haber arquitectura monumental con barras de hierro fundido: su mayor ideal es la *arquitectura invisible!*". SEMPER, *Gottfried*: Ueber Wintergärten (1849), en *Kleine Schriften*. Berlin: Hans and Manfred Sempers, 1884, pp. 484-490. Citado en la Introducción de Georgiadis en GIEDION, *Sigfried*; GEORGIADIS, *Sokratis*: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 8

"La piedra cierra masivamente el espacio. Toda la anchura de muro soporta cargas. Las aberturas horizontales amplias contradicen su estructura. (...) La importancia [del hierro] reside en su potencial para condensar enormes tensiones en dimensiones muy reducidas. (...) El hierro abre los espacios. (...) Gracias a la condensación del material en unos pocos puntos, aparece una transparencia desconocida, (...), la creación de un espacio abierto y airoso, des combinaisons aériennes que Octave Mirbeau reconoció ya en 1889". GIEDION, *Sigfried*; GEORGIADIS, *Sokratis*: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, pp. 101-102

cubrición espacial. Y, una vez dominada y superada la gravedad, la luz adquiere un nuevo protagonismo y una libertad plena en el hecho espacio-estructural. La luz se impone a la gravedad ⁹¹.

Estos cambios en la relación estructural entre la gravedad y la luz inducen a una nueva concepción espacial. Sigfried Giedion reconoce esta nueva espacialidad decimonónica como una etapa de transición entre lo que él bautiza como la *segunda concepción espacial*, caracterizada por la construcción de un espacio interior en discontinuidad con el exterior, y la *tercera concepción espacial*, en la que se produce una total continuidad e interrelación entre el espacio interior y el exterior sin que el primero pierda su identidad propia ⁹².

Desde la época romana y durante casi dos mil años, la arquitectura se había identificado unívocamente con la noción de *espacio interior*, un espacio metafóricamente excavado en la masa construida. Introvertido y con apenas relación visual con el exterior, este espacio se delimita por medio de masivas y pesadas estructuras opacas que, convenientemente dispuestas, permiten controlar el ingreso de la luz solar. El encauzamiento estructural de la gravedad tiene como doble misión liberar el espacio de la masa e introducir en el interior una luz exterior que, convenientemente manipulada, se "arquitecturiza" y adquiere un carácter particular con el que cualificar el espacio construido. La finalidad de la arquitectura es, en último término, soportar la masa que delimita el espacio construyendo, al mismo tiempo, una luz propia en el interior de la sombra estructural ⁹³.

Pero el encauzamiento de la gravedad por medio de líneas de fuerza en celosía hace que la estructura deje de ser un límite infranqueable de contención espacial y oposición lumínica. El espacio construido por este tipo de estructuras ya no es un espacio introvertido y confinado en el interior de la masa mural y cupulada sino que, en total transitividad visual y lumínica con el exterior, se abre y se expande más allá de los delgados elementos que apenas lo delimitan⁹⁴. El espacio, antaño configurado por una luz "confinada" en una sombra interior, se ve inundado ahora por una luz "libre" procedente del exterior⁹⁵. Esta identificación lumínica del espacio

interior con el espacio exterior es sin duda la principal característica de esta nueva concepción espacial. La relación entre la luz y la sombra se invierte hasta el punto de que el espacio interior, antes cualificado por una sombra estructural donde se manifestaba una luz precisa y particular, se convierte en un espacio donde las sombras arrojadas por los esbeltos elementos estructurales se proyectan sobre un fondo dominado por la luz. Se construye, pues, un espacio lumínicamente exterior en el que la sombra estructural, hasta entonces protagonista del hecho espacial, se ve reducida por una luz que todo lo ilumina.

III.4.3.1. La luz vitrificada como cerramiento espacial

*“Ya no debería concebirse los sólidos de los edificios, sino más bien los vacíos que los envuelven; es decir, en lugar de tratar de hacer juegos de luz sobre las formas tridimensionales, se debe centrar la atención en el aire que circula a través de la construcción y, por su plenitud o exigüidad, crear reflejos, medias luces o reflexiones que hagan centellear al espacio como el fuego atrapado en los cristales de las lámparas cuando se cortan en diversidad de prismas”.*⁹⁶

Claude Mignot

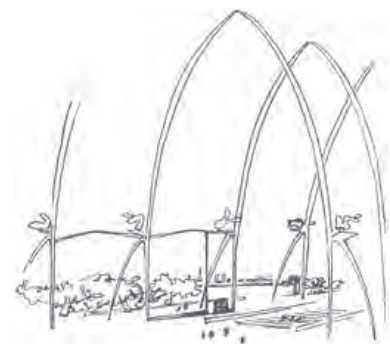
El muro y la cúpula se constituyen en masivos elementos laminares que, durante más de milenio y medio, soportan y encauzan la gravedad, se oponen al paso de la luz y delimitan el espacio interior protegiéndolo de los agentes exteriores. En cambio, la capacidad de la nueva estructura metálica de encauzar linealmente la gravedad sin apenas oponerse al paso de la luz permite definir el espacio sin contenerlo visualmente. Así conformado, el espacio pierde las cualidades perceptivas, lumínicas y ambientales propias de un interior⁹⁷.

La necesidad de proteger el espacio arquitectónico de los agentes atmosféricos exteriores hace necesaria la participación de un elemento constructivo ajeno al sistema portante: el *cerramiento*. La

95. Se utiliza aquí la terminología empleada por Leonardo Da Vinci en su *Tratado de la Luz*, donde distingue entre la luz “confinada”, una luz interior, propia, precisa, particular... de la luz “libre”, la luz solar exterior: “Trataré, en primer lugar, de las luces proyectadas a través de ventanas, luces a las que llamaré confinadas; después, de las luces de la campiña, a las que llamaré luces libres, y por fin, de la luz de los cuerpos luminosos”. DA VINCI, Leonardo; GONZÁLEZ GARCÍA, Ángel (ed): *Tratado de pintura*. Madrid: Akal, 1986, p. 165

96. MIGNOT, Claude: *Architecture of the 19th century*. Fribourg: Evergreen, 1983, p. 211

97. Los dibujos de estructuras tubulares cubriendo grandes espacios públicos que ilustran el texto “Monumentality” (1944) de Louis I. Kahn reflejan a la perfección la esencia de esta abierta espacialidad. Por su parte, el Millennium Park de Chicago, proyectado por SOM Architects (Skidmore, Owings & Merrill) entre 1999-2002, se constituye como un magnífico ejemplo construido de una estructura metálica lineal que “cubre” o “define” un espacio exterior sin cerrarlo.



F.24. Estructuras tubulares de acero de Louis I. Kahn. KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid: El Croquis, 2003, p. 27



F.25. Cubrición del Millennium Park de Chicago, diseñada por SOM Architects (Skidmore, Owings & Merrill) en 1999-2002.



F.26. Nave central vista desde la planta baja. La ausencia de sombras arrojadas se debe al carácter difuso de la luz, obtenido por el estriado interior y el blanqueado del vidrio de cubierta. <http://expos-expos.blogspot.co.uk>



F.27. Vista de la nave central vista desde la planta primera. <http://paristeampunk.canalblog.com>

combinación de una estructura portante, encargada de encauzar la gravedad, y un cerramiento espacial, cuya misión es delimitar y proteger el espacio, ha sido una fórmula constructiva utilizada desde los orígenes mismos de la arquitectura. Pero, mientras que a lo largo de la historia la envolvente ha sido conformada siempre por un material opaco a fin de aislar el espacio interior de la luz exterior, la nueva espacialidad decimonónica demanda un cerramiento diáfano y transparente capaz de conservar intactas las cualidades lumínicas y visuales del espacio definido solamente por la estructura metálica. Y, en el siglo XIX, el material capaz de proteger el espacio de los agentes externos sin comprometer su cualidad lumínica es el vidrio⁹⁸.

Esta conjunción del hierro como material estructural y del vidrio como material diáfano de cerramiento es lo que hace habitable la nueva espacialidad decimonónica⁹⁹. Abandonándose la gravedad opaca del muro estructural en favor de la ligereza transparente del diafragma no portante¹⁰⁰ se consigue, por primera vez en la historia de la arquitectura, que el espacio no deba exponerse a la intemperie para permanecer totalmente abierto a la luz. El vacío acristalado mantiene las cualidades homeostáticas de un interior pero adquiere las propiedades lumínicas de un exterior. Se trata, en definitiva, de un *interior exteriorizado*.

Conocido ya desde antiguo, el vidrio ha despertado siempre la máxima fascinación entre físicos y arquitectos. Su solidez aún en un mismo elemento la inherente pesantez de la materia y la diafanidad propia de la luz¹⁰¹. El vidrio se obtiene calentando el sílice, el material que constituye la arena o el cuarzo, hasta que se licúa en una masa incandescente que, al enfriarse siguiendo un proceso controlado, endurece sin cristalizar. Se obtiene así un material de estructura molecular amorfa, en la que sus moléculas no se disponen de manera alineada. Pero, aunque posea la estructura molecular de un líquido, su elevada viscosidad lo mantiene cohesionado como si de un sólido tratase. Tal como lo definió Isaac Newton, el vidrio no es más que arena fundida¹⁰², pero posee una naturaleza material ambigua que le proporciona esa sólida pero frágil transparencia que lo caracteriza¹⁰³.

98. Debido a esta permeabilidad lumínica, el vidrio protege al espacio de todos los agentes exteriores menos de la luz misma. La luz solar está compuesta por radiación ultravioleta en un 3%, radiación visible en un 53% y radiación infrarroja en un 44%, cada una de las cuales tiene una longitud de onda distinta. Transparente a la radiación infrarroja de onda corta, al calentarse el vidrio emite radiación infrarroja de onda larga hacia el espacio interior. Esta radiación infrarroja de onda larga no es capaz de atravesar de nuevo el vidrio, de modo que queda capturada en el interior elevando significativamente su temperatura. Eso es lo que se conoce como efecto invernadero, y es probablemente uno de los principales problemas de la arquitectura de cristal. (Datos extraídos de RODRIGUEZ CHEDA, José Benito; RAYA DE BLAS, Antonio: *Arquitectura de vidrio*, en *TECTÓNICA: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*. Nº 10: *Vidrio (I)*, 3ª Ed, Junio 2004. Madrid: ATC Ediciones, 2000, pp. 9-13).

99. "El vidrio está destinado a jugar un importante papel en la ARQUITECTURA DE METAL". GIEDION, Sigfried: *Building in France, building in iron, building in ferro-concrete*. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 102

"El hierro y el cristal fueron dos materiales cuya conjunción, en la arquitectura del siglo XIX, condujo a soluciones nuevas. Fue Fontaine quien, unos años después de que el puente colgante se hubiera afianzado, combinó estos dos materiales en todos los edificios de alguna importancia". GIEDION, Sigfried: *Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición* (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. 181

"Desde siempre, el acero –primerero hierro forjado– ha estado vinculado al vidrio, no sólo por la sinceridad de ambos materiales, sino porque los dos, en una búsqueda que no se ha abandonado desde el Crystal Palace, han sido aliados históricos para conseguir la ligereza que un cerramiento transparente debe transmitir". AAVV. *Naturalidad del acero*, en *TECTÓNICA: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*. Nº 9: *Acero (I)*, 4a Ed, Junio 2005. Madrid: ATC Ediciones, 2005, p. 1

"Y es curioso, o no tan curioso, que los dos inventos tecnológicos que han hecho posible la revolución en la Arquitectura estén en relación directa con la Luz y la Gravedad: el vidrio plano en grandes dimensiones y el acero sólo o armado al homigón". CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 79. *Idea, luz y gravedad, bien temperadas: Sobre las bases de la Arquitectura*, 1995

A lo largo de la historia los físicos que no concibieron la luz como una cualidad el medio etéreo se encontraron con la necesidad de indagar sobre su posible condición material. La dificultad de describir con acierto los fenómenos de la luz en su interacción con los cuerpos materiales dio lugar a un sinnúmero de teorías en las que la luz fue concebida como una suerte de sustancia, cuerpo o materia de características ciertamente especiales, raras y únicas. Esta ambigüedad material permitió desarrollar la idea de que entre la luz y la materia podía existir una cierta relación de reciprocidad, siendo Newton el primero en plantear abiertamente la posibilidad de que la materia pudiera convertirse en luz y viceversa. Tres siglos más tarde Einstein formuló matemáticamente esta equivalencia a través de su célebre fórmula $E=mc^2$, en la que la masa -materia- y la energía -luz- fueron representadas como dos formas distintas de una misma realidad ¹⁰⁴.

Probablemente bajo la influencia de estas ideas científica, la luz adquiere también en el ámbito de la arquitectura la categoría de *materia inmaterial*, sin duda el más precioso y preciado material de construcción de cuantos intervienen en la configuración del espacio ¹⁰⁵. A su vez, la materia ordinaria con que se construye la arquitectura es concebida por algunos como luz agotada o consumida ¹⁰⁶. Igual que en el ámbito de la física, en la teoría arquitectónica moderna se establece también una relación de equivalencia entre la luz y la materia ¹⁰⁷. Al aunar la pesantez y la solidez de la materia con la transparencia de su pasado luminoso el vidrio deviene entonces en la muestra palpable de una poética fosilización material de la luz.

La transparencia es una propiedad óptica de la materia que permite el paso de la luz y la visión a través de la masa. Al no remitir imagen alguna al observador, el cuerpo transparente deviene invisible. Esta particular relación entre la materia y la luz, articulada a través de propiedades tan asombrosas como la diafanidad, la transparencia o la invisibilidad, ha maravillado desde siempre al ser humano ¹⁰⁸. Aprovechando estas propiedades ópticas el nuevo cerramiento vítreo se concibe desde un inicio como un cerramiento espacial que aspira a la invisibilidad. Sin embargo, incluso cuando el vidrio se encuentra libre

100. "El muro puede convertirse en una transparente piel de vidrio. El diseño de muros de carga se convierte en una farsa intolerable. Esto lleva a nuevas leyes de diseño". GIEDION, Sigfried: *Building in France, building in iron, building in ferro-concrete*. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p.101

101. "En el mundo de la materia, el elemento más afín a la luz es el cristal. El cristal puro es una fuente de clara y transparente luminosidad, el cristal reluce desde su interior". JOHANNES VON ALLESCH, Gustav: *Die ästhetische Erscheinungsweise der Farben*. Berlín: J. Springer, 1925. Citado en SEDLMAYR, Hans: *La luz en sus manifestaciones artísticas*. Madrid: Lampreave, 2012, p. 21

102. "Vidrio vulgar (es decir, arena fundida)". NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): *Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*. Madrid: Alaguara, 1977, p. 241

de elementos externos que puedan comprometer su transparencia -como la suciedad, el polvo o las condensaciones-, y aún contando con una composición interna que no le imprima coloración propia alguna, la transparencia total resulta inalcanzable. Por pequeña que sea, existe siempre una pequeña porción de energía visible en forma de luz que no atraviesa el cuerpo transparente y que se refleja en la superficie del vidrio. En determinadas ocasiones, cuando la posición relativa entre el ángulo de incidencia de la luz sobre el plano acristalado y la línea de visión del observador lo permite, es posible vislumbrar en la superficie vítrea algún destello, brillo, reflejo o sombra capaz de delatar su presencia. Es la propia luz la que, según cómo, revela la existencia del cuerpo transparente, convirtiéndose la envolvente vítrea en un elemento que está y no está al mismo tiempo¹⁰⁹. Aunque sea sólo en sentido figurado, la cristalina membrana semi-transparente que se constituye en cerramiento espacial parece hecha sólo de luz, una luz como solidificada o vitrificada capaz de contener el espacio luminoso, convertido casi en una densa atmósfera de luz etérea ¹¹⁰.

III.4.3.2. De luz estructural a luz desestructurada

*“La luz arquitectónica pervive sólo en los edificios que procuran todavía la definición del interior: sin preservar este interior, el espacio arquitectónico se enfrenta de nuevo al desamparo del mundo solar. Los nuevos objetos más prodigiosos de la tecnología reciente consiguen controlar la luz del sol, administrarla, pero no agotan la belleza de que es capaz la luz arquitectónica”.*¹¹¹

Marta Llorente Díaz

La arquitectura como espacio interior se fundamenta en la posibilidad de aislar una porción de luz para modificar sus cualidades a fin de configurar el espacio construido. En tanto que materialmente opaca y gravitatoriamente ineludible, la estructura se convierte en el primer y más importante elemento de control de la luz. Envolviendo el espacio con su opacidad, lo aísla de la luz exterior y construye una sombra interior. Además de esta primera selección cuantitativa, se

103. “La estructura molecular del vidrio (arena de sílice, carbonato de sodio y caliza) no es cristalina, sino que forma una red amorfa, por lo que algunos investigadores han definido el estado vítreo como el de un líquido sub-enfriado con una viscosidad tan alta, que parece sólido”. ARAUJO ARMERO, Ramón: Construir en acero: forma y estructura en el espacio continuo, en *TECTÓNICA: monografías de arquitectura, tecnología y construcción. Nº 33: Rehabilitación: la arquitectura moderna*, Junio 2010. Madrid: ATC Ediciones, 2010, p. 25

“El cristal mismo es un material bastante extraño y maravilloso. Sólido como la piedra, pero transparente como el aire. El cristal permite que la luz pase a través de él sin obstáculos. Es exactamente un líquido, más no un fluido. Es decir, la estructura molecular del cristal es como la de un líquido (agua, por ejemplo), en el que las moléculas no están alineadas rígidamente unas con otras en una estructura de rejilla. En los sólidos normales, como el marco de metal de una ventana, las moléculas están ajustadamente organizadas. (...) Aunque a nivel molecular el cristal es realmente un líquido, para todos los fines prácticos la materia se comporta como un sólido. No fluye como un líquido a la temperatura ambiente ordinaria; los científicos dicen que tiene la viscosidad de un sólido. (...) El vidrio se crea calentando sílice, el material que constituye la arena, hasta que se licúa. Determinados aditivos se mezclan con el sílice para darle fuerza y, cuando se desea, color. Después, el líquido caliente e incandescente se enfría rápidamente. Se vuelve duro, aunque no cristaliza. El «líquido» se solidifica en una sustancia que permite que la luz pase a través de ella. El vidrio se origina de forma natural cuando el magma caliente y fundido procedente del interior de la Tierra es arrojado a la superficie y se enfría con tal velocidad que el sílice no puede cristalizar. La obsidiana es el resultado: vidrio natural. Algunas rocas volcánicas son parcialmente vidriosas”. BOVA, Ben: Historia de la luz. Madrid, Espasa Calpe, 2004, pp. 201-202

104. En la segunda parte de la presente investigación, “II-La gravedad y la luz como fenómenos físicos”, se exponen las principales teorías formuladas a lo largo de la historia en base a una concepción materialista de la luz, así como la posible reciprocidad o equivalencia entre la luz/energía y la materia/masa.

105. "Hay ciertos materiales, que se denominan de construcción, cuyas cantidades y calidades se especifican y precisan antes de que hayan comenzado a levantar los cimientos. Pero además la arquitectura cuenta con otro que construye el espacio y nos viene dado. La luz. La luz es un material muy especial en el trabajo arquitectónico". VALERO RAMOS, *Elisa*: La Materia intangible: reflexiones sobre la luz en el proyecto de arquitectura. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004, p. 47

"La luz es el material más hermoso, el más rico y el más lujoso utilizado por los arquitectos". CAMPO BAEZA, *Alberto*: Pensar con las manos. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 69. Light is much more: Sobre la luz, 2008

106. "¿Qué son los materiales? He llegado a la conclusión de que los materiales son luz utilizada (es mejor llamarla así que decir luz agotada, porque esto evoca la idea de que es hora de irse a la cama); quiero decir que la luz se ha consumido con el fin de convertirse en un material. Si tenemos esto en mente, comprenderemos que todo es luz utilizada: las montañas, el aire, el agua, incluso nosotros mismos, que formamos parte de la naturaleza". KAHN, *Louis I.*; LATOUR, *Alessandra* (Ed.): Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas. Madrid: El Croquis, 2003, p. 356. La armonía entre el hombre y la arquitectura, 1974

107. Sobre la ambigüedad material de la luz y la equivalencia entre luz y materia en la arquitectura, ver el anexo final de la presente tesis doctoral "La ambigüedad material de la luz", donde se compendian citas y referencias bibliográficas de reconocidos arquitectos sobre esta cuestión.

108. "La transparencia siempre ha sido una cualidad misteriosa para nosotros". ARNUNCIOPASTOR, *Juan Carlos*; LINARES DE LA TORRE, *Oscar* (ed): La luz es el tema (entrevista); en DIAGONAL 30, diciembre 2011. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2011, p. 25

"Es difícil explicar el atractivo del vidrio, parece operar sobre el espíritu humano casi como una obsesión. Si obedeciese a un único motivo, tendríamos que decir que éste es la transparencia, o dicho de otro modo, su relación con la luz". RODRIGUEZ CHEDA, *José Benito*; RAYA DE BLAS, *Antonio*: Arquitectura de vidrio, en TECTÓNICA: monografías de arquitectura, tecnología y construcción. Nº 10: Vidrio (I), 3ª Ed, Junio 2004. Madrid: ATC Ediciones, 2000, p. 4

produce también una modificación cualitativa de la luz que consigue penetrar hacia el interior por entre los intersticios de la estructura, primero a su paso a través de las aberturas y luego al reflejarse en las superficies interiores. Aunque físicamente idéntica a la luz solar, una vez en el interior esta luz adquiere un carácter arquitectónico propio y apropiado al espacio que revela y configura. La construcción de esta particular iluminación deviene en motivo y fin último de la arquitectura como espacio interior ¹¹².

La cantidad de luz introducida en el interior del espacio a través de los intersticios de la estructura se ha supeditado siempre a la resolución de los problemas gravitatorios. De hecho, desde la época romana ha existido siempre una voluntad de dominio de la gravedad a través de la estructura, no sólo para conseguir construir espacios más grandes, sino también para aumentar los huecos estructurales a fin de configurar entradas de luz cada vez de mayor dimensión. A partir del Renacimiento este aumento de las aberturas se acompaña de la idea de que la calidad de la iluminación del espacio interior depende de la cantidad de luz natural que lo configura, idea que comparten los estilos arquitectónicos que se suceden.

El desarrollo de las posibilidades estructurales y constructivas de finales del siglo XVIII y principios del XIX apunta precisamente en esta dirección. Las nuevas tipologías en hierro consiguen encauzar la gravedad cubriendo grandes espacios con una mínima cantidad de materia, combinando así la máxima ligereza con la mínima oposición al paso de la luz del sol. Por su parte, el vidrio como material de cerramiento transparente permite proteger el espacio construido de los agentes exteriores sin afectar apenas el comportamiento lumínico del nuevo espacio.

Las posibilidades de esta combinación de hierro y cristal son inicialmente desarrolladas en los invernaderos, construcciones cuya principal finalidad reside en captar la máxima cantidad de luz y acumular su calor a fin de construir cálidas atmósferas que permitan el cultivo de especies vegetales originarias de latitudes tropicales. A pesar de no ser consideradas inicialmente como

obras de arquitectura en sí, la gran fascinación que causa la transparencia y la luminosidad de este tipo de construcciones entre sus contemporáneos acaba por convertirlas en todo un símbolo del progreso constructivo decimonónico. A lo largo de la segunda mitad del siglo XIX se multiplican los *palacios de cristal*, construcciones de uso expositivo tan icónico como indefinido que, a pesar de no compartir los requerimientos lumínico-espaciales de los invernaderos, se conciben como artefactos arquitectónicos mono-espaciales, de luz estructural relativamente pequeña y totalmente transparentes y luminosos¹¹³. El deseo -antaño inalcanzable- de inundar de luz solar el espacio interior deviene, finalmente, en realidad construida.

Expuesto al desamparo del mundo solar, el espacio arquitectónico pierde su carácter interior. Totalmente inundado de luz y sin posibilidad de construir sombra alguna, la relación entre la cambiante dirección de la luz del Sol y la orientación del espacio construido pierde su importancia histórica. A pesar de ser concebido como un artefacto de luz solar, la ubicación, forma y disposición del objeto arquitectónico ya no dependen de la posición relativa con respecto al Sol¹¹⁴, sino que se supedita a las necesidades funcionales y a su situación urbana.

Inundados de luz, estos espacios se muestran incapaces de establecer una adecuada relación entre la luz y la sombra. Al no existir oposición alguna por parte de la estructura no es posible ni construir una sombra interior ni modificar cuantitativa o cualitativamente la luz solar exterior¹¹⁵. La inundación de luz del espacio arquitectónico no consigue el efecto deseado pues, en vez de sublimarse la experiencia del hecho espacial, parece más bien empobrecerse: *más luz no significa mejor luz*¹¹⁶.

Sin embargo, parece adecuado matizar que sólo se puede considerar disminuida la calidad de la experiencia lumínico-espacial si se analiza en base a una concepción del espacio arquitectónico como interior. Aunque es cierto que esta inundación de luz es la culminación de un proceso histórico de progresiva apertura del espacio interior a la luz, una vez alcanzada la apertura total se consigue una nueva espacialidad que ya no puede ser comprendida en base a la concepción espacial anterior. Atendiendo únicamente al



F28. The Palm House, Kew Gardens (London, 1848), de Decimus Burton y Richard Turner. *Fotografía del autor.*



F29. Palacio de Cristal del Parque del Retiro (Madrid, 1887), de Ricardo Velázquez Bosco. *Fotografía del autor.*

109. "(...) Elaborar una piel independiente de cristal. No más pared ni ventana. El muro es en sí mismo una ventana. En esta nueva disposición, el muro exterior no se hace visible mucho tiempo. De esta forma, aparece la cualidad absolutamente única del cristal comparado con otros materiales: está y no está. Es el gran misterio de la ventana, delicada y fuerte a la vez". KORN, A.: Glas im Bau als Gebrauchsgegenstand, citado en WIGGINTON, Michael: Glass in architecture. London: Phaidon, 1996, p. 54, citado a su vez en RODRIGUEZ CHEDA, José Benito; RAYA DE BLAS, Antonio: Arquitectura de vidrio, en *TECTÓNICA: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*. Nº 10: Vidrio (I), 3ª Ed, Junio 2004. Madrid: ATC Ediciones, 2000, p. 6

110. "Meyer era de la opinión, como lo era August Schmarsow, que la arquitectura era, por encima de todo, un arte del espacio, y que la tarea esencial de la creación arquitectónica era el diseño del espacio. El "nuevo valor espacial" de la construcción en hierro era por lo tanto el principal aspecto a considerar. (...) Meyer compartía el entusiasmo de Lucae e inició en la idea de caracterizar el edificio como una "pieza de atmósfera esculpida". Habló del "espacio sin límites", del "espacio luminoso" que acarrearba la ausencia de sombras, la arquitectura acristalada inundada de luz". MEYER, Alfred *Gutthold: Eisenbauten, ihre Geschichte und Aesthetik.Esslingen: Paul Neff, 1907, p. 49. Citado en la Introducción de Georgiadis en GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 34*



F.30. Visión axial de la nave central desde la planta primera. Espacio de luz difusa en ausencia de sombras arrojadas.
www.loc.gov/pictures



F.31. Contraste entre la luminosidad de la cubierta central acristalada y la oscuridad de la cubierta opaca lateral.
www.loc.gov/pictures

hecho espacial, y aceptando que en efecto resulta una espacialidad diferente que no pretende ya construir espacio interior alguno, este aparente “exceso” de luz puede no ser considerado como un error o un logro, sino como condición necesaria y consecuencia, al mismo tiempo, de una nueva concepción espacial en la que el interior se asimila al exterior.

Al margen de las consideraciones relativas al carácter arquitectónico del espacio, esta inundación de luz puede acarrear inconvenientes importantes a nivel funcional. Con independencia de la eficiencia energética del edificio, una cuestión que en el siglo XIX ni siquiera se había planteado, no es deseable la incidencia directa de la luz solar en espacios de uso expositivo, como los construidos para las grandes exposiciones universales decimonónicas. Por su marcada dirección e intensidad, la luz solar directa provoca fuertes sombras que no son en absoluto deseables a fin de contemplar, con cierto confort y calidad visual, los objetos expuestos. Deviene entonces necesaria una cierta modificación de la luz a fin de hacerla difundirla y suavizarla sin mermar su intensidad, hecho que induce a abandonar la transparencia en favor de la translucidez.

A fin de controlar la incidencia de la luz en el interior, la gran cubierta de la nave central del Palais des Machines combina opacidad y translucidez en una proporción del 36% y 64% respectivamente. El área comprendida entre la fachada y la primera correa longitudinal está revestida en zinc, a fin de construir una sombra que permita resolver adecuadamente el encuentro entre la cubierta y las naves laterales, de cubierta también opaca. En cambio, los cuatro vanos longitudinales restantes hasta llegar al cenit de la cubierta en ambas mitades se cubren con paneles de vidrio de entre 190 y 200 centímetros de longitud por entre 48,6 y 50,6 centímetros de ancho y 5 milímetros de espesor. Estas láminas se estrañan en su cara inferior a fin de difundir la luz en todas direcciones una vez atravesada la superficie acristalada. Además, el cristal se esmerila con *blanco de España* a fin de disminuir también su transitividad lumínica¹¹⁷. Así mismo, las dos grandes fachadas transversales del Palais están también enteramente resueltas en vidrio, tintado en algunas partes

111. LLORENTE, Marta: Luz del cenit. *Diseño interior* nº 5, p. 47. Citado en VALERO RAMOS, Elisa: *La Materia intangible: reflexiones sobre la luz en el proyecto de arquitectura*. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004, p. 98

112. *Sobre el papel de la luz en la segunda concepción espacial -arquitectura como espacio interior-*, ver el apartado III-3.5. La luz como presencia espacial y ausencia gravitatoria.

113. *El edificio de hierro y cristal más celebrado del siglo XIX fue con toda probabilidad el Crystal Palace, erigido en el Hyde Park de Londres en 1851 y diseñado por Joseph Paxton, un experimentado constructor de invernaderos. A pesar de lo impactante de sus gigantescas dimensiones, algunos autores han señalado algunos aspectos oscuros de su diseño, como la importancia que desempeñó la madera en la resolución de la estructura de cubierta del transepto -de poco menos de 22 metros de luz-, la poca de transparencia del conjunto del edificio y la escasa novedad que supuso a nivel técnico si se lo compara con los invernaderos que se construían por entonces en Inglaterra y Francia. Ver MIGNOT, Claude: *Architecture of the 19th century. Fribourg: Evergreen*, 1983, p. 181 y GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: *Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities*, 1995, p. 124 y 260.*

114. *Sobre la importancia de la orientación solar en la arquitectura ver el apartado III-2.3. La orientación de la luz solar a propósito del Stonehenge, y los apartados III-3.2. La luz y la sombra como secuencia espacial y III-3.5.2. La ingravidez de la luz reflejada, en referencia al Pantheon.*

115. “En la medida en que han perdido su condición de espacio cerrado no tienen luz propia”. VALERO RAMOS, Elisa: *La Materia intangible: reflexiones sobre la luz en el proyecto de arquitectura*. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004, p. 55

116. "Estas búsquedas cuantitativas han llevado en muchas ocasiones, con la aparición de elementos técnicos que permiten tales cantidades, a descuidar las cualidades de dichos espacios, resultando muchas veces espacios grandes pero sin escala, o espacios con gran cantidad de luxes en los que la luz en un sentido pleno arquitectónico no existe". *APARICIO GUIASADO, Jesús María: Construir con la razón y los sentidos. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 32*

"Sólo cuando la luz ha sido domesticada y controlada mediante artefactos que regulan nuestra relación con ella o permiten canalizarla hacia ese objeto que queremos destacar, es decir, sólo cuando somos capaces de convertir la luz en instrumento que moldea el espacio y lo individualiza, a la vez que lo reintegra a la universalidad de las leyes cósmicas, y sólo entonces, cabe hablar con propiedad de la arquitectura como arte, como facultad del espíritu, y de aquellos que la ejercen como verdaderos arquitectos. (...) La luz es a la arquitectura lo que el viento a la navegación a vela, o lo que el toro bravo a la tauromaquia: una energía incontenible y desbocada que, a través del ingenio, el saber y la paciencia humanos, hay que reconducir y domesticar, convirtiéndola en nuestra aliada. Al toro le corresponde embestir y al torero lidiar, es decir, transformar la fuerza de la embestida en calculado desplazamiento, en detención tensa y concentrada, en movimiento y compás, en "figura" dinámica de una danza capaz de reunir en una sola cosa al toro, al torero y al engaño. Así opera el verdadero arquitecto con la luz, enredándola en sus artificios, convirtiéndola en obediente protagonista de un acto ritual cuyo guión sólo él conoce. (...) Al sol, como a todo soberano, hay que tratarle a la vez con respeto y con distancia: conviene que no nos desasista, pero también hay que procurar que no nos aplaste. Al conjunto articulado de protocolos que regulan las relaciones que se generan entre el sol como fuente de energía y de luz, y el lugar que el ser humano adopta como espacio habitable, le llamamos arquitectura". MARTÍ ARÍS, Carlos: *Laboratorio de luz*, en VALERO RAMOS, Elisa: Elisa Valero: arquitectura 1998-2008. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2008, pp. 5-7

"La primera puntualización que hay que hacer en una sociedad que muere de exceso es que "más luz" no es "mejor luz". Confundir cantidad con cualidad es un prejuicio con pésimas consecuencias". VALERO RAMOS, Elisa: Si Copérnico levantara la cabeza. Reflexiones sobre la luz y la sostenibilidad; en *DIAGONAL 24*, Primavera 2010. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2010, p. 25

"¿Cuál ha sido la culpa de la modernidad?: El exceso de luz, la "desmesurada sed de luz", pero de una luz ya no sagrada, sino secular, desbordada en la "casa de la cantidad" del mundo moderno." LAHUERTA, Juan José: *Compren infierno*, en SEDLMAYR, Hans: La luz en sus manifestaciones artísticas. Madrid: *Lampreave*, 2012, p. 11

en su lado interior con diferentes colores -amarillos, azules, rojos- a fin de decorar y atenuar el excesivo brillo de la luz exterior ¹¹⁸.

Se consigue así modificar las cualidades de la luz que configura el espacio arquitectónico en relación a la luz exterior. Al perder la luz su dirección única y al rebajarse el contraste visual entre la luz y la sombra, los objetos expuestos se ven sumergidos en una atmósfera de luz adireccional en la que las sombras arrojadas se atenúan hasta prácticamente desaparecer. Aun poseyendo una inusitada claridad, el espacio arquitectónico recupera en cierto modo su interioridad.

El ansia de luz abre progresivamente el espacio interior, adelgazando la estructura para hacerla cada vez más permeable a la luz. Sin oposición alguna, y a través de un cerramiento totalmente transparente, la luz solar inunda completamente el espacio que, desde un punto de vista lumínico, deviene exterior. El exceso de luz obliga a proteger el espacio por medio de un cerramiento opaco o translúcido capaz de manipular las propiedades de la luz, que en cierto modo devuelve al espacio su antiguo carácter interior. La búsqueda de la luz en el siglo XIX es la historia de una arquitectura que no es capaz de asumir las consecuencias de sus propios logros.

III.4.3.3. El peso de la transparencia

"El espectador no es consciente del peso de las superficies transparentes. Las superficies son para él aire y luz, es decir, una fluidez imponderable". ¹¹⁹

Louis-Charles Boileau

Como ya se ha expuesto, se pueden distinguir dos grandes conjuntos de teorías sobre la naturaleza de la luz: aquellas que la consideran como alteración del éter, y las que la consideran una suerte de sustancia, cuerpo o materia en movimiento. En el primer caso la luz resulta de la vibración o actualización de

las partículas etéreas, por definición invisibles, transparentes e ingravidas. En cambio, cuando se le otorga a la luz un cierto carácter material, sí cabe plantear su posible gravitación. A finales del siglo XVIII Michell y Laplace, seguidores y continuadores de la teoría newtoniana, consideran que en tanto que los corpúsculos luminosos están dotados de masa, la luz debe verse sometida a los efectos de la gravedad y, por tanto, del peso¹²⁰. Pero al margen de la física teórica, lo cierto es que la experiencia cotidiana induce a considerar la luz como una realidad física ajena u opuesta al fenómeno de la gravitación.

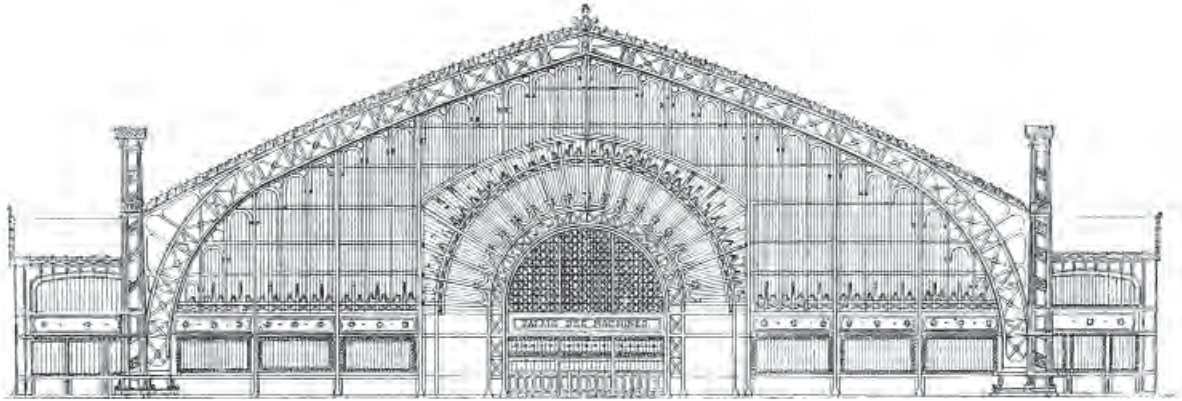
Marin Cureau de La Chambre (1594-1669) introduce a finales del siglo XVII una interesante reflexión sobre la transparencia. Defiende en su teoría que los cuerpos con una elevada cantidad de materia concentrada son necesariamente opacos y pesados, mientras que son ligeros y transparentes aquellos conformados por una cantidad mínima de materia. En un extremo se encuentra la luz, transparente y por tanto inmaterial e ingravida; en el otro extremo se encuentra la materia ordinaria, caracterizada por su opacidad y pesantéz¹²¹. No obstante, el vidrio parece participar entonces de ambas realidades al mismo tiempo. En tanto que transparente y diáfano, se aprehende de la condición ingravida de la luz hasta el punto que se asocia visualmente con la ligereza y la levedad. Sin embargo, su innegable condición material no sólo le otorga solidez, sino también lo dota de pesantéz. Aunque por su transparencia se asocia la arquitectura de cristal con la ligereza, el vidrio es en realidad un material tan pesado como la piedra ¹²².

A partir del siglo XIX el vidrio se fabrica industrialmente en láminas de cierta dimensión a fin de ser empleado en la construcción. La temprana voluntad de cubrir grandes superficies únicamente con cristal hace necesario el desarrollo de sistemas constructivos que permitan resolver grandes áreas acristaladas por medio de la suma de láminas de menor tamaño. Con independencia de las especificidades de su diseño, es necesario contar con una plentería que resuelva la unión estanca de las distintas láminas. Sin embargo, cuando se trata de grandes superficies

117. "Las cuatro primeras regiones superiores, a partir de la cúspide, están cubiertas y cerradas por lamas de vidrio. La quinta región, inferior y adyacente al canalón, mayor que las anteriores, comprende cerca del tercio de la cubierta. Esta área está cubierta de zinc. Las dos grandes crujías de los extremos están enteramente cubiertas igualmente de zinc". *L. A. Barré, en VIGREUX, Charles. Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, p. 36*

"La zona acristalada de la gran nave está cubierta por hojas de vidrio, estriadas en su parte inferior, de 5 milímetros de espesor y de 1,90 a 2 metros de longitud por 0,506 m de ancho. En sus laterales se disponen perfiles de hierro en T invertida sostenidos a su vez por correas de hierro. Se tuvo cuidado de dejar entre las placas de vidrio y los soportes un espacio que permitiese la ventilación y el drenaje de la condensación producida por el vaho interior. Los vidrios se esmerilaron [esmerilar es deslustrar el vidrio con esmeril u otra sustancia] con un poco de blanco de España". *L. A. Barré, en VIGREUX, Charles. Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, p. 100*

"En cuanto al acristalamiento, el empleo de vidrio estriado lo suficientemente grueso debía proteger a los Palais de las grandes tormentas y debía servir para difundir la luz: pero esta última condición no se produjo, y durante el periodo de explotación se tuvieron que utilizar toldos o aplicar capas de pintura sobre las superficies interiores de las cubiertas de vidrio para evitar la excesiva brillantez de los rayos de sol". *ALPHAND, Adolphe; GEORGES BERGUER, M.; ALFRED PICARD, M.: Exposition Univeselle Internationale de 1889 a Paris. Monographie. Palais, Jardins, Construccions Diverses, Installations Gènèrales. Paris: J. Rothschild, 1892-1895, Tomo I, p. 52*



F.32. Alzado de la Avenue de la Bourdonnais. E 1/100. DURANT, Stuart: *Palais des Machines: Ferdinand Dutert*. London: Phaidon, 1994, p. 30



F.33. Fachada de la Avenue de la Bourdonnais con la Torre Eiffel al fondo.
DURANT, Stuart: *Palais des Machines: Ferdinand Dutert*. London: Phaidon, 1994, p. 20

acristaladas, la limitada capacidad mecánica de esta plementería resulta insuficiente y se hace necesaria una subestructura capaz de resistir las cargas provocadas por el peso propio del vidrio y otros factores externos. Se requiere así una estructura capaz de soportar el peso de la transparencia.

El peso de los 34.700 m² de vidrio que cierran la parte central de la cubierta de la gran nave del Palais des Machines ¹²³ se estima en torno a 4.337 toneladas ¹²⁴. Evidentemente, este enorme peso lo soportan los pórticos triarticulados que cubren transversalmente el espacio. No obstante, estos pórticos se encuentran separados 21,50 metros de centro a centro, distancia que aumenta hasta los 25,20 metros en las crujías laterales y los 26,40 metros en la crujía central, hecho que plantea la necesidad de introducir un segundo orden estructural que permita cubrir esta luz en sentido longitudinal. Para ello se emplean doce vigas metálicas de gran canto en celosía tipo Pratt, que recorren toda la dimensión de la nave conectando los veinte grandes pórticos. Perpendicularmente a estas grandes cerchas, y apoyados sobre ellas, se disponen en sentido transversal en cada vano tres perfiles de alma llena de tan sólo cuarenta centímetros de canto. Se crea así una secuencia en la que se alternan los grandes pórticos triarticulados y estas pequeñas correas. Ambos órdenes se disponen en sentido transversal y crean en su cara superior un plano de soporte de la plementería que sujeta las láminas de vidrio que conforman la cubierta.

Así pues, a fin de soportar el peso de las láminas de vidrio que cubren y cierran la gran nave central del Palais es necesario recurrir a cuatro órdenes estructurales distintos que, dispuestos alternadamente en direcciones perpendiculares, van reduciendo progresivamente su luz y su canto: primero encontramos los grandes pórticos transversales triarticulados, luego las cerchas longitudinales entregadas contra el canto de los pórticos, después las vigas de alma llena apoyadas sobre las vigas Pratt y, por último, los pequeños perfiles longitudinales a modo de plementería. Se trata, una vez más, de dar cauce al peso gravitatorio a través de

118. "En las dos fachadas de los extremos de la nave los vidrios son tintados para atenuar el brillo de la luz". VIGREUX, Charles. *Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, p. 100*

119. Citado en GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: *Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995, p. 134*

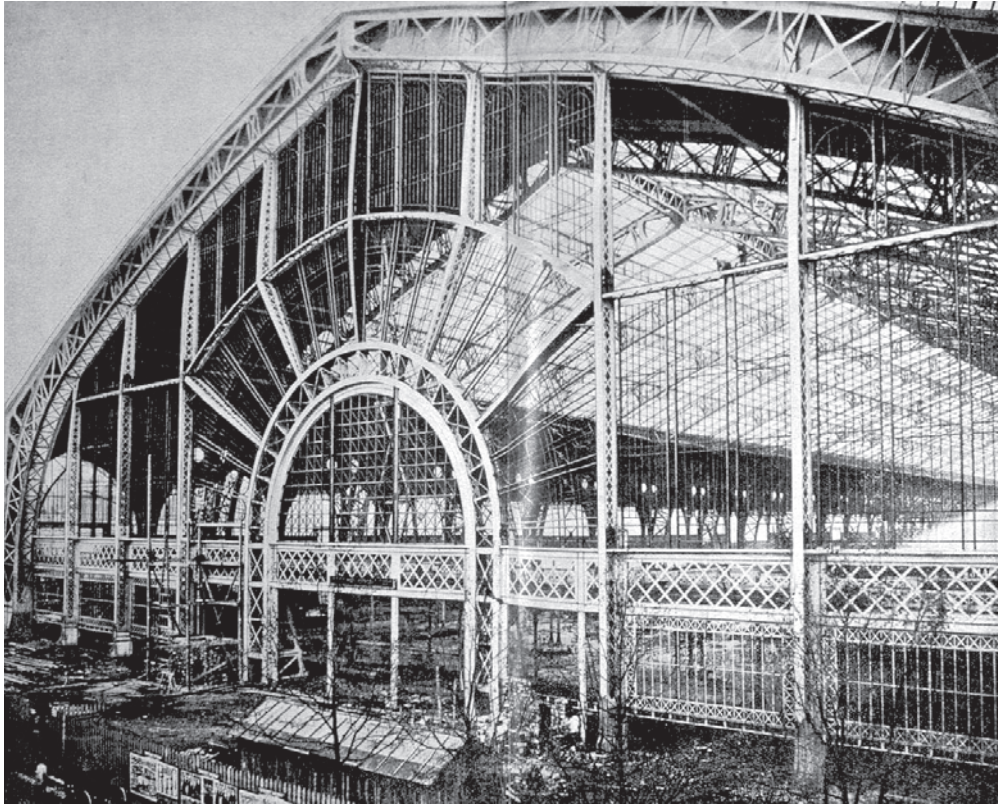
120. *Tal como se expone en el apartado II-4.2.2. La gravitación de la luz en la relatividad general, Einstein defiende también la gravitación de la luz. No obstante, no lo hace en términos de "pesantez", sino en cuanto a la afectación curva de su propagación rectilínea.*

121. *Sobre La Chambre, ver la parte final del apartado II-3.2.1. La luz, materia inmaterial.*

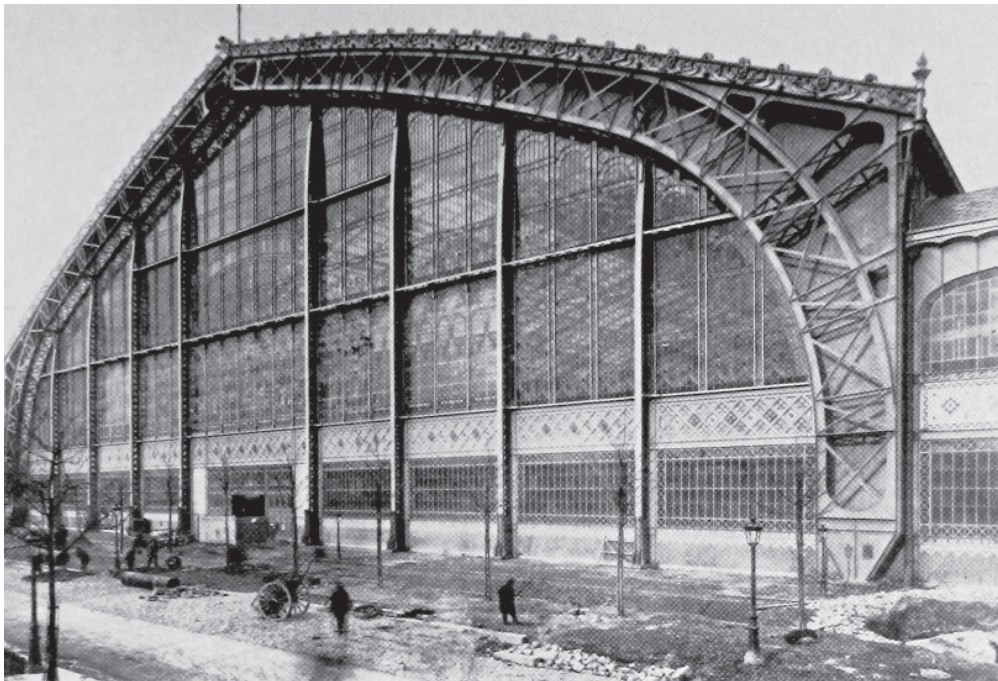
122. *El vidrio pesa unos 2.500 kg/m³, un valor muy parecido al de ciertas rocas como el mármol (2.400-2.800 kg/m³), el granito (2.600-2.750 kg/m³) o el travertino (2.500 kg/m³). Ocurre con el vidrio algo parecido a lo descrito anteriormente a propósito del hierro (ver apartado III-4.2.5. La ligereza de la línea estructural). Aunque el valor de su peso relativo por unidad de volumen es al menos tan elevado como el de la piedra, su empleo en el ámbito de la arquitectura da lugar a construcciones "ligeras" si se las compara con las pétreas. Y, aunque hoy en día es posible utilizar láminas pétreas tan delgadas como las de vidrio, en el siglo XIX esto era impensable. A igual densidad, el empleo de delgadas láminas de vidrio como cerramiento daba lugar a cerramientos mucho más ligeros que los constituidos por gruesos muros pétreos.*

123. *Cifra obtenida de VIGREUX, Charles: Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, pp. 43-44*

124. *Esta estimación aproximada se obtiene considerando 34.700 m² de vidrio de 5 mm de espesor y una densidad de 2.500 kg/m³: 34.700 m² x 0,005 m x 2.500 kg/m³ = 433.750 kg*



F34. Fachada de la Avenue de la Bourdonnais durante la demolición. Obsérvense los paños despojados ya del cerramiento vitreo.
www.studyblue.com



F35. Fachada de la Avenue de Suffren, de estética más industrial.

MIGNOT, Claude: *Architecture of the 19th century*. Fribourg: Evergreen, 1983, p. 202

los distintos elementos que soporta la estructura hasta el suelo, sólo que en este caso la carga es transparente.

Por su parte, las dos grandes fachadas que cierran la nave central a ambos lados se cubren también enteramente en vidrio. Cada fachada tiene una altura máxima de 43,5 metros y una anchura de casi 107 metros. Con sus 4.130 m² de superficie y 450 toneladas de peso ¹²⁵, cada una de estas fachadas se constituyen en los mayores muros cortina construidos en el siglo XIX ¹²⁶.

En tanto que cada fachada responde a una situación urbana distinta, su diseño es también diferente. Diseñada al estilo *École Beaux Arts*, la fachada de la *Avenue de la Bourdonnais* es la más elaborada y monumental. Una gran puerta arqueada recibe a los visitantes procedentes de la zona expositiva de la *Esplanade des Invalides* por la *Avenue de la Motte-Picquet* y la *Avenue de la Tourville*, y a los que llegan desde la zona expositiva de la orilla del Sena por la *Avenue Bosquet*. En cambio, en tanto que no se le encomienda ninguna función representativa, la fachada de la *Avenue de Suffren* ofrece una imagen más industrial.

El alzado está estructurado por nueve cerchas en celosía cruzada ahusadas en su parte superior, cuya disposición coincide con las cerchas que recorren longitudinalmente la cubierta en el interior de la nave. Dispuestas perpendicularmente a la fachada, organizan el conjunto en diez módulos verticales de suelo a pódico, ocupados por entero por el cerramiento de vidrio. A una altura aproximada de unos ocho metros del suelo una gran viga horizontal en celosía cruzada, de casi tres metros de canto y dispuesta en paralelo al plano de fachada, apea el cerramiento de vidrio de la parte superior y transmite su peso a las cerchas verticales, que conducen las cargas hacia el suelo.

Pero la principal misión de estos montantes verticales consiste en garantizar la verticalidad del enorme paramento frente al empuje horizontal del viento ¹²⁷. Sujetas por su extremo inferior en contacto con el suelo y por su extremo superior en contacto con el pódico, bajo los efectos del viento estas cerchas verticales trabajan a flexión.

125. Los datos referentes a la superficie y peso del cerramiento acristalado de ambas fachadas han sido extraídos de VIGREUX, Charles: *Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture. Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893, p. 88*

126. "Los muros cortina del Palais des Machines fueron ciertamente los mayores del siglo diecinueve". DURANT, Stuart: *Palais des Machines: Ferdinand Dutert. London: Phaidon, 1994, p. 18*

127. "Los grandes muros cortina que se pueden ver desde la avenue de la Bourdonnais y la avenue de Suffren tenían que soportar considerables cargas debidas a la acción del viento y por tanto están sujetos verticalmente con ligeras cerchas en celosía que disminuyen su grueso progresivamente". DURANT, Stuart: *Palais des Machines: Ferdinand Dutert. London: Phaidon, 1994, p. 17*

Perpendicular al plano de fachada, el alma en celosía cruzada garantiza el correcto trabajo a flexión con independencia del sentido de la deformación. A unos veinticinco metros de altura se dispone una cercha horizontal y perpendicular al alzado, también de alma cruzada, que recorre de lado a lado los más de cien metros de cristal que conforman el cerramiento. Esta cercha mejora el comportamiento mecánico del conjunto de la fachada al disminuir la longitud de los elementos verticales sometidos a flexión y al solidarizar la deformación de los distintos vanos, que al tener alturas diferentes tienen flechas disímiles.

A parte del riesgo que supondría en sí mismo el pandeo de la fachada por acción del viento, cabe señalar además que el funcionamiento estructural de la fachada se fundamenta en la transmisión vertical del peso del vidrio. La garantía de esta verticalidad frente a los empujes horizontales ajenos a la acción de la gravedad deviene, en última instancia, en garantía de estabilidad gravitatoria del conjunto. A tal efecto resulta imprescindible la sujeción de los montantes verticales al pódico de fachada, que a fin de aumentar su inercia y su estabilidad lateral, exagera la separación de las dos almas que lo conforman, aumentando su anchura total.

Al quedar el plano de cerramiento enrasado con la cara interior del pódico, éste exhibe al exterior todo su grosor, lo que confiere al alzado una tranquilizadora imagen de solidez y estabilidad ¹²⁸ que queda enfatizada por la opacidad del alma llena interior y la sombra proyectada por el pequeño voladizo del cordón superior.

Tanto en la cubierta como en la fachada se puede observar que, si bien es cierto que el hierro precisa del vidrio para poder cerrar el espacio cubierto por la delgada estructura sin afectar la luz que fluye desde el exterior hacia el interior, también lo es que el vidrio precisa del hierro para poder cumplir con su función de cerramiento transparente. De esta interdependencia entre la opaca estructura férrea y el transparente cerramiento vítreo, junto a una nueva manera de comprender la naturaleza física de la gravedad y de la luz, surge una nueva configuración espacial.

128. "Las vigas o cerchas de los extremos fueron dobles y estaban vinculadas entre sí. Esto hizo posible retrasar el muro cortina en ambas fachadas. Mientras que las cerchas dobles fueron introducidas por razones obviamente estructurales, el retraso de las fachadas permitió a Dutert dar al conjunto arquitectónico una tranquilizadora imagen de solidez". *DURANT, Stuart: Palais des Machines: Ferdinand Dutert. London: Phaidon, 1994, p. 22*

III.4.4. A VICTORIA DE LA LUZ SOBRE LA GRAVEDAD ¹²⁹

EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO INTERIOR EXTERIORIZADO

Las investigaciones sobre el fenómeno electromagnético desarrolladas desde el ámbito de la física durante el siglo XIX cuestionan de raíz los pilares de la física newtoniana. La noción de *campo* evidencia la artificiosidad del concepto de *fuerza a distancia*, idea fundamental en la explicación newtoniana del fenómeno gravitatorio en tanto que la gravedad en sí se identifica con ella. Por otro lado, diversos experimentos sobre la velocidad, la difracción, la interferencia y la polarización de la luz demuestran también la inconsistencia de la teoría corpuscular de Newton. Se demuestra además la inexistencia del éter, sustancia invisible sobre la que Newton fundamentaba sus teorías sobre la gravedad y la luz. Invalidada de raíz la física newtoniana a finales del siglo XIX, la gravitación queda huérfana de explicación física convincente. La física decimonónica detecta los problemas de la Ley de Gravitación Universal de Newton, pero se revela incapaz de proponer una alternativa.

Distinta suerte corre la luz, cuya investigación experimenta una enorme actividad a lo largo de todo el siglo. Como resultado de esta ansia de conocimiento físico de la luz se abandona definitivamente el planteamiento corpuscular en favor de su representación como onda electromagnética ¹³⁰.

Esta asimetría en la comprensión decimonónica de los fenómenos de la gravedad y de la luz tiene también su repercusión, como no podía ser de otra manera, en el ámbito de la arquitectura. La incorporación del progreso estructural de la ingeniería civil al ámbito de la arquitectura permite resolver los problemas gravitatorios de la edificación con cierta comodidad. Superados los límites mecánicos y espaciales de los tipos estructurales abovedados empleados en épocas anteriores, las estructuras concebidas a partir del siglo XIX parecen proporcionar un pleno dominio sobre la gravedad, que acaba por perder el peso específico que hasta

129. "En el otro extremo tenemos lo etéreo, la aspiración a la desmaterialización del "Palacio de Cristal" de Joseph Paxton, que Le Corbusier una vez describió como la victoria de la luz sobre la gravedad". FRAMPTON, Kenneth: *Labour, work and architecture: collected essays on architecture and design*. London: Phaidon, 2002, p. 102

130. *Fruto de la evolución de la ciencia aplicada al fenómeno de la electricidad, a finales del siglo XIX se implanta definitivamente la luz eléctrica en la iluminación nocturna del espacio arquitectónico. Aunque dicho tipo de iluminación no se emplea por primera en el Palais des Machines de París de 1889, sí es cierto que a partir de entonces se consolida como un parámetro de la arquitectura moderna. Sin embargo, igual que en los capítulos anteriores no se ha hecho mención alguna a la importancia capital del fuego como fuente artificial de luz en la arquitectura histórica, tampoco se ha creído conveniente ahondar aquí en las especificidades de la luz eléctrica, pues la presente tesis doctoral se centra sólo en la investigación de la relación física y arquitectónica entre la gravedad terrestre y la luz solar.*

entonces había tenido en el problema de la cubrición espacial. La forma estructural abandona los principales atributos gravitatorios de la materia, como la masividad y la pesantez, en favor de una inusitada esbeltez y ligereza. Ausentada de una forma estructural capaz de cubrir cada vez más espacio con menos materia, la gravedad cede su protagonismo a una ansiada y ansiosa luz solar que lo inunda todo por completo.

En esta revolución arquitectónica el hierro deviene un material fundamental. Conocido ya desde antiguo, su industrialización inaugura una nueva etapa en la que la ingeniería estructural descubre sus excepcionales cualidades mecánicas, muy superiores a las de la piedra. El hierro permite concentrar grandes esfuerzos en secciones muy reducidas, lográndose con ello una respuesta mecánica máxima, tanto a compresión como a tracción, con una mínima cantidad de materia. La explotación de estas nuevas posibilidades mecánicas induce, necesariamente, a la exploración de nuevas formas estructurales que no se ven forzadas a seguir las reglas de la estática clásica. Se altera la clásica relación entre la carga y el soporte y se abre la puerta a nuevas formas de cubrición espacial cuyo diseño no se ve sometido a los dictados de la intuición gravitatoria ¹³¹.

A fin de mejorar la capacidad portante de la estructura, las excepcionales prestaciones mecánicas del hierro se optimizan por medio del cálculo matemático de las solicitaciones y las secciones. La abstracción del fenómeno tensional en sistemas de vectores en equilibrio tiene su correspondencia formal en los sistemas estructurales en celosía, donde el conjunto de barras parece identificarse con los vectores de fuerza que garantizan la compleja estabilidad del conjunto. La celosía deviene así en la forma propia de la estructura de hierro.

A pesar de que el hierro en sí no pueda ser considerado un material ligero, pues su densidad triplica a la de la piedra, la reducción de la materia estructural a meras líneas de fuerza supone una disminución real de la cantidad de materia empleada

131. A lo largo del siglo XX se desarrollan formas estructurales que, sometidas a tracción, no necesitan seguir curvatura alguna en reconocimiento a la compresión gravitatoria. Los tensegrity de Richard Buckminster Fuller son un buen ejemplo de estructura metálica básicamente traccionada de comportamiento mecánico no intuitivo.

y, por tanto, del peso del conjunto de la estructura. La masa deja paso a la línea y ésta abre el espacio al aire y a la luz, dotando al conjunto de una enorme ligereza visual. Penetrando libremente por todos lados, la luz consigue anular la opacidad de la materia y, también, su sombra. En tanto que libre de soportes intermedios y lumínicamente transitiva, la arquitectura adquiere la forma de una diáfana estructura de gran luz. La ligereza pasa a vincularse entonces no sólo a la escasez de peso, sino también a la abundancia de luz.

El encauzamiento de la gravedad por medio de líneas de fuerza en celosía hace que la estructura deje de ser un límite infranqueable de contención espacial y oposición lumínica. El espacio construido por este tipo de estructuras ya no es un espacio introvertido y confinado en el interior de la masa sino que, en total transitividad visual y lumínica con el exterior, se abre y se expande más allá de los delgados elementos que apenas lo delimitan. El espacio, antaño configurado por una luz confinada en una sombra interior, se ve inundado ahora por una luz exterior. La identificación lumínica del espacio interior con el espacio exterior es sin duda la principal característica de esta nueva concepción espacial. Se construye un espacio lumínicamente exterior en el que la sombra estructural, hasta entonces protagonista del hecho espacial, acaba por ser mermada y reducida por una luz que todo lo ilumina.

Aunando la solidez y la pesantez de la materia y la diafanidad de la luz, el vidrio permite proteger el espacio construido de todos los agentes externos excepto de la luz. Se construye así en un cerramiento invisible que hace habitable el espacio definido únicamente por las líneas estructurales.

Con acierto el Palais des Machines de Paris de 1889 se presenta frecuentemente como la obra cumbre de la arquitectura del siglo XIX. Pero más allá de importancia en la evolución de la arquitectura en hierro y vidrio, este imponente espacio se erige como una obra maestra de la arquitectura de todos los tiempos que, aún con sus luces y sus sombras, sintetiza con maestría un

siglo de exploraciones arquitectónicas sobre la materia, la luz, la gravedad y el espacio. La ligereza y la luminosidad, hasta entonces cualidades arquitectónicas únicamente alcanzables por medio de la ilusión, se convierten en verdaderas propiedades de una arquitectura con más espacio y menos materia. Una arquitectura, en definitiva, con más luz y menos gravedad.

LA ABSTRACCIÓN DE LA GRAVEDAD Y DE LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO INTERIOR EN CONTINUIDAD CON EL EXTERIOR

III.5.1. La Neue Nationalgalerie de Berlín

III.5.2. La estructuración del espacio continuo

III.5.3. La levedad como abstracción de la gravedad

III.5.3.1. Abstracción y gravedad: entre la física y la arquitectura

III.5.3.2. La planeidad como abstracción de la forma de cubrición

III.5.3.3. La levedad como abstracción de la condición del apoyo

III.5.4. La espacialidad de la luz abstracta

III.5.5. La abstracción de la gravedad y de la luz en la estructuración del espacio continuo



F.01. Ortoplano del emplazamiento de la Neue Nationalgalerie. www.maps.google.es



F.02. Imagen aérea. VANDENBERG, Maritz: *New National Gallery, Berlin*: Ludwig Mies van der Rohe. London: Phaidon, 1998, p. 21

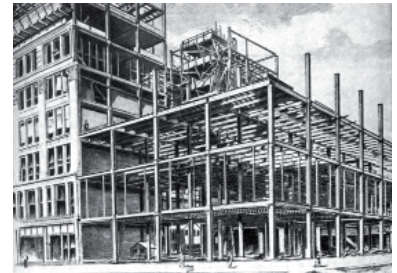
III.5.1. LA NEUE NATIONALGALERIE DE BERLÍN

“La Neue Nationalgalerie es más que un museo o un edificio. Es un hito de la historia de la arquitectura, un monumento, un icono.”⁰¹

Joachim Jäger

A lo largo de toda la historia de la arquitectura la caracterización visual y lumínica del espacio se ha fundamentado siempre en la dicotomía existente entre el interior y el exterior. Tal como se ha expuesto en los capítulos anteriores, el espacio exterior delimitado por volúmenes de la primera concepción espacial deja paso al interior delimitado por la masa opaca y pesante de la segunda etapa, un espacio que recupera su exterioridad en el siglo XIX gracias a la transparencia y la ligereza del hierro y el cristal. No obstante, a principios del siglo XX se gesta una nueva concepción espacial en la que el espacio arquitectónico es capaz de abrirse totalmente al exterior sin perder su carácter interior. La continuidad horizontal que caracteriza a esta nueva idea de espacio se debe, en gran medida, a la abstracción gravitatoria y lumínica de una forma de cubrición espacio-estructural que, pese a su inherente planeidad, es capaz de cubrir grandes espacios sin soportes intermedios. La Neue Nationalgalerie, la última obra proyectada y construida por Mies van der Rohe (1886-1969), se erige sin duda en la máxima expresión de esta nueva voluntad espacial propia de la modernidad.

Mientras que a lo largo del siglo XIX las estructuras de hierro y cristal europeas se emplean principalmente en la cubrición de grandes espacios –salas de exposiciones, estaciones de tren, invernaderos, etc.–, durante las décadas de los ochenta y los noventa se desarrolla en Chicago una nueva tipología estructural destinada a satisfacer las necesidades de optimización económica, espacial y lumínica que requieren los nuevos edificios de uso comercial erigidos en la zona de negocios del centro de la ciudad. La sustitución de los gruesos muros portantes por una estructura en esqueleto metálica permite, al mismo tiempo, disminuir la ocupación en planta de los muros de carga y abrir grandes huecos en las fachadas, hecho que posibilita



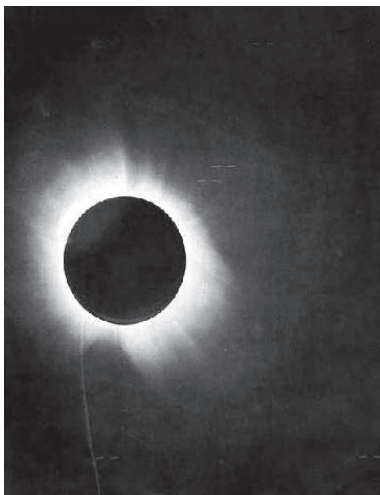
F.03. Estructura en esqueleto del *The Fair Building* de Chicago, proyectado por William Le baron Jeney en 1891. GIEDION, Sigfried: *Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición* (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. 389

01. JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 11*

02. Sobre la llamada Escuela de Chicago ver La evolución americana. La escuela de Chicago, en GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, pp. 383-396.

03. Ver apartado I.3.3.1. Arthur Schopenhauer: luz y gravedad.

04. Sobre la contribución de estos autores a la teoría arquitectónica ver GIEDION, Sigfried; FERNÁNDEZ BERNALDO DE QUIRÓS, Joaquín (ed): El presente eterno: Los comienzos de la arquitectura. Una aportación al tema de la constancia y el cambio. Madrid: Alianza, 1988, pp. 471-473. Imprescindible también "La definición espacial" de la arquitectura en ZEVI, Bruno; MONEO VALLÉS, Rafael (Trad.): Architettura in nuce; una definición de arquitectura. Madrid: Aguilar, 1969, p. 40 ss



F04. Positivo de la imagen tomada por la expedición de Sir Arthur Eddington en Sobral, para verificar las predicciones de Einstein de la curvatura de un haz de luz alrededor del Sol por acción de la gravedad. GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: *Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 157

05. "El mundo moderno comenzó el 29 de mayo de 1919, cuando las fotografías de un eclipse solar, tomadas en la isla de Príncipe, frente al África Occidental, y en Sobral, Brasil, confirmaron la verdad de una nueva teoría del universo. Durante medio siglo había sido evidente que la cosmología newtoniana, fundada en las líneas rectas de la geometría euclidiana y los conceptos de tiempo absoluto de Galileo, necesitaba una revisión importante." JOHNSON, P: *Tiempos Modernos. Cum Laude*, pp. 5-8. Citado en GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: *Después de Einstein: una arquitectura para una teoría*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 2. Sobre la demostración de la relatividad general de Einstein, ver el apartado II-4.2.2. La gravitación de la luz en la relatividad general de la presente tesis doctoral.

el aumento de la superficie útil de las plantas y el incremento de la cantidad de luz natural en su interior⁰². Pero a diferencia de la edición anterior, celebrada en París, la Exposición Universal de Chicago de 1893 no sirve para potenciar la experimentación de las nuevas posibilidades que brindan estas modernas estructuras, sino para afianzar un gusto generalizado por los estilos históricos que termina por eclipsar el desarrollo de esas nuevas tipologías espacio-estructurales.

Esta crisis sobre el estilo arquitectónico a lo largo de todo el siglo XIX hace necesaria una profunda reflexión sobre los fundamentos de la arquitectura. La reflexión de Arthur Schopenhauer en torno a la arquitectura como manifestación de los fenómenos de la gravedad y de la luz, analizada en la presente investigación⁰³, debe encuadrarse necesariamente en este contexto. Pero, sin duda, la contribución más importante a la reflexión sobre los fundamentos de la arquitectura fue la de aquellos autores que, como Alois Riegl (1858-1905), Heinrich Wölfflin (1864-1946) o August Schmarsow (1853-1936)⁰⁴ -entre otros-, señalaron de un modo consciente y preciso la naturaleza espacial de la arquitectura como su rasgo distintivo con respecto al resto de las artes. A partir de entonces, cualquier reflexión teórica sobre la naturaleza del hecho arquitectónico se ha basado unívocamente en la comprensión de la *arquitectura como arte del espacio*.

A diferencia de épocas anteriores, en el siglo XX el trasvase de conocimientos e intuiciones desde el ámbito de la física al terreno del arte y la arquitectura se produce de un modo totalmente consciente. La repercusión mediática de la publicación de la teoría de la relatividad general de Albert Einstein en 1916 y su posterior constatación observacional en 1919⁰⁵ consigue despertar el interés de artistas de vanguardia europeos. Artistas como Theo Van Doesburg (1883-1931), Gino Severini (1883-1966), Enrico Prampolini (1894-1956), El Lissitzky (1890-1941), Vicenzio Fani (1888-1927) o László Moholy-Nagy (1895-1946) -por citar sólo a los más importantes-, ven en estos nuevos conceptos físicos la fuente de inspiración necesaria para desarrollar una nueva manera de entender la pintura, la escultura y, también, la arquitectura⁰⁶.

En tanto que arte espacial, la influencia de la física teórica en la teoría de la arquitectura se centra necesariamente en aquellas cuestiones relativas al espacio, como la noción de “espacio-tiempo” formulada por Minkowski en 1907, en la que a las tres dimensiones del espacio se añade una cuarta dimensión temporal. Sobre esta base construye Einstein su teoría de la relatividad general, en la que las propiedades físicas y geométricas del espacio-tiempo se ven alteradas por los fenómenos de la gravedad y de la luz⁰⁷.

Según expone Sigfried Giedion en su célebre obra “Space, Time and Architecture” en 1941⁰⁸, cuyo título alude explícitamente al espacio-tiempo de la física moderna, la vanguardia artística europea se propone la tarea de implementar este concepto a sus reflexiones sobre el espacio arquitectónico de un modo consciente, intentando incorporar de algún modo la coordenada temporal al diseño y la representación del espacio tridimensional. Como resultado de estas reflexiones, por lo general más exitosas en el plano teórico que en el práctico, a partir del primer cuarto de siglo la labor proyectual de los que habrán de ser los arquitectos más destacados del siglo XX se ve ineludiblemente influenciada por los conceptos relativistas sobre el espacio, la gravedad y la luz.

Tal es el caso de Mies van der Rohe quien, según sostienen la mayoría de los historiadores de la arquitectura moderna, durante la década de los años veinte se ve fuertemente influenciado por las reflexiones de Theo van Doesburg⁰⁹, con toda probabilidad el artista de vanguardia más interesado en la implementación de los nuevos conceptos relativistas al ámbito de la arquitectura. Atento a los avances de la técnica y la ciencia modernas¹⁰, a lo largo de toda su vida Mies desarrolla a través de distintas variantes tipológicas las posibilidades espaciales de la estructura en esqueleto, el único sistema estructural capaz de garantizar la continuidad horizontal del espacio moderno.

Tanto por la madurez del planteamiento espacial como por el desafío estructural que supone su construcción, la Neue Nationalgalerie puede considerarse sin duda uno de los proyectos más importantes del conjunto de la obra del arquitecto alemán y, también, de la

06. *Sobre la influencia de la física relativista en las vanguardias modernas* ver Einstein leído e interpretado, en GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, pp. 72-176.

07. “A pesar de los estudios de Banham Collins y del mismo Giedion todavía quedan muchas incógnitas por despejar. ¿Hasta qué punto las teorías de la física y los desarrollos de las matemáticas y de la geometría –espectaculares desde 1880 hasta 1900- tienen algo que ver con el desarrollo de una corriente ‘moderna’ de la arquitectura? ¿Qué interés teórico en historia y en epistemología tiene el hecho- para mí no casual- de la simultaneidad de ‘manifestos’ de la nueva –y formal- arquitectura en 1908 –tal como sugiere Bahnam?”. MUNTAÑOLA THORNBERG, Josep: prólogo a la edición española, en GIEDION, Sigfried: La arquitectura, fenómeno de transición: las tres edades del espacio en arquitectura. Barcelona: Gustavo Gili, 1975, p. XVI

08. “El mayor eco que ha supuesto la difusión de la Teoría de la Relatividad para la arquitectura ha venido asociado históricamente a la figura de Giedion y su “Espacio, tiempo, arquitectura”. (...) El volumen, que narra el origen y desarrollo de la nueva tradición en arquitectura, tratando de mostrar las interrelaciones entre ésta y la construcción, la pintura, el urbanismo y la ciencia, dedicará una parte completa (parte VI) al “Espacio-tiempo en el arte, la arquitectura y la construcción”, titulado el primer epígrafe “La nueva concepción espacial: el espacio-tiempo.” En este capítulo habla de la disolución de la perspectiva, de la crisis del espacio tridimensional del renacimiento basado en la geometría euclídea, que desde 1830 y sobre todo a principio del siglo XX, verá evolucionar hacia nuevas geometrías curvas, cuyas dimensiones entrarán dentro del campo simbólico de las matemáticas no pudiendo ser comprendidas por nuestra imaginación. Estas consideraciones –comentará Giedion- nos afectan en la medida que afectan al sentido del espacio. Al igual que los científicos, los artistas han llegado a reconocer que las concepciones clásicas del espacio y los volúmenes son limitadas y parciales. (...) La nueva concepción del espacio, entendido como espacio-tiempo cuatridimensional en Giedion es legado de Minkowski. La posterior difusión de este legado ha involucrado la participación de Einstein y generado no más de una discusión en torno a la posible influencia de la Teoría de la Relatividad en el escrito de Giedion, a pesar de no mencionar en su texto la teoría y a pesar de que el propio Einstein zanjara el asunto con una carta enviada a Mendelsohn después de que éste le remitiera el capítulo de “Espacio, Tiempo y Arquitectura”, concluyendo categóricamente con la expresión “¡es simplemente dárselas de listo sin base racional alguna!”. GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, pp. 170-174



F.05. Escaleras de acceso desde la Potsdamer Straße. www.panoramio.com



F.06. Fachada principal de la Neue Nationalgalerie, en la Potsdamer Straße. www.criticalissuesintheculturalindustries2.wordpress.com

arquitectura moderna. La Neue Nationalgalerie pone fin a una serie de proyectos en los que, al margen de los ajustes propios de cada propuesta, se ensaya la posibilidad de cubrir un espacio horizontal, diáfano e isótropo en las dos direcciones de la planta con la única ayuda de una cubierta plana soportada por unos pocos apoyos situados en el perímetro de la cubierta que soportan.

El primer proyecto en el que desarrolla esta idea es la *casa cincuenta por cincuenta* de 1950, un recinto de cristal de planta cuadrada cubierto por una estructura plana de cincuenta pies de lado únicamente soportada por cuatro pilares situados en el punto medio de cada costado. Después de la casa, Mies desarrolla el proyecto de la gran *Sala de Convenciones de Chicago* (1953), luego el *Edificio de oficinas de Bacardí en Santiago de Cuba* (1957), después el *Museo Georg Schäfer* (1960) y, finalmente, la *Nueva Galería Nacional de Berlín* (1962), él único que finalmente logra materializar¹¹. A pesar de que el proyecto se empieza en 1962 y se termina en 1963, su construcción no se inicia hasta finales de 1965 y no concluye hasta finales de 1968¹².

El museo se ubica en el centro de Berlín, en un solar trapezoidal delimitado en su lado este por la *Potsdamer Straße*, en su lado sur por la *Reichpietschufer* y por la *Sigismundstraße* en el lado norte. La pendiente del solar, que desciende hacia el oeste, se resuelve por medio de un podio de unos 4 metros de altura en el punto donde el terreno se encuentra más bajo, y construye una superficie horizontal sobre la que se yergue la gran cubierta plana, el elemento formal protagonista del proyecto.

La estructura del podio se realiza en hormigón armado con acero, organizando una retícula de pilares cada 7,2 metros a eje rodeados de un muro de contención perimetral. La cubierta superior, de 64,8 metros de lado y 1,8 metros de canto, es mucho más ambiciosa en su concepción: ocho pilares -dos en cada lado del cuadrado-, separados entre sí 28,8 metros y a 18 metros de la esquina, soportan los más de 4.000 metros cuadrados de superficie de la cubierta, formada por una retícula ortogonal de perfiles de alma llena soldados dispuestos cada 3,6 metros.

09. Según Bruno Zevi, Theo Van Doesburg "realiza una exploración en los códigos figurativos, un sondeo creativo y crítico, que da como resultado documentos de prosa y textos de poesía. Sin su intervención, el laboratorio de diseño más importante de Europa, la Bauhaus de Weimar, no habría llegado a una línea de acción didáctica, el movimiento de renovación holandés se habría dispersado en precarios romanticismos y, finalmente, Oud, Rietveld, Van Eesteren y de una manera especial Mies Van der Rohe, no habrían encontrado un estímulo, un punto de apoyo, un contexto cultural, un lenguaje". Zevi, B. "Leer, escribir, hablar arquitectura." Ed. Poseidón, p. 224. GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 133

"Este nuevo paradigma, la Teoría de la Relatividad, que influye a sus coetáneos y poco a poco se desvanece entre los experimentos cubistas y futuristas, entra a formar parte del discurso teórico de Van Doesburg que inicia un nuevo camino a partir de su interpretación, proponiendo un nuevo modelo de investigación (contra-construcción y re-construcción) desde el que acometer la labor arquitectónica (a pesar de quedarse en un modelo teórico). Su traslación a la obra construida difiere en gran medida de su discurso teórico, alejado de las experimentaciones de Rosenberg en favor de una construcción más convencional por los requerimientos de peso, gravedad, funcionalidad y necesidad de la Arquitectura. Serán Van Eesteren, Rietveld (con su casa Schröder que asume el papel protagonista y épico de la destrucción y re-construcción en un todo articulado por planos que se deslizan) y sobre todo Mies van der Rohe, quienes encuentren en el lenguaje heredado de Van Doesburg el punto de inicio de una nueva poética de la Arquitectura". GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 133

A pesar de ello, el propio Mies se esfuerza por negar tal posibilidad. Ver PUENTE, Moisés (ed): Conversaciones con Mies van der Rohe: certezas americanas. Barcelona: Gustavo Gili, 2006, p. 41

10. *Mies van der Rohe*: "Presentía que era viable armonizar las viejas energías con las nuevas formas. Creía en las virtudes de la civilización moderna y me empeñaba en contribuir, mediante mis realizaciones, al acendramiento de las tendencias que aparecían. Mi convicción se estimulaba con las innovaciones de la ciencia y de la técnica donde encontraba sugerencias para mis investigaciones arquitectónicas. Jamás he cedido, pues siempre he creído que la arquitectura no debe guiarse por la invención de formas inéditas ni por gustos individuales. La arquitectura, para mí, es un arte objetivo y debe regirse por el espíritu de la época en que se desarrolla". *BLASER, Werner*: *Mies van der Rohe* (6a Ed). *Barcelona: Gustavo Gili, 1987*

Mies van der Rohe: "Nuestra civilización depende en gran medida de la ciencia y de la tecnología; esto es un hecho. Todo el mundo debería darse cuenta. La cuestión es hasta dónde podemos expresarlo. Nosotros, los arquitectos, nos encontramos en esta peculiar situación: deberíamos expresar el tiempo y, además, construir en él. Pero, al final, realmente creo que la arquitectura sólo puede ser la expresión de su civilización". *PUENTE, Moisés (ed)*: *Conversaciones con Mies van der Rohe: certezas americanas. Barcelona: Gustavo Gili, 2006, p. 34*

11. *Sobre el conjunto de esta serie de proyectos ver JÄGER, Joachim*: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, pp.42-43; Wächter, Gabriela (ed); Peter Craven (trad)*: *Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin. Berlin: Vice Versa, 1995, pp. 14-15; FRAMPTON, Kenneth*: *Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal, 1999, p. 189*

12. *El acto simbólico de la colocación de la primera piedra se produce el 22 de septiembre de 1965. Un año más tarde la estructura de hormigón está ya terminada y, durante los seis meses siguientes, se construye en su base la cubierta de acero. El 5 de abril de 1967 se eleva la cubierta desde el suelo hasta su posición final. El museo se inaugura finalmente el 15 de septiembre de 1968. Datos obtenidos de Wächter, Gabriela (ed); Peter Craven (trad)*: *Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin. Berlin: Vice Versa, 1995, pp. 18-19*

A pesar de su planta cuadrada, el museo sigue un esquema axial este-oeste. El acceso principal a la cota superior del podio se encuentra en el este, desde la Potsdamer Straße; una breve sucesión de peldaños organizados en dos tramos salva el desnivel existente entre la calle y la cota superior de la terraza, que se configura como un espacio urbano de acceso a las galerías que, al mismo tiempo, sirve de espacio de exposición de esculturas urbanas al aire libre. El porche que resulta de la proyección de la cubierta más allá del recinto acristalado que define el espacio de la planta superior del museo, se constituye en un umbral perimetral entre el espacio interior y el exterior. Dos puertas pivotantes dispuestas simétricamente con respecto al eje perpendicular a la calle permiten el acceso al interior, aunque también se puede acceder desde dos puertas homónimas dispuestas en el lado opuesto de la planta. Con sus 50,40 metros de lado y 8,40 metros de altura libre, este recinto delimitado en sus cuatro lados por una superficie continua de cristal que favorece una relación visual y espacial directa entre el interior y el exterior, hace al mismo tiempo las veces de vestíbulo de acceso y sala de exposiciones temporales ¹³.

Desde esta cota se accede a dos escaleras dispuestas simétricamente con respecto al eje, que conducen al vestíbulo inferior. A pesar de su carácter más introvertido, la planta semisótano sigue también un esquema axial que, desde el vestíbulo de las escaleras, conduce a la sala de exposición de la colección permanente, iluminada lateralmente por un patio destinado a la exposición de esculturas a cielo abierto dispuesto en el lado oeste del proyecto.

Trascendiendo su función expositiva, y más allá del peso específico que tiene en la historia de la arquitectura moderna, la última obra construida por Mies ha pasado ya a ser considerada como una obra maestra de la arquitectura de todos los tiempos. En ella se expresan y condensan, con meridiana claridad, las propiedades fundamentales de una nueva relación arquitectónica entre la estructura y el espacio, deudora de la revolucionaria comprensión científica sobre los fenómenos de la luz y la gravedad formulada por Albert Einstein a principios del siglo XX.

III.5.2. LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO CONTINUO

“La arquitectura siempre es la expresión espacial de la voluntad de una época. Hasta que no se reconozca con claridad esta sencilla verdad no podrá dirigirse con acierto y eficacia la lucha por los fundamentos de una nueva arquitectura.”¹⁴

Mies van der Rohe

De modo análogo a las revoluciones espaciales acaecidas en etapas anteriores, el nacimiento de la nueva concepción espacial moderna debe entenderse como la conjunción de tres factores: el desarrollo de las posibilidades de la tecnología estructural, la necesidad de satisfacer nuevas demandas de orden espacial y los avances realizados en el ámbito de la física teórica.

El siglo XIX es el siglo de las grandes estructuras metálicas acristaladas. Durante las últimas décadas del mismo periodo, los avances realizados en el ámbito de la ingeniería civil se aplican a la construcción de edificios singulares de gran luz pero, salvo raras excepciones, este espectacular desarrollo estructural no reverbera en la construcción edilicia. No obstante, a finales de siglo se desarrolla una nueva tipología estructural, la estructura en esqueleto reticular, destinada a satisfacer las nuevas necesidades espaciales de los edificios industriales, comerciales o de oficinas¹⁵. Finalmente, entre finales del siglo XIX y principios del XX, se populariza el uso de este tipo de estructuras en hormigón armado con acero en todos los ámbitos de la arquitectura, especialmente en la construcción de nuevos bloques residenciales¹⁶. Aunque de un modo latente, este tipo de estructura estuvo ya presente en algunos edificios decimonónicos¹⁷, a lo largo del siglo XX esta tipología deja de percibirse únicamente como una posibilidad constructiva para convertirse en una decisión intelectual de orden espacial¹⁸.

Pero, al margen de la necesidad de satisfacer estas cuestiones constructivas y funcionales, el nacimiento de una nueva concepción espacial requiere también de una nueva manera de comprender

13. Todo el proyecto se organiza siguiendo una retícula de 1,2 metros: los 50,40 metros de lado corresponden a 42 módulos y los 8,40 metros de altura interior libre a otros 7. Los datos numéricos aquí expuestos han sido extraídos de CARTER, Peter: Mies van der Rohe trabajando. London: Phaidon 2006, p. 96.

14. NEUMEYER, Fritz: Mies van der Rohe: la palabra sin artificio: reflexiones sobre la arquitectura 1922-1968. Madrid: El Croquis Editorial, 1995, p. 371

15. Cabría aquí destacar, por ejemplo, la *Fábrica de Chocolate Menier (Noisel-sur-Marne, París, 1872)*, proyectada por Jules Saulnier y considerada por Giedion el primer edificio con estructura completamente de hierro (ver GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis; Building in France, building in iron, building in ferro-concrete. Santa Monica: Getty Center for the History of Art and Humanities, 1995, p. 130). El mismo autor menciona el *Leiter Building (Chicago, 1889)*, construido por William Le Baron Jenney, como el primer edificio de estructura reticular (ver GIEDION, Sigfried: GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, pp. 385 y 398-401).

16. Ver El cemento armado y su influencia en la arquitectura, en GIEDION, Sigfried: GIEDION, Sigfried: Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, pp. 334-345.

17. Por ejemplo, el forjado plano del primer piso de las naves laterales de la *Galería de las Máquinas de París de 1889*, analizada en el apartado anterior, muestra ya rasgos formales y estructurales que luego definirán a la estructura reticular en esqueleto.

18. “Sólo allí donde la arquitectura se apoya en las fuerzas materiales de una época, puede llegar a ser la consumación espacial de su decisión espiritual. Este es su verdadero sentido y en ninguna otra época ha sido diferente”. Mies van der Rohe, *Conferencia en la asociación Immermann (Düsseldorf, 1927)*. NEUMEYER, Fritz: Mies van der Rohe: la palabra sin artificio: reflexiones sobre la arquitectura 1922-1968. Madrid: El Croquis Editorial, 1995, p. 400

los fenómenos físicos que rigen el universo. Sólo el nacimiento de un nuevo paradigma científico sobre las leyes fundamentales de la física, como el espacio, la gravedad y la luz, es capaz de estimular un progreso tecnológico y espacial semejante.

A pesar de las traslaciones -en ocasiones demasiado directas- de algunos artistas de vanguardia a principios del siglo XX, y de las posteriores forzaturas conceptuales de ciertos teóricos modernos¹⁹, debe reconocerse que la influencia de la noción física de espacio-tiempo desarrollada por Minkowski y Einstein en las reflexiones europeas de principios de siglo sobre la espacialidad del arte en general y de la arquitectura en particular.

Mientras que las nociones de espacio y tiempo en las que Isaac Newton fundamenta su física son concebidas como entes absolutos y ajenos tanto al observador como a los fenómenos físicos que en ellos se producen, la física relativista se fundamenta en la idea de que espacio y tiempo forman en realidad un continuo espacio-temporal cuyas propiedades físico-geométricas se ven alteradas por los fenómenos físicos que actúan sobre la materia y por las condiciones en que el observador las percibe. Desde un punto meramente físico el espacio deja de entenderse como algo absoluto, estático y pasivo, para pasar a concebirse como algo relativo, dinámico e interactivo.

En el ámbito de la arquitectura, tal y como se ha expuesto en apartados anteriores, el carácter espacial de cada época ha venido definido por una dicotómica tensión entre el interior y el exterior. Así, la imposibilidad de afrontar con solvencia técnica suficiente la cubrición de grandes espacios induce a la primera concepción espacial a configurar espacios exteriores, libres de cualquier forma de cubrición. En cambio, el posterior desarrollo de nuevas posibilidades estructurales permite cubrir y cerrar grandes espacios interiores durante la segunda etapa. Ambas concepciones espaciales se constituyen, pues, como opuestos: la primera identifica la arquitectura con el espacio exterior y la segunda lo hace con el interior. Pero, a pesar de su inherente carácter opuesto, ambas concepciones espaciales se configuran como entidades espaciales

19. Es habitual relacionar esta nueva representación espacio-temporal relativista con las propiedades del espacio arquitectónico moderno por medio de la incorporación proyectual de la componente temporal en la experiencia del espacio arquitectónico. La espacialidad tridimensional renacentista, basada en la percepción en perspectiva desde un punto fijo, se sustituye por una espacialidad que requiere del movimiento del espectador (por el espacio y en el tiempo) para percibir en su totalidad el espacio construido. Se alude también a la continuidad del espacio-tiempo para defender la "fluidez" del espacio moderno. Incluso se alude a la curvatura del espacio-tiempo einsteiniano para defender la validez de las formas curvas sobre las planas. A pesar del interés que despiertan en el autor estas cuestiones, no devienen objeto de estudio del presente trabajo de investigación, pues en ningún momento se ha planteado el análisis de la influencia de la comprensión física -e incluso filosófica- de la noción de espacio en el ámbito de la arquitectura a lo largo de la historia.

autónomas en las que el espacio protagonista no establece ningún tipo de vínculo lumínico o visual con su opuesto. En la primera concepción espacial la arquitectura se identifica con el exterior y el interior no tiene ninguna relevancia, no existiendo entre ambos ningún tipo de relación topológica. En la segunda concepción se identifica el hecho arquitectónico con el interior al margen de lo que ocurra en el exterior, del que se enajena casi por completo. En ambos casos el espacio protagonista del hecho arquitectónico, sea interior o exterior, se concibe como una entidad autónoma, independiente y ensimismada, propiedades que en cierto modo y salvando las distancias, podrían vincularse a la clásica noción física de espacio.

En el siglo XIX las estructuras lineales de hierro revestidas de cristal permiten abrir al exterior un espacio que, durante casi dos milenios, había permanecido cerrado y aislado. Este hecho tiene una trascendencia fundamental, no sólo por la apertura visual y lumínica que supone para el propio espacio, sino porque pone fin a la histórica dicotomía entre interior y exterior. Pero, con la renuncia a esta contraposición de opuestos espaciales, se pierde también el carácter propio y diferenciado que hasta entonces había caracterizado, en las dos etapas anteriores, al espacio arquitectónico. Al abrirse al exterior, el interior se exterioriza y pierde su propia identidad. Interior y exterior se funden y confunden en una misma unidad espacial.

A lo largo del siglo XX se conforma una nueva concepción espacial que, en cierto modo, sintetiza y aglutina las cuestiones anteriormente apuntadas. El espacio moderno participa al mismo tiempo de la exterioridad de la primera concepción, de la interioridad de la segunda, y de la interrelación entre interior y exterior de la tercera, estableciendo un orden espacial totalmente nuevo. La antigua segregación del interior y el exterior desaparece sin tener que recurrir a la fusión de ambas, pues el espacio moderno es capaz de abrirse al exterior sin perder su carácter interior, combinando la transitividad y la apertura propias del siglo XIX con la dicotomía espacial de las etapas anteriores. En la arquitectura moderna el interior y el exterior ni se segregan ni se funden sino que, manteniendo su propia



F.07. Vestíbulo de acceso y exposición de la Neue Nationalgalerie: un espacio idealmente definido por dos planos horizontales.

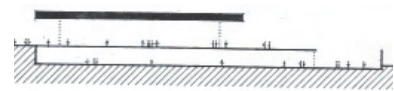
Fotografía modificada por el autor: www.urbipedia.org

entidad, se vinculan entre sí de un modo continuo²⁰. Es por ello que no parece aventurado señalar un cierto paralelismo entre las propiedades físicas del espacio relativista y las características del espacio arquitectónico moderno, abierto y continuo por definición.

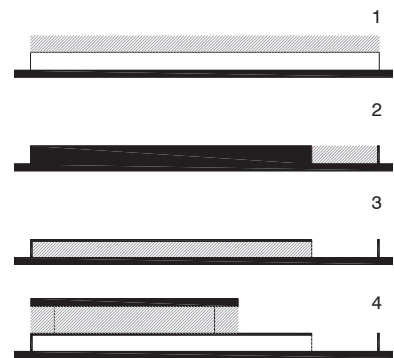
Idealmente, este nuevo espacio arquitectónico se define únicamente por dos planos: uno inferior que hace las veces de suelo, otro superior que cubre el espacio. Este plano superior tiene la misión de obstruir el paso de la luz, construyendo una sombra que es la que otorga al espacio su carácter interior. Pero, a diferencia de la segunda concepción espacial, esta cubrición tiene la peculiaridad de ser idealmente plana. A diferencia de las formas de cubrición abovedadas propias de épocas anteriores, la forma plana y paralela al suelo, es decir, el plano horizontal, otorga a la sección una total homogeneidad que propicia la continuidad del espacio, tanto en el interior del mismo, como en su relación con el exterior. El espacio moderno es un espacio horizontal, cubierto y delimitado únicamente por un plano horizontal.

Para que esta continuidad espacial horizontal pueda desarrollarse completamente, es necesario minimizar la obstrucción provocada por la existencia de elementos verticales. Es por ello que, en total continuidad con el desarrollo arquitectónico decimonónico, el muro se desdobra en dos elementos que cumplen sus funciones por separado: la estructura y el cerramiento. La primera satisface la ineludible necesidad de apoyo de la cubierta únicamente por medio de un reducido número de soportes puntuales, mientras que gracias a su transparencia el segundo define el espacio verticalmente sin comprometer el libre paso de la luz y las vistas.

El conjunto de la obra de Mies reúne de un modo unívoco e inequívoco todas estas propiedades espaciales, irguiéndose la Neue Nationalgalerie de Berlín, su última obra, en monumento a la arquitectura moderna. En ella pueden distinguirse claramente las cuatro unidades espaciales elementales: el podio, el porche, el aula y el patio. Tanto el podio como el patio se caracterizan por la falta de necesidad de cualquier tipo cubrición en la definición del espacio



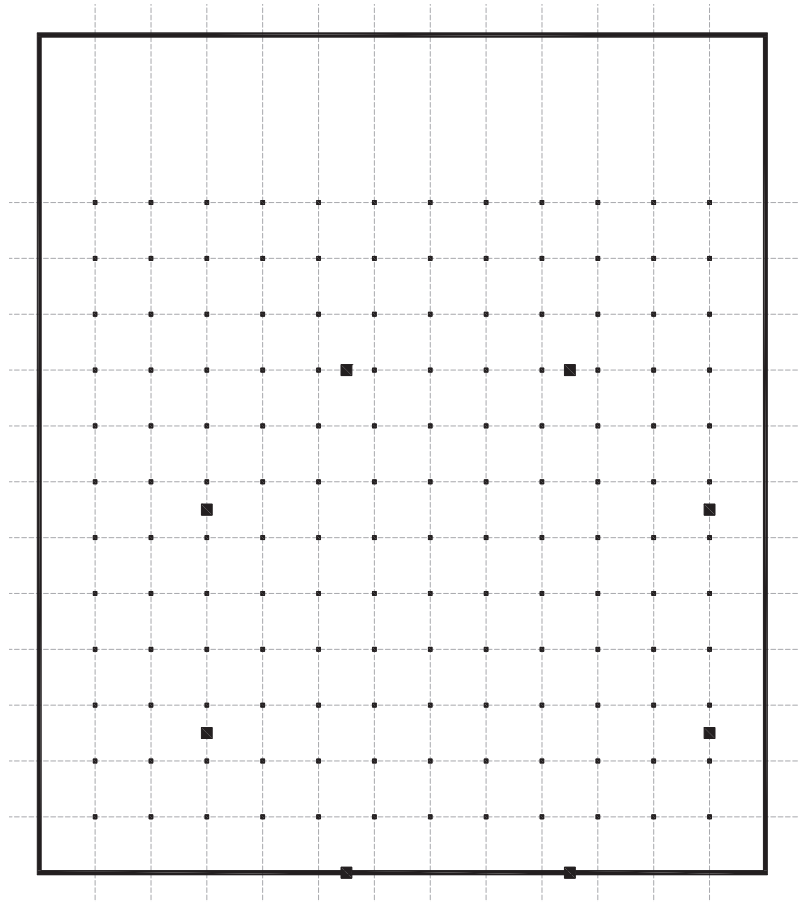
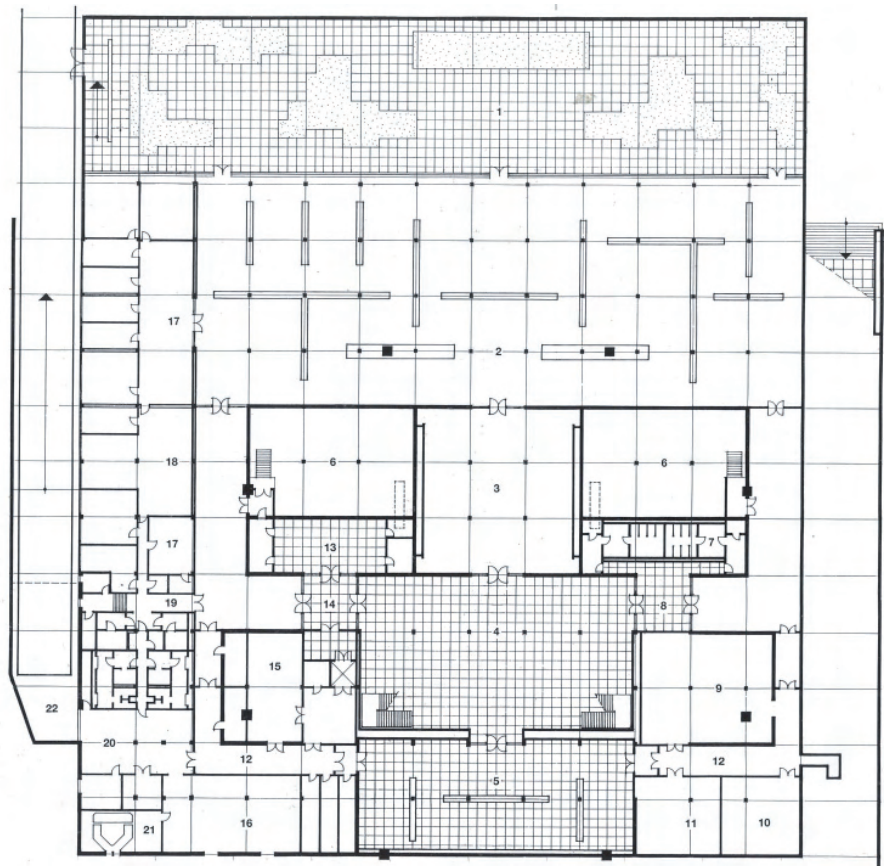
F.08. Sección esquemática con las distintas unidades espaciales presentes: podio, porche, patio y aula. VANDENBERG, Maritz: New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe. London: Phaidon, 1998, p. 5



F.09 Esquema de las cuatro unidades espaciales básicas, representadas en la Neue Nationalgalerie de Berlín: 1) podio; 2) patio; 3) aula; 4) porche. Dibujo del autor.

20. "La modernidad del siglo XX había asumido resolver este conflicto en un nuevo estadio de evolución, y liberar el tipo edificatorio clásico de la polaridad entre interior y exterior, de la oclusión del espacio interior y de cada uno de los elementos. La revuelta contra estos principios tenía como objetivo sustituirlos por nuevos principios opuestos. En el lugar de la idea clásica vitruviana de la arquitectura se colocó la idea novedosa de superación de la separación entre interior y exterior". NEUMEYER, Fritz: Mies van der Rohe: la palabra sin artificio: reflexiones sobre la arquitectura 1922-1968. Madrid: El Croquis Editorial, 1995, p. 27

1. Jardín de las esculturas.
2. Espacio de exposiciones grande.
3. Espacio de exposiciones pequeño.
4. Vestíbulo de las escaleras.
5. Sala de imagen.
6. Sala de aparatos.
7. Baños públicos.
8. Vestíbulo norte.
9. Almacén.
10. Sala de calderas.
11. Almacén.
12. Circulación restringida.
13. Restaurante.
14. Vestíbulo sur.
15. Almacén.
16. Sala del transformador.
17. Área administrativa.
18. Biblioteca.
19. Baños personal.
20. Área de embalaje.
21. Sala de instalaciones.
22. Área de carga y descarga.
23. Terraza.
24. Muro de vidrio.
25. Espacio expositivo.
26. Conducto de instalaciones.
27. Guardarropa.
28. Ascensor.
29. Escalera al nivel inferior.
30. Área de losas desmontables.



F.10. Planta semisótano, con y sin tabiques de distribución, 1/100. Dibujos del autor, basado en VANDENBERG, Maritz: *New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe*. London: Phaidon, 1998, p. 46 y SCHULZE, Franz (ed); DANFORTH, George E.: *The Mies van der Rohe Archive: an illustrated catalogue of the Mies van der Rohe drawings in the Museum of Modern Art. Part II; volume XIX: New National Gallery, Martin Luther King Jr. Memorial Library, and other buildings and projects*. New York and London: Garland, 1992, pp. 172 y 184.

más allá de la que proporciona la bóveda celeste, así que no dan lugar a la existencia de ningún tipo de soporte que pueda entorpecer la continuidad del mismo. Esta cuestión sólo se plantea como tema proyectual a solventar en el porche que configura el vestíbulo de entrada y en el aula compartimentada que conforma el sótano, aunque el modo de afrontar y resolver esta cuestión difiere en ambos casos.

El sótano se constituye como una gran sala hipóstila, una trama regular y equidistante de pilares que, al mismo tiempo que soportan el peso de la cubrición, pautan, estructuran y ordenan el espacio. Gracias a la tecnología moderna, los robustos soportes antiguos, excesivos en cantidad y sección, se sustituyen por apoyos puntuales reducidos en número y tamaño. La antigua sala hipóstila se transforma, pues, en una moderna estructura reticular. El espacio gana así en amplitud, fluyendo libre y continuamente entre unos soportes que, al quedar aislados, adquieren mayor autonomía formal ²¹.

La compartimentación funcional de este espacio continuo, necesaria para la subdivisión de los distintos usos que aloja la planta, se confía a los tabiques ²². Tan necesarios desde el punto de vista funcional como irrelevantes desde el estructural, estos paramentos verticales de delimitación espacial dotan a la planta de una inusitada flexibilidad proyectual que Le Corbusier identifica con la noción de *planta libre*. La relación topológica entre la delimitación espacial vertical y los elementos estructurales de soporte se convierte, así, en uno de los principales temas proyectuales de la arquitectura moderna ²³: unas veces subordinando la división espacial al orden estructural, otras disociando la delimitación espacial de la retícula portante, la obra de Mies ahonda en su conjunto en esta cuestión con particular lucidez.

Tal como apunta el propio Mies, el techo plano es un requisito fundamental de la planta libre ²⁴, pues sólo la isotropía y la homogeneidad que brindan dos planos horizontales dispuestos a una cierta distancia puede admitir la libre disposición de los planos

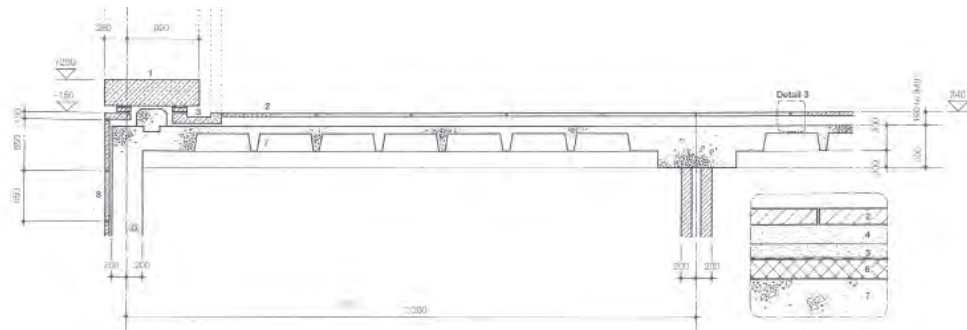
21. *El soporte puntual moderno adquiere autonomía formal con respecto al espacio que lo circunda. Es por ello que la arquitectura moderna en general, y la de Mies en particular, muestran una gran sensibilidad en el diseño de la sección del soporte. Sobre la abstracción formal del soporte moderno ver apartado III-5.3.3. La levedad como abstracción de la condición del apoyo.*

22. "La subdivisión: La nueva arquitectura es abierta. El conjunto consiste en un solo espacio, el cual está subdividido según exigencias funcionales. Esta subdivisión se hace por medio de planos (...) que separan entre sí los diferentes espacios funcionales; pueden ser móviles, es decir, los planos de separación (muros interiores) pueden ser reemplazados por pantallas móviles o planchas (en cuya categoría las puertas pueden ser también incluidas)". *Noveno punto del artículo de Theo Van Doesburg "Tot een beeldende Architectuur" De Stijl, VI, nº6/7, Agosto 1924. pp. 78-83. Citado en GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 123*

23. "La planta libre establece la separación entre elementos portantes y no portantes. Distingue claramente lo que es estructura y lo que deja de serlo para convertirse en cerramiento: La libertad en la planta la proporciona la evolución de los elementos verticales. Cuando teníamos muros de carga gruesos no existían muchas opciones de manipular el espacio; con los muros convertidos en pilares dentro de una estructura reticular, ordenada y equidistante, las posibilidades se hicieron mayores y ahora que se supera el orden que esos pilares pueden establecer, las soluciones son casi infinitas (...). Lo que sí permite una planta libre son cambios en la disposición de sus elementos porque la estructura permanece. Podemos concluir destacando que cuando nos referimos a un elemento descriptivo horizontal (la planta) la libertad la proporciona un elemento estructural vertical (el pilar). La Planta Libre es consecuencia de la evolución que se produce al pasar de los muros a los pilares". *DEL VALLE, Raúl: La planta dispersa. La evolución de la planta libre, en CAMPO BAEZA, Alberto (ed): La Estructura de la estructura. Buenos Aires: Nobuko, 2010, p. 72*



F.11. Continuidad del falso techo en la zona expositiva de la planta semisótano. SAFRAN, Yehuda; TRIGUEIROS, Luiz (ed); MARTIN BARATA, Paulo (ed): *Mies van der Rohe*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001, p. 166.



F.12. Detalle del forjado reticular de hormigón armado con acero.

VANDENBERG, Maritz: *New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe*. London: Phaidon, 1998, p. 50

verticales de división espacial. Con independencia de su relevancia estética o compositiva en la configuración de la imagen exterior del conjunto, el plano horizontal se convierte, especialmente en su cara inferior, en un elemento fundamental en la caracterización del espacio interior. Dicho de otro modo, la espacialidad moderna se caracteriza más por el techo plano que por la cubierta plana, pues mientras el primero tiene su razón de ser en una determinada voluntad espacial, la segunda sólo puede entenderse como una decisión formal²⁵.

La introducción del hormigón armado en la edificación permitió investigar nuevas tipologías de forjados. La plasticidad del material invitaba a unificar los distintos elementos estructurales que hasta entonces conformaban los techos: vigas, viguetas, capiteles y ábacos fueron reduciendo paulatinamente su relevancia formal y estructural a fin de obtener una losa plana y lisa en su cara inferior que resolviera, al unísono, los requerimientos mecánicos y los anhelos espaciales. La optimización mecánica de estas losas planas ante determinadas solicitaciones mecánicas animó el desarrollo en paralelo de forjados formados por envigados perpendiculares y coplanares, una solución ejecutable también en acero. La ausencia de una superficie plana inferior en este tipo de forjados se suple con frecuencia con la disposición de un falso techo que, al mismo tiempo que esconde las cada vez más abundantes instalaciones técnicas que discurren por debajo de los techos -iluminación, climatización, renovación de aire, cableado, etc.-, recupera esa anhelada continuidad superficial inferior.

Este es el caso del sótano de la Neue Nationalgalerie. El espacio se cubre por medio de un forjado reticular de hormigón armado de encofrado recuperable de un canto total de treinta centímetros con los ábacos descolgados otros veinte. Un falso techo de placas de yeso blanco situado a una altura de cuatro metros, oculta el paso de las instalaciones y recupera la continuidad inferior. No obstante, hay que señalar que en su encuentro con las paredes y las carpinterías, la modulación de la parte registrable del techo desaparece y, con ello, se produce una cierta discontinuidad en su superficie. Las puertas, de vidrio, se disponen en grandes paramentos del mismo material de suelo a -falso- techo, hecho que ayuda a enfatizar la sensación

24. "¿Su preferencia por el clasicismo no le habrá hecho pasar por alto que la cubierta plana, al margen de todos los estilos de cubiertas, es el requisito de la planta libre?". *Borrador de carta, hacia 1927. Conservado en: MoMA, Manuscripts Folder 2. NEUMEYER, Fritz: Mies van der Rohe: la palabra sin artificio: reflexiones sobre la arquitectura 1922-1968. Madrid: El Croquis Editorial, 1995, p. 401*

25. "También el movimiento arquitectónico mantiene su lucha emblemática. Es la lucha por la cubierta plana. También aquí se acusa a los opositores de ser reaccionarios y a los defensores de extranjeros. Esta lucha se combate con una energía como si se tratase del aspecto más crucial de la arquitectura. Sin embargo, sólo es una lucha por exterioridades, aunque participen en ella destacadas personalidades. No tiene nada que ver con la batalla por las bases de una nueva arquitectura". *Conferencia en la asociación Immermann de Düsseldorf. Manuscrito no publicado del 14 de Marzo de 1927, conservado en el Archivo Dirk Lohan, Chicago. NEUMEYER, Fritz: Mies van der Rohe: la palabra sin artificio: reflexiones sobre la arquitectura 1922-1968. Madrid: El Croquis Editorial, 1995, p. 400*



F.13. Perspectiva y collage del espacio expositivo de la planta semisótano, mirando hacia el jardín de las esculturas.
JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe*. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 55



F.14. Fotografía del espacio expositivo de la planta semisótano, mirando hacia el jardín de las esculturas.
JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe*. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 23

de continuidad visual a pesar de la notoria presencia cromática que adquiere la carpintería negra sobre las superficies claras con las que entra en contacto.

La estructura de soporte está formada por una retícula de doce por doce pilares dispuestos equidistante y perpendicularmente entre sí, rodeada por un muro perimetral que contiene las tierras y delimita el espacio al mismo tiempo. El trazado del muro coincide con la huella de la cubierta en tres de sus lados, pero en el lado oeste se proyecta más allá de la losa. Como resultado de esta operación proyectual se construye un recinto a modo de patio al que queda abierta el aula en toda su anchura.

La continuidad del espacio interior hacia el exterior se consigue por medio de la transparencia visual que ofrece el vidrio plano que se constituye en cerramiento. Se consigue así una franca relación visual entre la galería y el patio, percibida desde el interior como una apertura total al exterior. A diferencia de los tabiques interiores, el trazado del cerramiento no coincide con la última línea de pilares, enfatizando así la autonomía de la estructura vertical y el cerramiento de fachada, que sí queda enrasado con el canto del forjado.

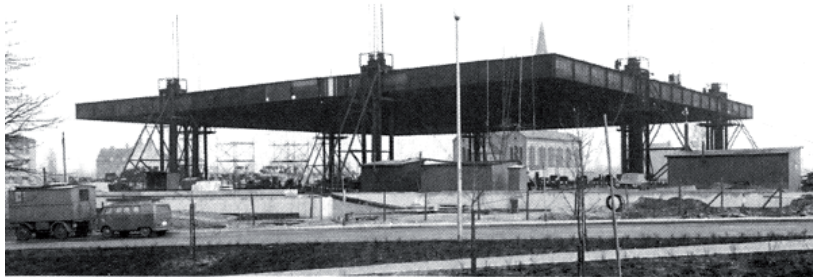
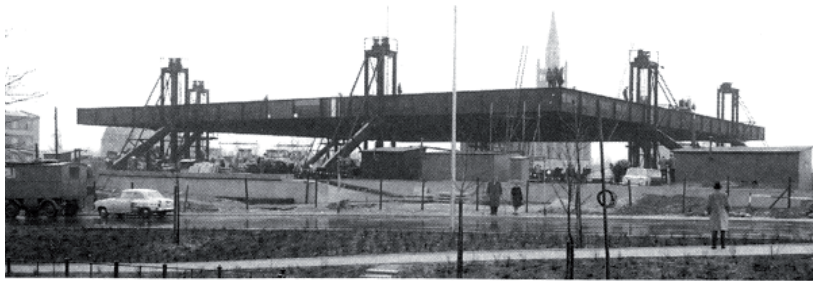
En las perspectivas realizadas durante el proceso de proyecto puede apreciarse la voluntad de continuidad espacial del arquitecto. La presencia del vidrio únicamente se expresa a través de las carpinterías que deben soportarlo, transmitiendo así una imagen de transparencia total que luego en la realidad se ve matizada por la presencia de brillos y reflejos.

La continuidad espacial horizontal se ve enfatizada también por la prolongación del pavimento a través de su despiece, aunque en la obra construida no se produce con la misma claridad. Aún cuando el despiece del granito no queda oculto por la moqueta -una superficie sin juntas, y de color y textura distintos-, puede percibirse una clara diferencia de acabado entre el pulido pavimento interior y el vasto suelo exterior. En la realidad de la obra construida esta discontinuidad se ve acentuada, además, por la geometría (más



F.15. Transparencia de los paños de vidrio que contienen las puertas que conectan los distintos espacios de la planta semisótano. JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe*. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 22

26. "Este espacio exterior [el jardín de las esculturas] es lo inverso al espacio del pabellón superior: en lugar de amplitud y apertura, este espacio es cerrado e introvertido". JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe*. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 28



F.16. El 5 de abril de 1967, en una operación que duró 9 h y en la que se utilizaron 16 grúas hidráulicas, se elevó la cubierta desde el suelo hasta su posición final. Durante el día siguiente se irguieron los ocho pilares de acero. WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): *Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin*. Berlin: Vice Versa, 1995, p. 69



F.17 La cubierta, a 1,20 metros del suelo durante la fase de montaje.

robusta en la realidad construida que en el dibujo) y el color (neutro en la perspectiva, negro en la realidad) de las carpinterías que aguantan el vidrio. Se evidencian así los esfuerzos de Mies por conjugar la total continuidad espacial que consiguió en el Pabellón de Barcelona tres décadas antes, con la necesidad de proteger el espacio interior de las inclemencias atmosféricas. La continuidad espacial es más visual que física, pues tanto el vidrio como su carpintería, así como la interrupción del techo, establecen con claridad la línea de separación entre el interior y el exterior.

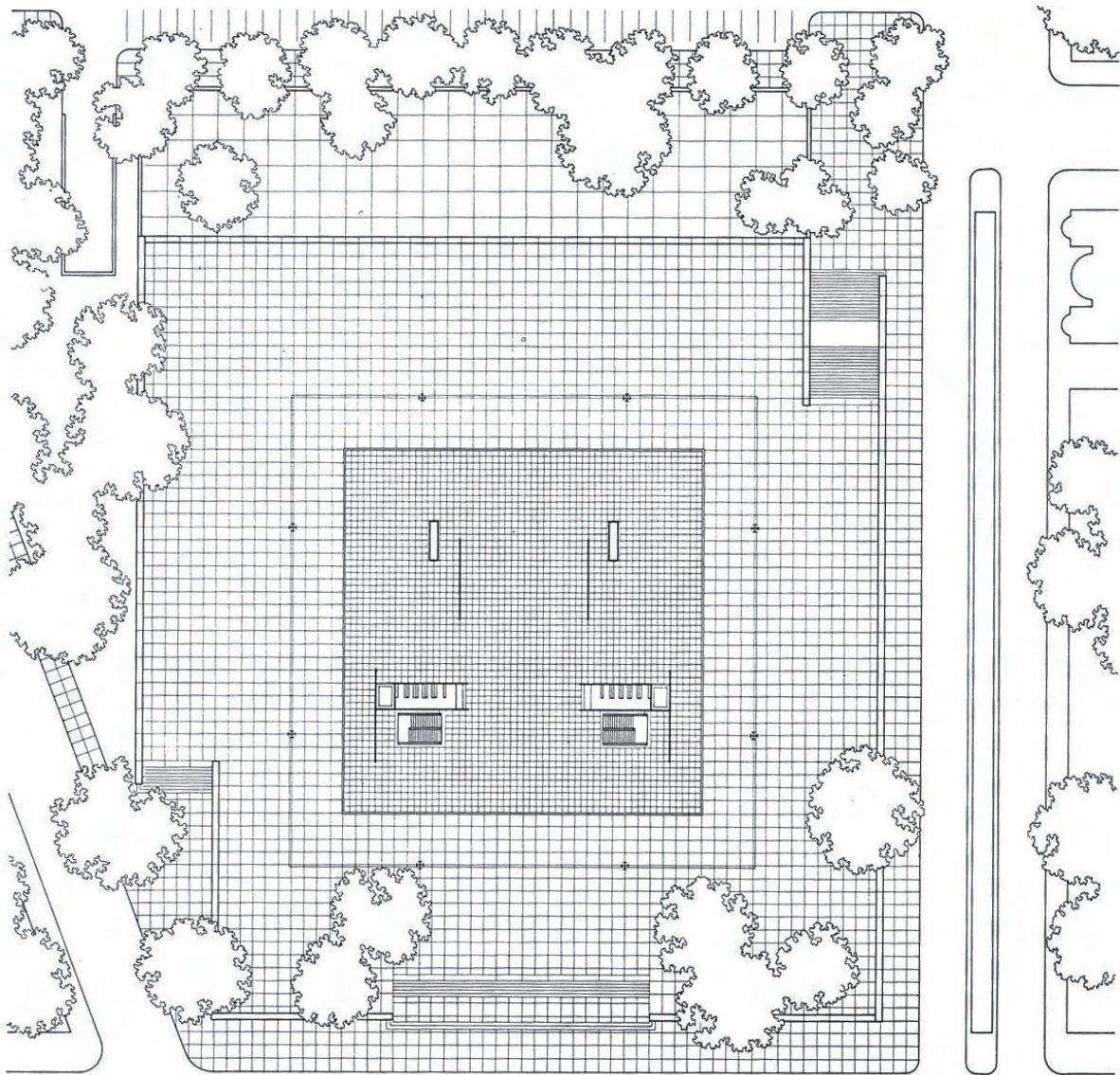
En la parte superior del podio que aloja el patio y el aula se dispone el gran porche que da imagen al museo. Desde un punto de vista puramente espacial, el patio y el porche pueden interpretarse como entidades opuestas: el primero se configura idealmente como un espacio delimitado verticalmente en todo su perímetro y abierto cenitalmente, mientras que el segundo se caracteriza por estar abierto en todo su perímetro y estar cubierto en su parte superior²⁶. Su inherente continuidad horizontal hace del porche la unidad espacial moderna por antonomasia; no en vano, deviene en una pieza fundamental en la obra de Mies.

Es en la gran cubierta que configura el porche de acceso y exposiciones temporales donde el arquitecto aborda con mayor ambición y claridad los temas proyectuales que caracterizan a la espacialidad moderna. Mies define aquí el espacio con los mínimos elementos, empleando únicamente dos planos horizontales²⁷. La distancia entre ambos planos establece la altura libre interior, una cuestión de primera magnitud en la caracterización del espacio. Debido a la dificultad que hubiera entrañado el andamio necesario para construir la cubierta directamente en su altura final, se decidió construir el techo a una altura de 1,20 metros de la cota superior del podio, una cota mucho más cómoda para los operarios que debían proceder a su montaje. La posición de la misma se fijó por medio de gatos hidráulicos que, una vez terminado su ensamblaje, la elevaron hasta su altura definitiva. Acto seguido se irguieron los ocho pilares perimetrales y se descansó en ellos la cubierta²⁸. De ello se desprende que, en términos puramente espaciales, la misión

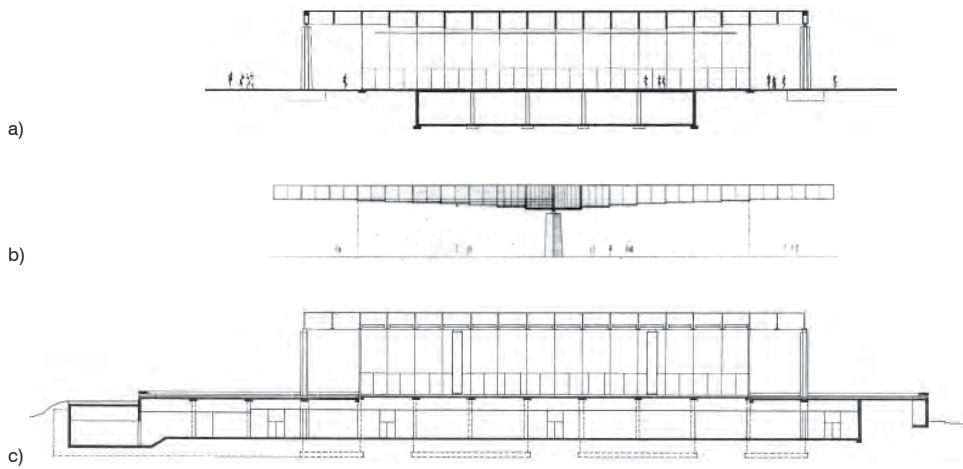
27. "La verdadera herramienta que Mies emplea para crear el espacio es el plano horizontal. Mies construye espacios horizontales con planos horizontales". *Del Valle, Raúl: BUSCANDO EL HORIZONTE. Opacidad, transparencia y translucidez en los límites de Mies, en CAMPO BAEZA, Alberto (ed): Aprendiendo a pensar. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 63.*

"Si nos olvidamos de la cella acristalada que ocupa gran parte del espacio cubierto, nos encontramos con un espacio sandwich, es decir, un espacio exclusivamente definido por los planos horizontales del suelo y el techo: el ideal espacio miesiano". *ALMONACID CANSECO, Rodrigo: Mies van der Rohe: el espacio de la ausencia. Valladolid: Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial, 2006, p. 71*

28. "Si la construcción de la cubierta se hubiera realizado a su altura definitiva de unos 8,70 m por encima de la estructura de hormigón, hubiera precisado una compleja estructura temporal para soportar la malla de vigas durante el proceso de construcción así como la plataforma para los soldadores. Por esta razón toda la construcción fue ensamblada a una altura de 1,20 m, ideal para los trabajos de soldado. Fue luego cuando fue elevada a su posición final. Cuando empezó el trabajo de ensamblaje de la cubierta el nivel inferior de la galería había sido ya completado empleando hormigón in situ. Las vigas de cubierta fueron recibidas en obra por mitades prefabricadas, que fueron soldadas juntas formando una sección de viga completa más parecida a un puente que a una cubierta. Este envigado pesaba más de 45 toneladas y fue transportado por vía férrea al lugar. Cuando la malla fue completada, la cubierta fue elevada a su altura final de 8.74 m utilizando gatos hidráulicos, que fueron dispuestos en el lugar de las columnas. Las columnas estaban dispuestas horizontalmente y fueron elevadas por la cabeza hasta la posición requerida antes de que la cubierta fuera lentamente elevada. Esta operación duró 9 horas". *WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin. Berlin: Vice Versa, 1995, p. 68*



F.18. Planta baja, 1/1000. BLASER, Werner; HORNE, Matilde (trad): *Mies van der Rohe: el arte de la estructura*. México D.F.: Hermes, 1965, p. 189



F.19. Secciones comparativas, 1/1000:

- a) Proyecto de oficinas en Bacardí. SCHULZE, Franz (ed); DANFORTH, George E.: *The Mies van der Rohe Archive: an illustrated catalogue of the Mies van der Rohe drawings in the Museum of Modern Art. Part II; volume XVII*. New York and London: Garland, 1992, p. 54
- b) Versión previa de la Neue Nationalgalerie. WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): *Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin*. Berlin: Vice Versa, 1995, p. 13
- c) Sección definitiva de la Neue Nationalgalerie. VANDENBERG, Maritz: New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe. London: Phaidon, 1998, p. 49

de los soportes no es otra que fijar la separación de los dos planos horizontales que configuran el espacio a una distancia concreta, estableciendo así la altura del espacio.

La gran cubierta plana, de 64,80 metros de lado cubre, con la única ayuda de ocho potentes pilares situados en el perímetro, un gran espacio de más de 4.000 metros cuadrados de superficie²⁹. La ausencia de soportes intermedios y la innecesaridad de cualquier tipo de división espacial, más allá del mobiliario que define la zona de recepción, hacen de este espacio el ideal construido de la planta libre³⁰. La versatilidad y la flexibilidad de uso de este gran espacio diáfano es casi total, pues su continuidad interna únicamente se ve interrumpida por la existencia de las dos grandes chimeneas de instalaciones que atraviesan el espacio desde el sótano hasta la cubierta.

Tanto en el proyecto del edificio de oficinas de Bacardí en Santiago de Cuba como en la versión previa de la Neue Nationalgalerie con sólo cuatro apoyos, la cubierta exhibe un aumento progresivo del canto en la parte central a fin de contrarrestar el mayor momento flector en esa zona. En ambos casos se prima la horizontalidad de la cubierta a la planeidad inferior del techo, hecho que contraviene la lógica interna de la planta libre. A fin de contrarrestar los efectos espaciales de esta circunstancia, Mies plantea en el proyecto de Bacardí la disposición de un falso techo horizontal suspendido de la estructura, de modo análogo al que había ensayado en 1942 en el célebre fotomontaje para una sala de conciertos en el taller de construcción aeronáutica Glen Martin de Albert Kahn en Baltimore. Pero, gracias a la inestimable ayuda de los ingenieros, en el diseño definitivo de la Neue Nationalgalerie se consigue la ansiada planeidad de la cara inferior de la trama de perfiles de acero que conforman la estructura. La práctica ausencia de instalaciones en el techo, más allá de la iluminación oculta tras la malla metálica que se dispone en los huecos de la retícula estructural, hace innecesaria la construcción de ningún falso techo. En términos puramente espaciales, la horizontalidad de la cara inferior de la retícula de acero basta para garantizar la continuidad y la flexibilidad que se le exigen a este gran espacio pues, si bien el techo plano es un requisito de la planta libre,



F.20. Fotomontaje para una sala de conciertos en el taller de construcción aeronáutica Glen Martin de Albert Kahn en Baltimore. CARTER, Peter: *Mies van der Rohe trabajando*. London: Phaidon 2006, p. 78-79

29. "Al igual que Viollet-le-Duc, Mies consideró que el "gran espacio" era la prueba final del valor de una civilización". FRAMPTON, Kenneth: *Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX*. Madrid: Akal, 1999, p. 189

30. "La obra de Mies, a lo largo de toda su evolución, es el intento de lograr la continuidad horizontal de un espacio que se extienda sin encontrar ningún obstáculo en su interior (...) Es únicamente en los edificios de un solo espacio en los que la diafanidad se consigue totalmente, pues tanto las vigas como los pilares pasan a situarse fuera de la envolvente del edificio. (...) En proyectos como el del edificio Bacardí, en Santiago de Cuba, el Georg-Schäfer-Museum o –como edificio construido- la Nueva Galería Nacional de Berlín, los pilares se separan completamente del cerramiento, se independizan totalmente por fuera; unos pocos pilares, sólo dos por lado, forman un pabellón exterior a la perfecta caja de cristal, que encierra un espacio totalmente diáfano". CORTÉS, Juan Antonio: *Lecciones de equilibrio*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2006, pp. 71-72

31. *El diccionario de la RAE da, entre otras, las siguientes definiciones de "plano":* 1. adj. Llano, liso, sin relieves. 2. adj. Geom. Perteneciente o relativo al plano. 3. m. Geom. superficie plana (La que puede contener una recta imaginaria en cualquier dirección).

32. "El vestíbulo de la Galería Nacional de Berlín de Mies van der Rohe está conformado por el plano del suelo y por la cuadrícula de acero negro que conforma el techo. Apenas tiene límites en el perímetro. El vidrio propicia que, desde el interior, nuestra mirada se prolongue hasta el infinito. Hecho que se ve incrementado por la circunstancia de que el gran cuadrado negro, que parece gravitar sobre nosotros, y el suelo, atraviesan la línea del vidrio prolongándose con nuestra mirada". ARNUNCIANO PASTOR, Juan Carlos: *Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 93



F.21. Porche perimetral de la Neue Nationalgalerie.

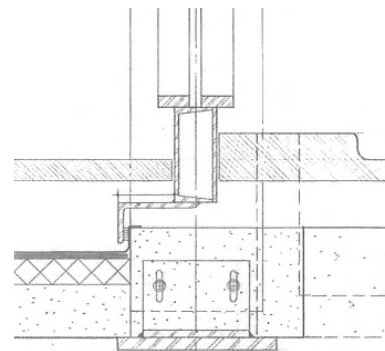
VANDENBERG, Maritz: *New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe*. London: Phaidon, 1998, p. 22

lo es en su acepción geométrica, la que define la superficie plana como aquella que puede contener una recta imaginaria en cualquier dirección, y no en su acepción superficial, que hace referencia al acabado llano, liso, sin relieves³¹.

Tal como se ha señalado anteriormente, el porche es una unidad espacial caracterizada por una máxima continuidad horizontal entre el interior y el exterior, únicamente cuestionada por la ineludible existencia de los soportes que aguantan la cubierta que delimita cenitalmente el espacio. En este sentido, es evidente que, a pesar de su potencia tectónica, la presencia de los ocho pilares que soportan perimetralmente la gran cubierta de la Neue Nationalgalerie no comprometen, de ningún modo, la continuidad espacial entre el interior y el exterior.

Las estrategias empleadas en la planta semisótano para enfatizar la continuidad espacial entre interior y exterior se repiten también en esta planta. A pesar de la diferencia de acabados (pulido en el interior y basto en el exterior), de módulo (la losa exterior mide el doble que la interior) y de la pequeña diferencia de cota (más alta fuera que dentro), la prolongación del material del pavimento de granito participa de la continuidad espacial entre el interior y el exterior. Importante también es la contribución de la transparencia del cerramiento de vidrio que, desde el interior, permite percibir cómo el espacio se expande hacia afuera por los cuatro costados y, desde el exterior, hace posible la visión simultánea del espacio y su entorno urbano sin apenas oposición. Solamente los eventuales reflejos del vidrio y la negra presencia de la carpintería, coincidente con la modulación de la retícula estructural, señalan de nuevo la existencia de un cerramiento que querría no existir³².

A pesar de las similitudes en las estrategias proyectuales desarrolladas en la consecución de la continuidad espacial entre el interior y el exterior, existe una diferencia fundamental entre la galería inferior y la superior: mientras que en el nivel inferior el plano del techo coincide con el cerramiento, en el nivel superior la cubierta se prolonga más allá. El cerramiento queda retrasado 7,20 metros con respecto a la



F.22. Detalle de la entrega del pavimento interior y exterior en la carpintería de vidrio. SCHULZE, Franz (ed); DANFORTH, George E.: *The Mies van der Rohe Archive: an illustrated catalogue of the Mies van der Rohe drawings in the Museum of Modern Art. Part II; volume XIX*. New York and London: Garland, 1992, p. 195

33. "No es hasta la crisis moderna que se produce un paso más en la evolución de este proceso, cuando la estructura y el cerramiento se separan irreconciliablemente. El muro moderno, liberado de las condiciones de carga y resistencia, sólo debe concentrarse en separar interior y exterior. (...) Es posible expandir virtualmente cualquier distancia mediante techos y suelos planos e infinitos y encerrar el volumen con varias finas membranas". SORIANO, Federico: Sin Tesis. Barcelona: Gustavo Gili, 2004, pp. 76-77

34. La cubierta, un cuadrado de 64,80 metros de lado, cubre un área de unos 4.200 m². El cerramiento se constituye en un cuadrado concéntrico de 50,40 metros de lado, encerrando un área de unos 2.500 m². Entre ambos existe una zona perimetral de 7,20 metros de ancho que cubre un área total de unos 1.700 m².

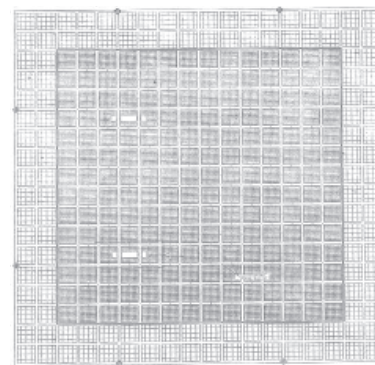
35. "La trascendencia vertical de los muros como invariante de un edificio se ha visto radicalmente sustituida por la continuidad horizontal de las losas de techo, subrayando la horizontalidad de la composición". PARICIO Ansuategui, Ignacio: La Construcción de la arquitectura. Los elementos (3a ed). Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, 1996, p. 79



F.23. El porche como proyección del plano de cubierta más allá del cerramiento. www.markushattwig.de

línea del canto del forjado donde se encuentran los pilares, lo que da cuenta de su independencia con respecto a la estructura vertical aun respetando su trazado perpendicular y su modulación. Aunque existe aquí también una cierta distinción entre lo que queda dentro del cerramiento y la que queda fuera (pues las rejillas que ocultan la iluminación situada en los cofres de la estructura sólo se disponen en la parte del techo que queda detrás del cerramiento), la proyección del techo más allá del cerramiento contribuye de manera definitiva a expandir el espacio interior hacia el exterior³³.

Como resultado de este desfase entre cubierta y fachada se obtiene un deambulatorio perimetral de superficie nada desdeñable³⁴. Este área se constituye en un umbral espacial, una zona intermedia entre el interior y el exterior que no pertenece propiamente a ninguno de los dos y que, sin embargo, participa de ambos al mismo tiempo. La separación entre el interior y el exterior deja de ser una simple línea para constituirse en un ámbito espacial que contribuye, de modo definitivo, a construir una transición continua entre el interior y el exterior. El límite, históricamente muy bien definido por el muro, queda ahora difuminado por la combinación de un cerramiento transparente y una cubierta en voladizo³⁵. La presencia del cerramiento de vidrio no es una cuestión menor. Se ha defendido en reiteradas ocasiones que este cerramiento de vidrio podría no existir, pues su función delimitadora responde más a una necesidad de control climático que a una voluntad de orden espacial³⁶. En efecto, si por motivos funcionales se pudiera prescindir de la presencia de este cerramiento transparente, la continuidad del espacio sería mayor, pero esto no es posible ya que el uso expositivo de este vestíbulo requiere de algún tipo de protección contra los agentes externos. El necesario cerramiento adquiere entonces una presencia obligada que no puede pasar inadvertida, tanto por los múltiples reflejos que se producen en la superficie del vidrio -y que Mies obvia siempre en sus perspectivas-, como por la existencia de la carpintería que lo soporta. A pesar de su transparencia real y fenomenal, por utilizar los términos en que Colin Rowe describe el fenómeno de la transparencia³⁷, el cerramiento transparente se convierte también aquí en un límite espacial³⁸.



F.24. Vista interior en planta del techo del vestíbulo de la Neue Nationalgalerie de Mies. Obsérvese la diferencia existente entre los dos módulos perimetrales, situados fuera de la carpintería, y la zona central interior, en la que se ubican las mallas que ocultan la iluminación. SCHULZE, Franz (ed); DANFORTH, George E.: *The Mies van der Rohe Archive: an illustrated catalogue of the Mies van der Rohe drawings in the Museum of Modern Art. Part II; volume XIX: New National Gallery, Martin Luther King Jr. Memorial Library, and other buildings and projects*. New York and London: Garland, 1992, p. 187.

36. "En la Neue Nationalgalerie (Berlín, 1962-1968) el vidrio podría incluso ni existir, pues no se constituye como un elemento que defina el límite espacial. (...) Mies emplea elementos horizontales para construir límites verticales, es decir, define los límites de sus edificios con planos horizontales. Tanto el plano de la gran cubierta, como el plano que conforma el podio construyen el límite vertical en la Neue Nationalgalerie en Berlín. Se está empleando un elemento horizontal para limitar el espacio. Donde se acaba la cubierta se acaba el espacio, podríamos decir. El espacio definido físicamente por los vidrios se escapa hasta el límite definido por la cubierta, y se expande hasta el límite que marca el podio. En este caso, el cerramiento de vidrio no se constituye como límite del espacio. Es una pura necesidad técnica: hay que acondicionar un recinto y se necesita cerrarlo de algún modo". DEL VALLE, Raúl: BUSCANDO EL HORIZONTE. Opacidad, transparencia y translucidez en los límites de Mies, en CAMPO BAEZA, Alberto (ed): *Aprendiendo a pensar*. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 63

F.25. Espacio interior delimitado por la cubierta opaca y el recinto acristalado.
www.berlinandbetween.wordpress.com



F.26. Espacio intermedio entre el interior y el exterior, a cubierto pero fuera. Fotografía del autor.



F.27. Espacio exterior descubierto sobre el podio. Fotografía del autor.



Sobre el podio de la Neue Nationalgalerie se producen, pues, tres situaciones espaciales distintas: 1) a pesar de su apertura hacia el exterior, cuando el observador se encuentra dentro del recinto de vidrio tiene la sensación de encontrarse en un interior; 2) cuando se sitúa en el deambulatorio, fuera del recinto de vidrio pero aún a cubierto, está ya realmente fuera pero mantiene aún una cierta sensación de interioridad; 3) por último, cuando se desplaza al podio ya a cielo abierto, la sensación de exterioridad es total. Esta disolución del límite en forma de transición espacial, consecuencia directa de la voluntad de relacionar abiertamente el interior con el exterior, deviene sin duda en uno de los rasgos espaciales que mejor definen a la arquitectura moderna³⁹: se trata de cerrar sin confinar, de delimitar sin limitar⁴⁰.

La continuidad espacial de la arquitectura moderna se fundamenta, pues, en la conjunción de tres elementos: el vidrio plano como cerramiento vertical transparente, el techo plano como cerramiento horizontal opaco, y el soporte puntual como el elemento mínimo de apoyo que relaciona los dos anteriores haciendo posible su pleno desarrollo espacial. La importancia estructural de la transparencia vítrea⁴¹, heredada de la arquitectura decimonónica, se pone al servicio de la espacialidad desarrollada por la estructura reticular en esqueleto, permitiendo minimizar la presencia de la misma allí donde se quiere abrir el espacio sin necesidad de exponerlo a las inclemencias de la intemperie.

El techo y su soporte, ambos de naturaleza ineludiblemente estructural, se constituyen en los elementos mínimos necesarios en la caracterización del espacio moderno. Tanto es así, que hay quienes han llegado a afirmar que la estructura de bandejas como caso particular de la estructura reticular, se constituye en el catalizador de la nueva espacialidad arquitectónica de la modernidad. No obstante, también es cierto que existen autores que ponen en entredicho la capacidad de esta estructura de definir el espacio, arguyendo a favor de esta idea la autonomía que presenta este sistema estructural entre los elementos que resuelven la función mecánica y el orden espacial del cerramiento o la compartimentación.

Pero la autonomía entre la función estructural y la delimitación espacial no debe confundirse con el autismo o la indiferencia⁴², así como

37. "En el ensayo "Transparencia: literal y fenomenal" que Colin Rowe escribió en 1955-1956 [Escrito en colaboración con Robert Slutzky y publicado por primera vez en *Perspecta* en 1963. Edición utilizada: Colin Rowe: "Transparencia: literal y fenomenal", en *Manierismo y arquitectura moderna y otros escritos*, Barcelona: Gustavo Gili, 1978], desarrolla por primera vez la idea de transparencia entendida no sólo como una cualidad inherente a la sustancia sino como una cualidad inherente a la organización; así lo sugerían Kepes y Moholy. Rowe distingue entre transparencia "literal" o real y transparencia "fenomenal" o aparente. Con la primera se refiere a la acepción habitual de materia transparente, "como ocurre en una tela metálica o en una pared de vidrio". Para explicar la segunda, establece una serie de comparaciones primero pictóricas y más tarde arquitectónicas a partir del desarrollo de la definición que Gyorgy Kepes establece para el concepto de transparencia que dice: "(...) la transparencia implica algo más que una mera característica óptica, implica un orden espacial mucho más amplio. La transparencia significa la percepción simultánea de distintas localizaciones espaciales. El espacio no sólo se retira sino que fluctúa en una actividad continua. La posición de las figuras transparentes tiene un sentido equívoco puesto que tan pronto vemos las figuras distantes como próximas". *ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 149*

38. "Esta membrana transparente no debería ser leída como la mera envolvente de un espacio previamente dado que existiría igualmente en caso de que el muro de cristal no existiera: éste crea el espacio, insinuado por una cubierta que no lo define enteramente". *Wolf Tegethoff, Mies van der Rohe: Die Villen und Landhausprojekte, Essen, 1981, p. 109. Citado en WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin. Berlin: Vice Versa, 1995, p. 21*

39. "Eliminando los elementos de limitación (los muros, etc...), hemos elevado la dualidad entre el interior y el exterior". *Sexto punto del Manifiesto V De Stijl* " - [] + = R 4n (1923). Citado en GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 118

"La planta: la nueva arquitectura ha horadado la pared suprimiendo así la dualidad exterior-interior. Las paredes se han convertido en simples puntos de apoyo, de ello resulta una planta nueva, una planta abierta totalmente diferente a la planta clásica, pues los espacios exteriores e interiores se interpenetran". *Octavo punto del artículo de Theo Van Doesburg "Tot een beeldende Architectuur" De Stijl, VI, nº6/7, Agosto 1924, pp. 78-83.* Citado en GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 123

"La gran cubierta ha unido el exterior con el interior, el pavimento reticular externo continúa hacia el interior, aunque los materiales cambian completamente: las baldosas son ahora de granito pulido. En lugar de perder la conexión con el mundo exterior uno percibe los muros de cristal como una membrana transparente que hace de intermediaria entre la vida interior y la exterior. (...) Es un "interior que aparenta estar fuera", tal y como Fritz Neumeyer señaló acertadamente". JÄGER, Joachim: Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe. *Ostfildern: Hatje Cantz, 2011. p. 17*

40. *Afirma Fritz Neumeyer que, para Mies, "la arquitectura debía garantizar a los hombres el "cerramiento necesario sin renunciar a la libertad de las formas espaciales abiertas" y proporcionarles una "definición volumétrica del espacio", pero no un "confinamiento espacial", que concordara con la propia época y su manera de vivir". NEUMEYER, Fritz: Mies van der Rohe: la palabra sin artificio: reflexiones sobre la arquitectura 1922-1968. Madrid: El Croquis Editorial, 1995, p. 17*

41. "La misión de las paredes queda tan sólo limitada a actuar de mamparas, extendidas entre las columnas que sostiene la estructura del edificio, a fin de protegerlo de la lluvia, del frío y del ruido". Es "el resultado directo del creciente predominio de los elementos huecos sobre los macizos" que lleva a que "el cristal vaya cada vez adquiriendo una mayor importancia estructural". GROPIUS, Walter: *The New Architecture and the Bauhaus. Londres: 1937, pp. 22-23.* Citado en GIEDION, Sigfried: *Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición* (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, p. 506

tampoco debe identificarse la minimización del soporte en favor de la continuidad horizontal con la incapacidad de la estructura de definir el espacio. Asimismo, es erróneo también pensar que la satisfacción de la continuidad espacial conduce, necesariamente, a la desaparición de la presencia del soporte estructural en planta⁴³. Este tipo de conclusiones se asientan sobre una base analítica errónea que juzga la capacidad de definición espacial de la estructura moderna en base a los parámetros que rigen las propiedades del espacio interior propio de la segunda concepción y no en relación al espacio continuo. Y es que no se le puede reprochar a la estructura en esqueleto que no delimite verticalmente el espacio cuando, precisamente, esta tipología estructural nace de la voluntad de dar continuidad al espacio sin delimitarlo. La estructura en esqueleto ni delimita ni confina el espacio en planta simplemente porque no ha sido concebida para ello.

Si bien es cierto que gracias a la flexibilidad espacial de la estructura reticular en esqueleto la arquitectura moderna ha podido satisfacer con éxito todos los requerimientos espaciales que le han exigido los nuevos programas funcionales del siglo XX⁴⁴, también lo es que, en demasiadas ocasiones, esta flexibilidad ha derivado en una banalización de su carácter espacial⁴⁵. Las ventajas constructivas que comporta esta tipología estructural la han convertido en un elemento imprescindible en la arquitectura edilicia del último siglo, incluso cuando, contraviniendo su naturaleza espacial, se la ha utilizado para construir espacios cerrados.

La confusión teórica o la banalización constructiva de su verdadera naturaleza espacial no debe hacer dudar al arquitecto moderno de la importancia de la estructura en esqueleto en la configuración del espacio continuo. Contagiados de las inquietudes intelectuales de las vanguardias europeas, arquitectos como Walter Gropius, Le Corbusier o Mies van der Rohe convierten la estructura reticular concebida en Chicago como un producto de la industria de la construcción, en el soporte físico e intelectual necesario para el desarrollo de una nueva manera de entender el espacio. Como ha venido siendo a lo largo de toda la historia de la arquitectura, también durante la modernidad la estructura deviene en aquel vínculo común a la forma y la materia que, haciendo interactuar a la gravedad con la luz, hace posible la construcción del espacio arquitectónico.

III.5.3. LA LEVEDAD COMO ABSTRACCIÓN DE LA GRAVEDAD

“Así la casa moderna dará la impresión de estar planeando, de estar suspendida en el aire, de oponerse a la gravitación universal”⁴⁶

Theo Van Doesburg

La arquitectura moderna se fundamenta en la idea de que el hecho arquitectónico es de naturaleza eminentemente espacial. El hecho de que hoy en día esto parezca una obviedad no debe hacernos olvidar que esto no siempre fue así. Aunque con toda seguridad la construcción del espacio fue siempre la finalidad última de los mayores tratadistas y arquitectos de todos los tiempos, es prácticamente imposible encontrar en los textos anteriores al siglo XIX referencia alguna a la idea de espacio como elemento característico de una arquitectura⁴⁷ que se presentó siempre como una cuestión de naturaleza eminentemente másica. Durante la mayor parte de la historia de la arquitectura, ésta se identifica con la ineludible necesidad de disponer adecuadamente las masas más o menos pesantes que la conforman, siendo el espacio consecuencia de tal operación material.

Si se acepta, tal como defiende el presente trabajo de investigación, que la representación científica de determinados fenómenos físicos -en este caso el gravitatorio- tiene una incidencia directa en el modo de concebir el hecho arquitectónico, es fácil entender que se a lo largo de la historia se haya otorgado siempre mayor importancia a la masa que al espacio. A pesar de sus enormes diferencias, desde Aristóteles hasta Newton la gravedad se interpretó como una ley física que regía la relación entre las masas, describiendo lógicamente su posición y movimiento a través de un espacio que no jugaba ningún papel en dicha interacción física. Pero, tal como se ha apuntado ya anteriormente, Einstein concibe la gravedad como el fenómeno que rige la relación de la masa de la materia con la estructura del espacio (o espacio-tiempo). Esta “espacialización” de la gravedad coincide, además, con la idea -también einsteiniana- de que la pesantez no es una propiedad de la materia de origen gravitatorio. Ambas cuestiones

42. “A fin de llegar a una ecuación de las exigencias de espacio y estructura, Le Corbusier y Mies van der Rohe se habían visto llevados a postular la independencia funcional, es decir, la independencia de los tabiques de las columnas, de modo que, (...) el Estilo Internacional puede ser interpretado como derivando del supuesto de una existencia independiente ambos, que seguirían leyes distintas. (...) En el Estilo Internacional una estructura autónoma perfora un espacio libremente abstraído, actuando no como su forma definitoria, sino como su puntuación. En el Estilo Internacional, por tanto, no hay fusión de espacio y estructura y, al final, cada uno continúa siendo un componente identificable, mientras la arquitectura no es concebida como confluencia de ambos sino más bien como su oposición dialéctica, como una especie de debate entre ellos”. ROWE, Colin: *Manierismo y arquitectura moderna y otros ensayos*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 101. La estructura de Chicago, 1956.

“Esta sustitución del muro por el pórtico es, sin lugar a dudas, la revolución más importante que ha sufrido la arquitectura en su historia. (...) La composición ha visto aparecer unos elementos en la organización de los espacios interiores, pilares y jácenas, que imponen un orden, el estructural, generalmente muy ajeno al espacial o funcional”. PARICIO Ansuategui, Ignacio: *La Construcción de la arquitectura. Los elementos* (3a ed). Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, 1996, p. 69

43. “Este esqueleto estructural libera la planta prácticamente de las exigencias del soporte. Sólo el punteado de los pilares recuerda la presencia de la estructura, pero su papel limitador y ordenador del espacio prácticamente ha desaparecido”. PARICIO Ansuategui, Ignacio: *La Construcción de la arquitectura. Los elementos* (3a ed). Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, 1996, p. 15

44. “El esqueleto de la estructura metálica o en hormigón armado es, casi con toda seguridad, el motivo más común de la arquitectura contemporánea, y pertenece, sin duda, a los elementos constituyentes -por utilizar la terminología que hubiera empleado Siegfried Giedion- más ubicuos. (...) La estructura ha sido el catalizador de una arquitectura; pero debe advertirse que la propia estructura también se ha convertido en arquitectura, que la arquitectura contemporánea es casi inconcebible sin ella”. ROWE, Colin: *Manierismo y arquitectura moderna y otros ensayos*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p.91. La estructura de Chicago, 1956.

adquieren una importancia capital en la conformación de una nueva concepción espacial arquitectónica, especialmente si se tiene en cuenta que, por primera vez en la historia, los avances de la física se aprehenden de un modo consciente como estímulos fundamentales desde el ámbito de la arquitectura.

No cabe duda alguna de que la necesidad de resolver las necesidades espaciales que plantean los nuevos programas funcionales del siglo XX, junto al enorme desarrollo que experimentan la tecnología y el cálculo estructural, devienen en factores determinantes en la conformación de una nueva concepción espacial. Pero igual que en épocas anteriores, éstas son cuestiones necesarias pero no suficientes. Resulta imprescindible, además, la construcción de una nueva manera de entender y representar los fenómenos físicos más elementales que rigen el universo, como es el caso de la gravedad.

45. "La desvinculación de la organización del espacio respecto al orden estructural puede haber sido una conquista de la técnica constructiva para los maestros del Movimiento Moderno, pero en la producción arquitectónica en general sólo ha implicado una banalización de la organización espacial". PARICIO Ansuategui, Ignacio: La Construcción de la arquitectura. Los elementos (3a ed). Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, 1996, p. 18

46. Theo Van Doesburg: "La revolución de la arquitectura moderna en Holanda", en Principios del nuevo arte plástico y otros escritos, p. 116. Citado en ÍÑIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p. 193

47. Sobre la conceptualización de la arquitectura como hecho espacial, ver la introducción del apartado III-5.1. La Neue Nationalgalerie de Berlín.

48. "The international consensus on the new architectural concept, or dynamics and function", conferencia de 1923 en Amsterdam editada en "Erich Mendelsohn, complete works of the architect" Princeton architectural press, 1992, pp. 22-35. Comparada con Mendelsohn, E. "The international consensus on the new architectural concept, or dynamics and function", conferencia en 1923 en Amsterdam. Parcialmente editada y traducida al español como "Dinámica y Función", en Fiz, M. "La arquitectura del S.XX. Textos." Documentación y Debate, pp. 122-125. Texto citado en GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 157

III.5.3.1. Abstracción y gravedad: entre la física y la arquitectura

*"Desde que la ciencia ha constatado que los dos conceptos materia y energía, mantenidos antes rígidamente apartados no son sino meros estados diferentes del mismo elemento primario; que en el orden del mundo nada tiene lugar sin la relatividad del cosmos, sin la relación con el conjunto, el ingeniero ha abandonado la teoría mecánica de la materia inerte y ha reafirmado su fidelidad a la naturaleza. (...) En apariencia nos hemos liberado de la ley de la gravedad."*⁴⁸

Erich Mendelsohn

La Ley de la Gravitación Universal de Newton no estuvo exenta de polémica ya desde sus inicios y, a pesar de las modificaciones que incorporó su autor en las ediciones posteriores de los *Principia*, nunca acabó de ser considerada una teoría totalmente sólida. Sin embargo, nadie fue capaz de plantear una formulación alternativa capaz de salvar las inconsistencias teóricas de la ley newtoniana. Ésto, junto a su indudable éxito práctico, acabó por afianzarla como una de las teorías físicas más importantes de la historia.

No obstante, a lo largo del siglo XIX se producen algunos descubrimientos que ponen en entredicho las bases de la física newtoniana y, con ella, su teoría sobre el fenómeno de la gravedad. En 1831 Faraday describe el fenómeno electromagnético sin necesidad de recurrir a ningún tipo de fuerza a distancia, hecho que evidencia la artificiosidad de un concepto que, aunque fundamental para la gravitación newtoniana, resulta innecesario para la explicación de otros conceptos físicos. Más adelante, en 1887, Michelson y Morley demuestran experimentalmente la inexistencia del éter, dando al traste con la explicación newtoniana de la causa eficiente de la gravedad. Finalmente, en 1906 Einstein niega la instantaneidad atribuida hasta entonces a las fuerzas newtonianas pues, según su teoría de la relatividad especial, ningún fenómeno físico podía superar la velocidad de la luz en el vacío. Todo ello contribuye de un modo definitivo a que la gravitación de Isaac Newton pierda su validez. A lo largo del siglo XIX las bases fundamentales de esta concepción gravitatoria se ven cuestionadas de raíz, sin que se vislumbre la posibilidad de plantear ninguna teoría alternativa.

Sin embargo, esta situación empieza a cambiar a principios del siglo XX. En 1907, Albert Einstein se da cuenta de que mientras caemos no sentimos nuestro propio peso. Esta observación le lleva a formular el *principio de equivalencia*, según el cual la atracción gravitatoria es experimentalmente indiscernible de un movimiento con aceleración continua y constante. Es entonces cuando advierte la necesidad de ampliar el ámbito de aplicación de la relatividad especial, restringida a los fenómenos físicos de velocidad constante, como por ejemplo la luz, a los fenómenos físicos sometidos a aceleración constante, como la gravedad. Durante casi una década se entrega a esta labor y en 1916 publica *Los fundamentos de la teoría de la relatividad general*. La comprobación observacional de esta teoría tres años más tarde pone fin a un siglo sin gravedad⁴⁹.

Aunque las diferencias prácticas de la teoría de la relatividad general de Einstein en relación a la ley de gravitación universal de Newton son escasas y únicamente observables en campos gravitatorios muy fuertes o cuando las masas se mueven con

49. Sobre la Relatividad General de Albert Einstein ver el apartado II-4.2. Albert Einstein: Gravedad, geometría y espacio.



F.28. Theo Van Doesburg: "Construction de l'espace-temps II", 1923. GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: *Después de Einstein: una arquitectura para una teoría*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 119

velocidades cercanas a las de la luz, conceptualmente la teoría einsteiniana no tiene nada que ver con su predecesora. Mientras que para Newton el Espacio y el Tiempo eran cuestiones absolutas e independientes totalmente ajenas a la fuerza de la gravedad que actúa a distancia e instantáneamente sobre las masas, Einstein concibe la gravedad como la ley fundamental que rigiere la interacción de la masa con el continuo espacio-temporal cuatridimensional. En este sentido la concepción einsteiniana de la gravedad puede resumirse en dos ideas fundamentales: la curvatura del espacio-tiempo, o cómo la masa controla al espacio-tiempo dictando cómo debe curvarse, y la flotación libre, o cómo el espacio-tiempo dicta cómo la masa debe moverse.

Si bien los filósofos de la Grecia clásica confundieron la gravedad misma con su manifestación más común -el peso-, Einstein desvincula en su teoría a la una de la otra. El peso, históricamente relacionado con la atracción gravitatoria terrestre, deviene en la relatividad general en consecuencia única de la física del estado sólido y de la elasticidad de la materia. Nuestra percepción cotidiana del peso abandona su origen gravitatorio y la flotación libre se constituye como un hecho esencial para el fenómeno de la gravedad. Contraviniendo la clásica idea que asocia a la flotación con la levedad o la ingravidez, la gravedad einsteiniana se fundamenta en la idea de que la materia, aún bajo la influencia de un campo gravitatorio, flota libremente.

La relatividad general de Albert Einstein es una teoría que no puede relacionarse fácilmente con la experiencia cotidiana del fenómeno gravitatorio tal y como fue entendido durante siglos, pues la pesantez se sustituye por la levedad y la caída por la flotación. Parece, en cierto modo, una gravedad abstraída de sí misma o, al menos, de su representación histórica. Este cambio radical no pasa por alto a los artistas europeos, que de un modo consciente incorporan estas ideas a sus planteamientos conceptuales. A través de la pintura y la instalación se ensayan composiciones espaciales centrípetas y flotantes, en las que el cubo, símbolo o metáfora de la unidad espacial cerrada, se explota en planos de color que, deslizándose en distintas direcciones, proyectan el espacio interior hacia el exterior. Estas

50. *Astático*, ca: Adj. Se dice del equilibrio en que se mantiene un cuerpo sólido cualquiera que sea la posición en que se coloque. *Diccionario de la Real Academia Española*.

composiciones artísticas representan abstractas construcciones ingravidas y astáticas⁵⁰ que, alineándose con los fundamentos de la gravedad relativista, sientan las bases conceptuales de la arquitectura posterior⁵¹.

Esta desnaturalización o abstracción gravitatoria puede observarse también en la estructura que hace posible el espacio moderno. Por medio de la abstracción del fenómeno gravitatorio sobre la materia con que se construye el espacio, se consigue una continuidad espacial que dota a la estructura reticular en esqueleto de una levedad visual que ya no necesita oponerse a la pesantez por medio de la ligereza. La forma estructural se despoja de cualquier signo o elemento que pueda recordar la presencia del peso en el hecho constructivo, deviniendo la abstracción en la herramienta conceptual que hace posible la levedad de la estructura y la continuidad del espacio. Así como la relatividad general no se formula como una teoría contraria a la gravitación newtoniana, sino que se presenta como un constructo intelectual que configura de un modo coherente sus propias leyes con independencia de sus antecesoras, la arquitectura moderna no intenta oponerse a los valores históricos de la tectónica formulando otros nuevos u opuestos, sino que se configura como una construcción esencialmente atectónica.

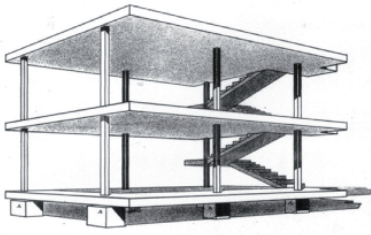
Igual que la física einsteiniana se plantea como una ruptura con la representación clásica de la gravedad, la arquitectura moderna se deshace de todos aquellos elementos arquitectónicos que, de un modo u otro, responden a una concepción historicista del fenómeno gravitatorio en la arquitectura. A esta desaparición de los “signos” gravitatorios de la arquitectura en general y de su estructura mecánica en particular la llamamos *abstracción*. La arquitectura moderna es, pues, una arquitectura que se abstrae de la gravedad, al menos en el sentido clásico del término. El peso deja de constituirse en el principal atributo físico de la forma construida pero, a diferencia del siglo XIX⁵², la ligereza no se presenta ya como una alternativa en tanto que admite, ni que sea por oposición, la pertenencia del elemento arquitectónico a la gravedad clásica. Es entonces cuando la flotación de la física relativista y la levedad de

51. La célebre Schröder House, proyectada en 1924 por Gerrit Rietveld en Utrecht, es un ejemplo paradigmático de la translación directa de estos presupuestos vanguardistas al ámbito de la arquitectura.

52. Ver apartado III-4.2.5. La ligereza de la línea estructural.

53. “Forzoso es reconocer que las estructuras reticulares, tanto metálicas como de hormigón, han predominado en la construcción edilicia en lo que va de siglo, pasando a ser la estructura por antonomasia, sin que apenas quepa alternativa”. MONEO VALLÉS, Rafael: La Llegada de una nueva técnica a la arquitectura: las estructuras reticulares de hormigón. *Barcelona: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona. Cátedra de Elementos de Composición*, 1976, p. 3

54. “La arquitectura será tanto más abstracta cuanto más desligada aparezca de todas las dimensiones contingentes que la rodean (tales como su utilidad práctica inmediata, los medios empleados para construirla o los significados sociales, políticos o religiosos que temporalmente se le atribuyen), las cuales si bien pueden ser indispensables para su constitución material terminan, sin embargo, siendo irrelevantes cuando de lo que se trata es de hacer un juicio de valor sobre las cualidades artísticas de la obra. (...) La obra abstracta se recorta, separándose de su implicación con el mundo, y se dota de sus propias reglas de juego. En ella los elementos pierden importancia en sí mismos, mientras que cobran protagonismo las relaciones. El sentido último de la obra reside, entonces, en la forma de esas relaciones, más allá del valor específico de los diversos elementos. Por eso sólo cabe hablar de abstracción con propiedad, a propósito de las obras que surgen de la cultura de la modernidad, la cual consagra el logro de esa plena cohesión interna de la forma como único criterio de legitimidad para la obra de arte”. MARTÍ ARÍS, Carlos: Abstracción en arquitectura: una definición, en AAWV. DPA 16. Abstracción. *Barcelona: Edicions UPC*, 2000, pp. 7-8



F.29. Le Corbusier, estructura Dom-Inó (1914-1915): en este dibujo Le Corbusier consiguió resumir y expresar los principales atributos espaciales y gravitatorios de la estructura moderna.

“El verdadero punto de partida de la carrera de Le Corbusier es un dibujo que data de 1915. En él se muestran solamente seis pilares de hormigón armado y tres planos horizontales enlazados únicamente mediante el simple acceso de una escalera. Le Corbusier logró, como nadie más lo había conseguido, transformar la estructura en “esqueleto”, que los ingenieros habían estado elaborando, en un instrumento de expresión arquitectónica. Supo poner en evidencia la secreta afinidad existente entre la construcción en hormigón armado y las necesidades y deseos humanos que se iban por aquel entonces manifestando. Para crear casas de una ligereza sin precedentes hasta aquel momento, y hacer progresar al propio tiempo la “planta abierta” que Frank Lloyd Wright había iniciado, Le Corbusier se sirvió de aquellas cualidades de la estructura en hormigón armado que aseguraba la libertad de disposición de los tabiques interiores. Esta nueva interpretación de la estructura en “esqueleto” de hormigón armado fue la aportación fundamental de la obra de Le Corbusier”.

GIEDION, Sigfried: *Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición* (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978, pp. 540-541

la vanguardia artística devienen en atributos esenciales de la forma moderna, una arquitectura que no quiere ya expresar el peso ni la ligereza pues, mientras que oponerse a la pesantez por medio de la ligereza supone aceptar la ley clásica de la gravedad, impugnar la pesantez por medio de la levedad es negar su existencia. La gravedad pesante se ve sustituida por una gravedad leve que no es sinónimo de ingravidez -en tanto que ausencia de gravedad-, sino que resulta de otro modo de entender el fenómeno gravitatorio en el que la flotación deviene en elemento fundamental. La abstracción, en tanto que negación del fenómeno gravitatorio en su acepción clásica, adquiere la mayor importancia cuando afecta a elementos íntimamente vinculados al fenómeno gravitatorio, como es el caso de la estructura.

Tal como demostró Le Corbusier con su estructura Dom-Inó, la estructura reticular no puede entenderse como una solución particular a un problema concreto. Así lo demuestra su innegable éxito en la construcción edilicia del siglo XX⁵³. La modernidad de la estructura reticular reside en su condición abstracta. La condición universal de la estructural reticular, lo que la convierte en la estructura por antonomasia, es la distancia o la indiferencia que muestra hacia las particularidades de lo contingente, aquello que aún siendo necesario, resulta irrelevante⁵⁴. Esta distancia conceptual con la realidad inmediata lleva necesariamente a un proceso de ensimismamiento en el que, ahondando en su propia esencia, la estructura deviene en un concepto casi filosófico y general que define sus propias leyes⁵⁵. A esto llamamos abstracción en arquitectura. Es por su inherente condición abstracta que la moderna estructura reticular se constituye en la estructura por antonomasia, en el ideal de la misma⁵⁶.

En la estructura moderna la levedad deviene en fin, la abstracción en instrumento y la atectónica en consecuencia. Conviene entonces analizar cómo a través de la forma del elemento de cubrición, de la condición del apoyo y de la expresión de la función mecánica de la estructura es posible subvertir o aliviar -en el sentido más amplio del término- la acción de la gravedad sobre la estructura.

III.5.3.2. La planeidad como abstracción de la forma de cubrición

*“Aludir a la ingravidez a través de la elevación es lo obvio y lo fácil. Lo difícil es conseguir la ingravidez sin tener que recurrir a la idea de ascenso”.*⁵⁷

Juan Carlos Arruncio

Tal como ya se ha expuesto anteriormente, desde la antigüedad clásica se intuyó algún tipo de vinculación entre lo que más tarde se identificó con el fenómeno de la gravedad y la forma esférica de los cuerpos celestes. Milenio y medio más tarde Galileo Galilei descubrió que la trayectoria de los proyectiles terrestres era parabólica y Kepler que la órbita de los planetas era elíptica. Newton fue capaz de aunar todas estas cuestiones en su célebre Ley de Gravitación Universal, mediante la cual describió la forma esférica y el movimiento terrestre y celeste de los cuerpos graves a través del espacio. La curvatura de la masa y su movimiento por el espacio se convirtió, junto a la pesantez, en seña de identidad del fenómeno gravitatorio.

Tres siglos después de Newton, Einstein formula su Teoría de la Relatividad General, en la que reconoce la importancia capital de la curvatura en el fenómeno gravitatorio, no sólo en la forma y el movimiento de la masa, sino en la propia geometría curva del espacio-tiempo bajo la acción de la propia masa⁵⁸. A pesar del interés que suscita la idea del espacio-tiempo curvo de Minkowski en 1907, consecuencia lógica de la relatividad especial y base fundamental de la general, la arquitectura moderna muestra casi al unísono su preferencia por las formas planas. La coincidencia en el tiempo de la Estructura Dom-Ínó de Le Corbusier en 1915 y la publicación de la Teoría de la Relatividad General de Einstein en 1916 pone en evidencia esta contradicción. Cabe preguntarse entonces por qué, precisamente en el momento en que se le da un mayor protagonismo a la curvatura en la descripción física del fenómeno gravitatorio, la forma estructural en general y la cubrición espacial en particular se desprenden de ella con tal claridad.

Para entender esta reacción es necesario atender a la historia de la

55. “El principio de un orden estructural se ha completado en todas las grandes épocas arquitectónicas. A un tiempo morfológico y orgánico, ese orden deviene una condición imprescindible donde la forma se convierte en una consecuencia de la estructura y no en la razón de la construcción. Mies van der Rohe consideraba que, en ese sentido, la estructura es un concepto filosófico, “un todo, de arriba abajo, hasta el último detalle, fundado en las mismas ideas”. La enorme diversidad de necesidades funcionales de nuestro tiempo contrasta de forma radical con las relativamente escasas exigencias de épocas pasadas, y la ausencia de un principio guía general en la arquitectura actual puede acabar dando lugar a un entorno anárquico. En el principio de ESTRUCTURA, Mies van der Rohe veía un concepto universal capaz de englobar los diversos requisitos funcionales de nuestra época. En cierta ocasión, señaló: “El físico Schrödinger sostenía, a propósito de los principios generales, que el vigor creativo de un principio general depende precisamente de su generalidad. A eso es a lo que me refiero cuando hablo de estructura en la arquitectura. No se trata de ninguna solución especial, sino de una idea general. Y aunque cada edificio es una solución única, esa no es su principal razón de ser””. CARTER, Peter: Mies van der Rohe trabajando. London: Phaidon 2006, pp. 9-10

“Lo que Mies entendía con ello, lo explicó más tarde de la siguiente manera: «El término ‘estructura’ tiene para nosotros un significado filosófico-intelectual. La estructura es el todo, de arriba a abajo, hasta llegar al último detalle, está inspirada por la misma idea. Eso es lo que llamamos ‘estructura’»”. ZIMMERMAN, Claire: Mies van der Rohe: 1886-1969: la estructura del espacio. Köln: Taschen, 2006, p. 11

56. "Los nuevos materiales tenderán, más que al logro de estructuras particulares, a la consecución de la Estructura por antonomasia, del Ideal de la misma. Y este Ideal lo encarna la estructura reticular. Una estructura estrictamente reducida a los elementos activos conductores de esfuerzos y autosuficiente por cuanto se puede basar en los mismos con exclusividad, sin ninguna otra colaboración para su construcción. Asimismo, hace coincidir la construcción real de la arquitectura con la del espacio, con toda la serie de consecuencias que esto tiene desde el punto de vista tipológico y formal. Ahora, cada arquitectura concreta participa de esa construcción ideal del espacio y en ella encuentra precisamente su razón de ser. Un espacio concebido como una malla tridimensional continua, homogénea e isotrópica, extensible en todas direcciones, y que ya únicamente se puede entender en estos términos. A causa de ello, la estructura reticular no es una particular, referida a una arquitectura concreta, sino la estructura en su sentido más general y universal, de la que pueden participar muchas arquitecturas, es decir, la que trasciende su estricto significado constructivo y adopta el más genérico de disposición de las partes de un todo, un sistema de relaciones, estructura como concepto más que como forma. Este surgir de la estructura al primer plano del interés no hubiese sido posible sin la intervención en su construcción de los nuevos materiales: el acero y el hormigón armado. Los nuevos materiales permiten el pleno y óptimo desarrollo del sistema estructural arquitrabado". *INIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p. 193*

57. *ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): La luz es el tema (entrevista); en DIAGONAL 30, diciembre 2011. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2011, p. 24*

58. Ver apartado II-4.2. Albert Einstein: gravedad, geometría y espacio.

59. Ver apartado III-3.4.2. La curvatura intrínseca de la gravedad.

60. Ver apartado III-3.4.1. Del dintel al arco: la gravedad como necesidad estructural.

arquitectura en su conjunto. De acuerdo con la comprensión física del fenómeno gravitatorio que imperó desde la época de la Roma imperial hasta el siglo XIX, la cubrición de grandes espacios sin apoyos intermedios fue posible únicamente gracias al uso de arcos, cúpulas y bóvedas, formas estructurales todas ellas de geometría curva en las que el peso era al mismo tiempo atributo arquitectónico y garantía de estabilidad estática⁵⁹. En efecto, estas formas portantes confían en su trazado curvo la transición gradual entre la horizontalidad de la cubrición y la verticalidad del soporte. El impedimento de la caída libre de la materia que la conforma obliga a la necesidad de resistir el peso de la construcción que, convenientemente dispuesto y ordenado, se convierte en la clave del correcto funcionamiento de la estructura⁶⁰. Se descubre entonces que, durante los dos milenios de supremacía de la segunda concepción espacial arquitectónica, la estructura revela en su forma curva la acción de la gravedad sobre la materia pesante que la constituye. El abovedamiento del techo se identifica así como una suerte de peaje formal a la necesidad de portar el peso de la materia estructural, desde el punto más alto hasta el apoyo.

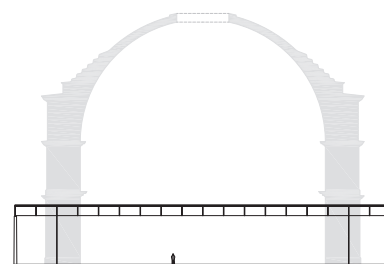
En base a este planteamiento, por otra parte hondamente impreso en el subconsciente colectivo, parece lógico pensar que la eliminación de la curvatura liberará al elemento estructural de la acción de la gravedad, al menos desde un punto de vista formal y visual. La ausencia de curvatura se relaciona entonces con la ausencia de gravedad, aludiendo la planeidad geométrica del techo a la levedad. Es así como, en un momento en el que la física afianza la curvatura inherente a la gravedad, la cubierta plana se *abstrae* -en el sentido más amplio del término⁶¹- de su ineludible condición gravitatoria: separando conceptualmente las leyes de la forma de los imperativos de la materia grave, enajenándose de la pesantez y la curvatura que durante la mayor parte de la historia se asociaron a la experiencia sensible del hecho arquitectónico en tanto que realidad construida. Se trata, en último término, de "prescindir" de la ley de la gravedad en el diseño de la forma arquitectónica.

Esta renuncia tan rotunda y frontal a la expresión formal de ineludible

la condición gravitatoria del hecho arquitectónico podría tener su origen, quizá, en el desengaño que supondría advertir que esa fuerza que desde el principio de los tiempos el ser humano identificó como la cualidad gravitatoria más elemental de la materia, el peso, no debe su origen al fenómeno de la gravitación sino, como señala Einstein, a la física del estado sólido y a la elasticidad de la materia ⁶². Aunque es evidente que la publicación de la Teoría de la Relatividad General de Albert Einstein no supuso ningún cambio en la manera de comprender e interactuar cotidianamente con el fenómeno gravitatorio, también lo es que, desde un punto de vista puramente científico, a partir de la abstracta y escasamente intuitiva física einsteiniana la gravedad dejó de ser aquello que durante tan largo tiempo se creyó que fue. Con conciencia plena de este cambio sustancial, las vanguardias artísticas europeas no pudieron más que modificar la forma de concebir y representar la gravedad en el arte del espacio por medio de la abstracción ⁶³, convirtiendo la planeidad en símbolo de la ruptura conceptual con la gravedad pre-einsteiniana.

La tecnología estructural moderna hace posible la recuperación de las formas de cubrición planas de la primera concepción espacial sin que la flexión debida al aumento de la luz libre entre soportes se constituya ya en un problema mecánico insalvable. La primera flexión de las estructuras trilíneas de la prehistoria y la antigüedad, a las que se hizo frente con dificultad por medio de arquivoltas y dinteles monolíticos, se supera en favor de la segunda flexión ⁶⁴. La utilización de métodos de cálculo cada vez más sofisticados permite analizar y predecir el comportamiento mecánico bidireccional de losas y entramados de acero u hormigón, espaciando considerablemente los soportes. Ello hace posible la cubrición de grandes espacios diáfanos con independencia del trazado de su planta, dando libertad a la posición de los pilares y permitiendo lanzar al vacío voladizos hasta entonces inconcebibles.

Dentro de esta abstracción formal debe encuadrarse, sin duda, la gran cubierta de la Neue Nationalgalerie. Desde un punto de vista constructivo se conforma como un entramado de 38 pletinas de acero de 1,8 metros de canto dispuestas en ángulo recto, 19 en cada



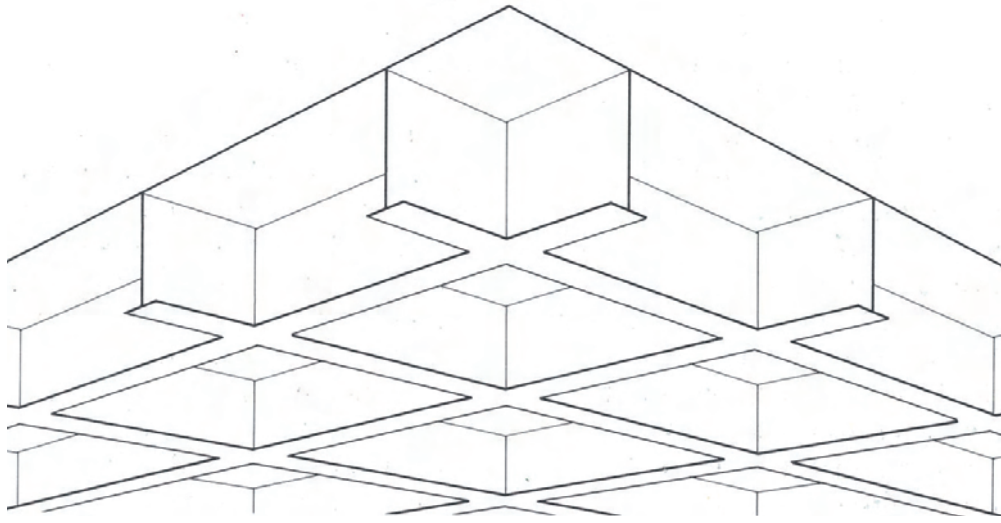
F.30. Esquema comparativo de las secciones de la Neue Nationalgalerie de Berlín, donde prima la horizontalidad de la cubierta plana, y el Pantheon de Roma, en el que el abovedamiento introduce una fuerte componente vertical al espacio. Dibujos del autor

61. Según el Diccionario de la Real Academia Española, *abstraer* significa: 1) tr. Separar por medio de una operación intelectual las cualidades de un objeto para considerarlas aisladamente o para considerar el mismo objeto en su pura esencia o noción. 2) intr. Prescindir, hacer caso omiso. 3) prnl. Enajenarse de los objetos sensibles, no atender a ellos por entregarse a la consideración de lo que se tiene en el pensamiento.

62. Según la teoría einsteiniana "la fuerza que actúa sobre nuestros pies no es de carácter gravitacional. Su origen está en la física del estado sólido y en la elasticidad de la materia. Simplemente tenemos que eliminar ese suelo, esa elasticidad, esa física del estado sólido para poder alcanzar la condición de flotación libre". WHEELER, John Archibald: *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. 15

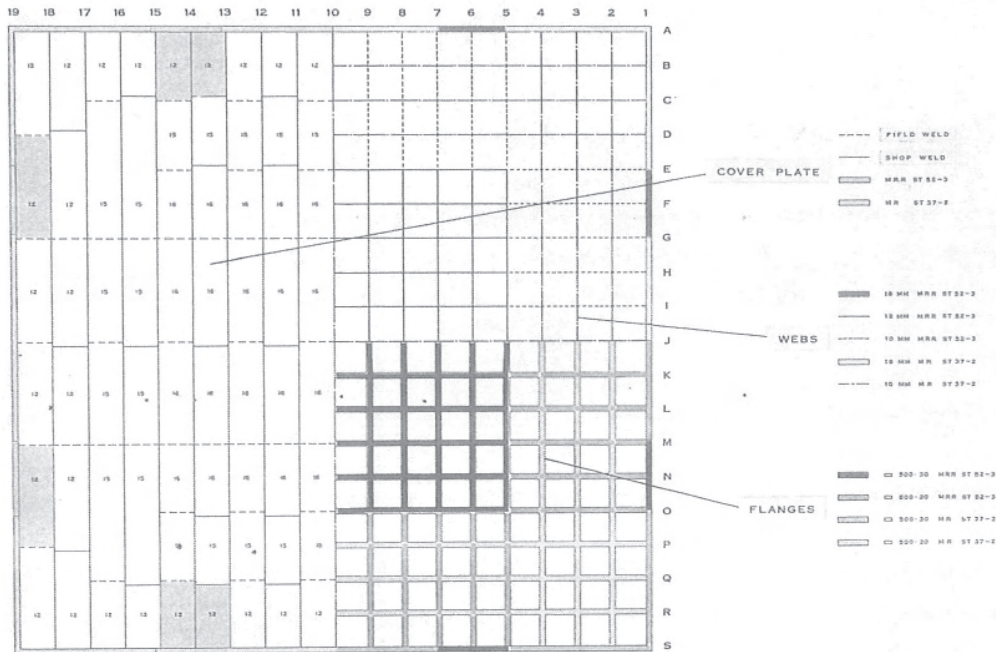
63. "La tendencia a la abstracción será, según esta tesis, propia de los pueblos que viven en una relación de incomprensión y desconfianza con la realidad. (...) La abstracción es, por tanto, fruto de una "incomodidad" frente al cosmos, obligando a un proceso de estilización formal". PIZZA, Antonio: *¿Abstracción o empatía? Wilhelm Worringer y la cultura expresionista*, en AAV. DPA 16. *Abstracción*. Barcelona: Edicions UPC, 2000, pp. 25-27

"Mediante la abstracción –señala Worringer– se intenta sustraer al objeto del mundo exterior, despojarlo de cualquier dependencia o arbitrariedad, convertirlo en necesario e inmutable, aproximarle a su valor absoluto. En consecuencia, las formas abstractas sujetas a ley son las únicas en que el hombre puede descansar ante el caos del universo". PIÑÓN, Helio: *Arte abstracto y arquitectura moderna*, en AAV. DPA 16. *Abstracción*. Barcelona: Edicions UPC, 2000, pp. 12-13



F.31. Perspectiva esquemática de la retícula principal de pletinas de acero de la cubierta.

WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): *Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin*. Berlin: Vice Versa, 1995, p. 61



F.32. Esquema de la distribución de los distintos espesores de las pletinas y composiciones del acero en la cubierta. SCHULZE, Franz (ed); DANFORTH, George E.: *The Mies van der Rohe Archive: an illustrated catalogue of the Mies van der Rohe drawings in the Museum of Modern Art. Part II; volume XIX: New National Gallery, Martin Luther King Jr. Memorial Library, and other buildings and projects*. New York and London: Garland, 1992, p. 188

dirección, formando una retícula estructural de 3,6 metros de módulo. Enrasado en la parte superior de esta retícula principal se dispone un segundo entramado bidireccional de pletinas de 150 mm. de canto y entre 20 y 30 mm de espesor cada 90 cm. En la parte inferior de las pletinas de la retícula principal se dispone, siguiendo su trazado, una pletina horizontal de medio metro de anchura que, además de aumentar la inercia del conjunto, establece virtualmente un plano visual en la parte inferior. Sobre una plancha metálica continua que cubre todo el entramado, la parte superior se remata con una capa de hormigón armado que, sin comprometer la planeidad de la cubierta, contribuye a aumentar la inercia de la estructura allí donde aparecen esfuerzos de compresión. Con sus 64,8 metros de lado y cerca de 4.000 metros cuadrados de superficie, la cubierta se presenta como un gran estructura reticular de hormigón y acero que, pese a sus 1.250 toneladas de peso, se nos muestra como una forma estructuralmente aligerada.

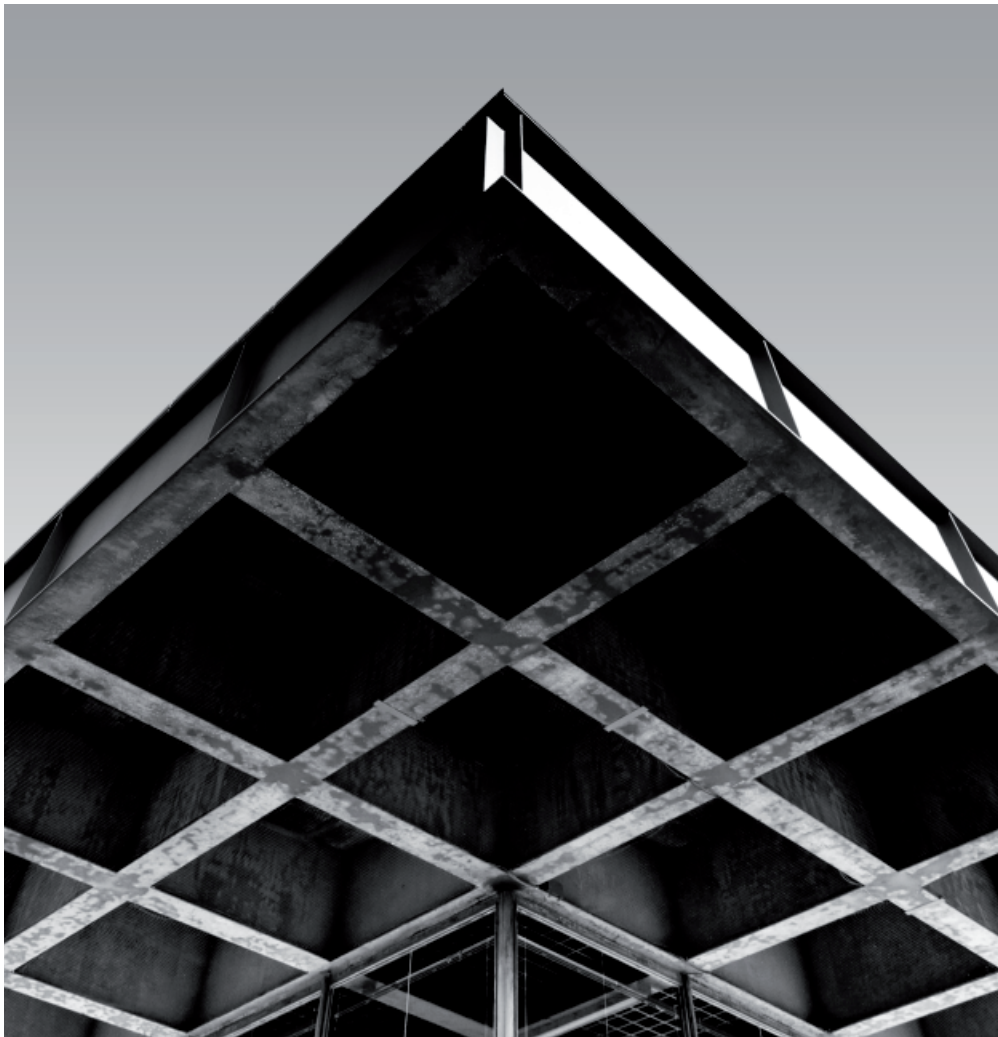
Para que esta enorme cubierta pudiera percibirse como un plano realmente horizontal, fue necesario diseñarla y construirla con una cierta curvatura. Al igual que en la Grecia clásica, las vigas de la cubierta presentan, en determinadas zonas, una pequeña curvatura hacia arriba destinada a contrarrestar tanto la curvatura óptica⁶⁵ como la deformación real del elemento estructural. Ésta última depende del momento flector, que aumenta con la carga y la distancia al punto de apoyo. Dado que los soportes son pocos y están situados en el perímetro, tanto los voladizos de las esquinas como la parte central presentaban en los primeros cálculos flechas excesivas. Para disminuir el valor de estas deformaciones es necesario minorar la carga en las zonas más alejadas de los apoyos, hecho que presentaba dificultades de diseño importantes en tanto que la estructura debe mostrarse como un entramado isótropo y homogéneo. Finalmente esta cuestión se resuelve introduciendo variaciones tanto en la composición del acero como en el espesor de las pletinas horizontales y verticales que conforman la retícula⁶⁶. Por medio de complejos cálculos matemáticos realizados con ayuda de un computador, una herramienta por aquel entonces costosa y compleja⁶⁷, se establece el valor de la contraflecha de las esquinas

64. "El muro que soporta un techo plano puede ser sustituido por un pórtico formado por dos pilares y una jácena. Las cargas pasan de las viguetas a la jácena y de ésta a los pilares. Este segundo recurso a la flexión presenta más dificultad; las tensiones son mayores y exigen piezas más robustas. La estabilidad del conjunto es difícil de solucionar y aparecen unos nudos muy complejos. Este esquema estructural (...) no alcanza su perfecta expresión y máxima difusión hasta la aparición del acero y el hormigón como materiales estructurales, a finales del s. XX". *PARICIO Ansuategui, Ignacio: La Construcción de la arquitectura. Los elementos (3ª ed). Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, 1996, p. 15*

65. "Otra característica que retrotrae a los modelos clásicos es la curva dada a las líneas horizontales para contrarrestar la curvatura óptica. El arquitecto investigó este fenómeno con la ayuda de grandes dibujos (...). La curvatura requerida para la Neue Nationalgalerie, determinada a tal efecto, también contribuyó a que los cálculos y la construcción se convirtieran en un gran desafío". *WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad); Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin. Berlin: Vice Versa, 1995, pp. 62-63*

66. *Información extraída de VANDENBERG, Maritz: New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe. London: Phaidon, 1998, p. 14*

67. "Parece claro que el canto de la cubierta no se estableció en 1,80 m hasta que Mies hubo comentado el tema con su ingeniero de Chicago. No fueron necesarias modificaciones que hicieran variar los cálculos estáticos, pero sí hubo variaciones en el grosor de las pletinas y la calidad del acero. (...) La suma de las fuerzas entre las vigas y los denominados pares de fuerzas, determina el grado de complejidad del cálculo estático de la construcción. Para la cubierta doblemente simétrica de la Neue Nationalgalerie hubieran sido necesario un sistema de 36 ecuaciones y el mismo número de incógnitas. Utilizando métodos de cálculo convencionales, el cálculo hubiera sido muy complejo y por ello se decidió realizar los cálculos electrónicamente. A principios de los sesenta los ordenadores sólo existían en forma de grandes sistemas, en los que la introducción y evaluación de los datos era arduo y económicamente costoso". *WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad); Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin. Berlin: Vice Versa, 1995, pp. 66-67*

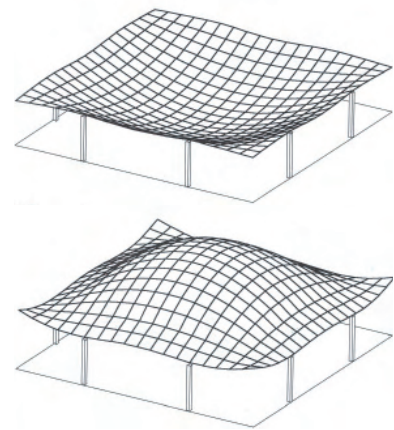


F.33. Vista de la parte inferior de la cubierta de acero. Fotografía de Christian Rudat, www.deviantart.com

y la parte central; ésta debe ser mayor al de la flecha estimada por la entrada en carga de la estructura a fin de asegurar el abombamiento que debe contrarrestar la ineludible distorsión óptica ⁶⁸.

Así pues, la voluntad conceptual y visual de conformar una estructura absolutamente horizontal obliga a diseñarla y construirla como un elemento arqueado, curvando las áreas intersticiales entre las zonas de mayor curvatura -esquinas y centro- mediante una directriz parabólica. Si bien es cierto que con ello se asume la inherente curvatura del espacio y la materia por acción de la gravedad descrita por Einstein, también lo es que este conocimiento se emplea para construir elementos estructurales que, a pesar de estar sometidos a enormes esfuerzos de flexión, se perciben como elementos totalmente planos. Se trata, en último término, de un truco arquitectónico sutil y complejo destinado a aliviar a la estructura del peso de la gravedad. El motivo por el cual la arquitectura prefiere las formas planas en un momento en el que la física concibe el cosmos como una realidad curva, parece residir en que sólo liberándose en apariencia de la curvatura de la gravedad, la forma conquista la levedad.

Esta inherente planeidad estructural dota al espacio de una unívoca condición horizontal en la que la componente vertical, tan íntimamente relacionada con los fenómenos gravitatorios de peso y la caída, parece perder el protagonismo que tuvo antaño. Mientras que el reconocimiento de la vertical gravitatoria en la translación horizontal de las cargas en las estructuras arqueadas determina la altura final del espacio ⁶⁹, el buen comportamiento a flexión de las estructuras planas modernas, incluso cuando la distancia entre soportes es grande, permite que el espacio libre entre el plano del suelo y el del techo no se vea condicionado por ningún requerimiento de tipo mecánico. Por medio de distintas estrategias -como el aumento del canto, el aligeramiento interior o la reorganización interna de las armaduras de acero-, el elemento de cubrición es capaz de resolver, por sí sólo y sin abandonar la exigida planeidad horizontal, las exigencias que impone la translación horizontal del peso.



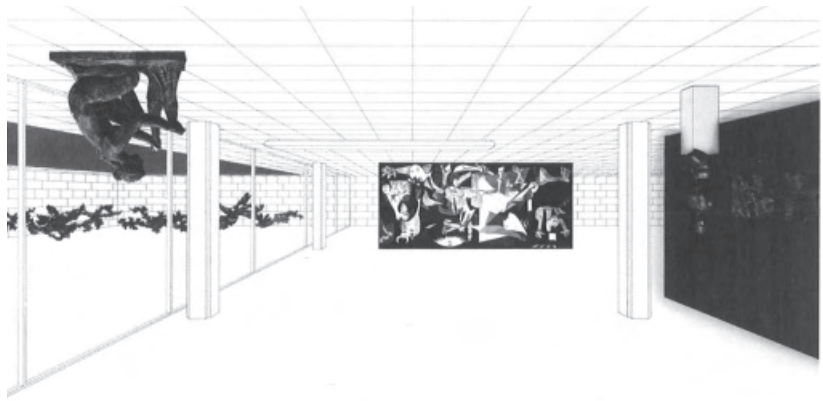
F.34. Esquema de la deformación provocada por el peso y la contraflecha diseñada para contrarrestar su efecto y conseguir una apariencia plana. WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): *Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin*. Berlin: Vice Versa, 1995, p. 71

68. "Sin el uso del hoy obligado ordenador, hubiera sido muy difícil estimar la flecha causada por el peso de la cubierta; sin embargo, poco se sabía sobre el acortamiento de las pletinas de acero durante la soldadura y sus deformaciones [Nota original: en el punto medio de la cubierta la desviación debida a la deformación causada por la soldadura mide 10 cm y la flecha causada por el peso propio de la cubierta 26,7 cm. Una dificultad añadida fue que prácticamente no había datos previos relativos a edificios de este tipo]. Debido a las incertidumbres derivadas de estos cálculos, se dio permiso para examinar la cubierta cuando estaba parcialmente completada a fin de medir las deformaciones y se realizaron los ajustes necesarios a fin de corregir posibles inexactitudes derivadas del proceso de construcción. Una vez estuvo en su lugar correcto, la cubierta fue medida con exactitud, revelando desviaciones con respecto a los cálculos de justo 2 cm. Sin embargo, debido a la falsa asunción relativa al peso de la cubierta, la carga había sido sobreestimada en unos 100 kg/m², lo que explica por qué la cubierta tiene hoy una contraflecha de 17 cm, cerca del doble de lo planeado!". WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): Mies van der Rohe: *Neue Nationalgalerie in Berlin*. Berlin: Vice Versa, 1995, pp. 64-65

69. Sobre la importancia de la naturaleza vertical de la gravedad en la arquitectura ver el apartado III-2.2. La verticalidad del peso y la caída. Sobre la componente vertical de las estructuras abovedadas ver apartado III-3.4.1. Del dintel al arco: la gravedad como necesidad estructural.



a)



b)



c)



F.35. Imágenes de la planta semisótano de la Neue Nationalgalerie: a la izquierda la imagen original, a la derecha la misma imagen rotada 180°.

a) JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe*. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 53

b) VANDENBERG, Maritz: *New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe*. London: Phaidon, 1998, pp. 40-41

c) www.minube.com

Así ocurre en los dos niveles de la Neue Nationalgalerie, aunque de un modo mucho más espectacular en la planta superior, donde la estructura alcanza una luz estructural de casi 65 metros. La altura libre y constante del vestíbulo se establece en 8,40 metros con independencia de las necesidades estáticas de una cubierta que hace frente a la flexión mediante una inteligente distribución de la materia estructural que permite optimizar una máxima eficacia mecánica con un mínimo peso propio.

Esta primacía de la horizontal sobre el eje vertical tiene repercusiones importantes en la percepción arquitectónica del fenómeno gravitatorio. En los espacios cubiertos por bóvedas o cúpulas, el suelo es plano y el techo es curvo, de tal modo que, por medio de la forma, se establece una clara diferencia entre los dos sentidos de la dirección vertical: el sentido descendente se asocia a la gravedad y la ascensión a la ingravidez. En cambio, el paralelismo que se produce en la arquitectura moderna entre un suelo y un techo idealmente planos y horizontales, permite eliminar en lo conceptual esta clásica diferenciación entre el arriba y el abajo. La simetría que se produce entre los dos planos hace que ambos adquieran un valor equivalente no sólo en lo geométrico sino también en lo gravitatorio⁷⁰, anulando con ello el sentido descendente de la vertical gravitatoria. Sólo la presencia de un cuerpo cuya constitución distinga entre el arriba y el abajo - como la figura humana, la obra de arte o la vegetación-, es capaz de delatar la equivalencia entre los dos planos que, idealmente, podrían llegar a permutarse sin que el espacio se viese alterado⁷¹.

De un modo u otro esta cuestión está siempre presente en la arquitectura de Mies. Tanto en las perspectivas de los proyectos como en la realidad finalmente construida, la equivalencia entre suelo y techo es manifiesta. Más allá de su pareja planeidad y horizontalidad, la dualidad queda asegurada por la presencia de determinados elementos que, en lo conceptual, podrían llegar incluso a permutarse⁷². Por ejemplo, en las perspectivas de la planta sótano de la Neue Nationalgalerie realizadas durante la fase de proyecto el plano del suelo se distingue del plano del techo por su despiece, una situación que en la realidad construida se invierte,

70. "La simetría crea la ilusión de una vibración en el espacio. Con lo cual reprime la figura: la supedita al encarnar su poder más abstracto. Los objetos pierden inercia, pierden peso y cuerpo, se ven arrastrados por las aplicaciones congruentes del espacio sobre el espacio. Los elementos físicos aparecen duplicados, reflejándose, multiplicándose en estados correlativos o translaciones, vaivenes, rotaciones, giros, hélices. La vista sigue esos movimientos, encontrándose y reencontrándose con lo que ya conoce y espera. Es el momento de la comprobación y de la conjetura, de la esperanza y de la satisfacción de la esperanza". NAVARRO BALDEWEG, Juan: *La habitación vacante. Girona: Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, 1999, p. 22*

71. *Esta idea se empleaba en el diseño de las formas de cubrición abovedadas propias de la segunda concepción espacial. Se utilizaban modelos con cadenas y pesos que, dispuestos en posición inversa, describían la directriz que debía seguir el elemento estructural a fin de ofrecer una óptima respuesta mecánica a la acción de la gravedad. Quizá el arquitecto más reconocido por emplear este método sea Antoni Gaudí.*

72. "Cuando dos elementos análogos se enfrentan –sucede siempre en las simetrías– nuestra vista suele fijar la atención en ambos. Vuelve de uno a otro; reiteradamente se genera la conciencia de equilibrio a través de esa dualidad. (...) Probablemente la primera vez que de un modo explícito se conforma un espacio en el que su horizontalidad se ve exaltada por la definición precisa de un eje de simetría horizontal y además a la altura de la vista, sea en el pabellón de Barcelona de Mies van der Rohe. (...) Sólo la presencia de la estatua de Kolbe -o nuestra presencia- reconoce la gravedad, la idea de peso. Hay como una relación casi energética entre lo de arriba y lo de abajo; como una inmanencia que parece conferir al aire contenido entre ambas superficies toda la intensidad del espacio. (...) El vestíbulo de la Galería Nacional de Berlín de Mies van der Rohe está conformado por el plano del suelo y por la cuadrícula de acero negro que conforma el techo. (...) Hay un equilibrio manifiesto entre todas las dimensiones (...). El suelo, aquí, coincide con el horizonte; con la tierra, en el sentido de G. Semper cuando se refiere a lo estereotómico. Y el techo es la idea de cobijo, esponjado aquí de cualquier atadura. En su acepción más abstracta. (...) Se establece una relación entre cada uno de los puntos que conforman el techo y el suelo subrayada por la presencia de los pilares, que, desde este punto de vista, actúan como conectores visuales de ambas superficies. Conectores a los que parece encomendárseles el cometido de garantizar que todo lo que sucede arriba, suceda igualmente abajo, y viceversa". *ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, pp. 93-94*

73. *Definición de masa por la Real Academia Española:* Magnitud física que expresa la cantidad de materia que contiene un cuerpo. Su unidad en el Sistema Internacional es el kilogramo (kg).

74. *Definición de volumen por la Real Academia Española:* Magnitud física que expresa la extensión de un cuerpo en tres dimensiones: largo, ancho y alto. Su unidad en el Sistema Internacional es el metro cúbico (m³).

pues el despiece del falso techo es mucho más evidente que el del suelo -que en gran parte se ha cubierto posteriormente por una moqueta continua sin juntas-. Incluso simetrizando imágenes que representan este espacio, ya sean perspectivas o fotografías, puede observarse que, a pesar de cambiar la altura aparente del espacio -por no situarse el punto de vista a una distancia media entre suelo y techo-, éste mantiene en lo esencial su configuración. Sólo la presencia de determinados elementos, ajenos a la configuración del espacio, delata la inversión de la imagen: la presencia en el suelo de las luminarias puntuales del techo, las obras de arte expuestas -especialmente las que representan figuras humanas-, la presencia en el techo de la luz solar que de manera natural baña el suelo, etc.

Esta abstracta cubrición estructural plana, que tanto podría ser suelo como techo, no sólo no se esfuerza por expresar su verdadera condición material, sino que más bien intenta ocultarla. A partir de las vanguardias artísticas de principios de siglo la noción de "masa", que de manera unívoca caracterizó a la arquitectura durante toda su historia, se sustituye por la noción de "volumen". En el ámbito de la física, la masa es una magnitud que expresa la cantidad de materia que contiene un cuerpo ⁷³, mientras que el volumen expresa su extensión ⁷⁴; la masa se relaciona con la noción de peso, mientras que el volumen tiene una acepción más espacial. Esta preferencia del volumen espacial sobre la masa pesante por parte de las vanguardias no debe sorprender si se tiene en cuenta su base conceptual einsteiniana, en la que la gravitación deja de interpretarse como una ley que rige la relación espacial entre las masas a través de la noción de fuerza -que en la tierra se identifica con el peso-, para convertirse en una ley que rige la relación entre las masas y el espacio sin necesidad de recurrir a la noción de fuerza -negando así la condición gravitatoria del peso-.

En el ámbito de las artes plásticas la masa revela su pesantez por medio de la expresión de su ineludible condición material y pesante. El peso se concibe como una cualidad sensible de la materia que, además de dejarse notar por medio de la fuerza con que se le debe oponer resistencia, puede percibirse también a través de la visión.

En cambio, el volumen es concebido como una entidad abstracta formada idealmente por una superficie envolvente que, únicamente, aspira a expresar su condición espacial. La condición bidimensional de la superficie se expresa en la pintura a través del color y, en tanto que *sensación* producida por la luz en el órgano visual ⁷⁵, no se le puede atribuir ninguna cualidad gravitatoria. El volumen se constituye, pues, en un cuerpo abstraído de su condición material y pesante ⁷⁶.

A lo largo del desarrollo del presente apartado se ha afirmado que la cubierta moderna se concibe idealmente como un “plano”, no sólo por su condición geométrica, sino también en su acepción más abstracta. Pero aunque esta sea la voluntad desde un punto de vista conceptual, la cubrición realmente termina por definirse como un paralelepípedo caracterizado por el predominio de la longitud y la anchura sobre el grosor. Tanto en su condición idealmente planar como realmente volumétrica, la cubierta moderna intenta abstraerse de la gravedad por medio de la ocultación de su verdadera constitución material a través del uso del revestimiento. Ello explica el uso tan extendido de pinturas y estucos blancos o de colores primarios durante la primera modernidad.

A pesar de abogar por la sinceridad constructiva, Mies rara vez muestra la materialidad de los elementos estructurales. Ya sean de hormigón armado o acero, acostumbra a pintarlos en blanco o negro. Tal es el caso de la cubierta de acero de la Neue Nationalgalerie, un plano grueso o un volumen laminar formado por una retícula ortogonal de pletinas planas pintadas uniformemente de negro. Al devenir en superficie pintada, se priva al acero de expresar las tensiones que en él se producen, dotando a la cubrición de la condición ingravida del color. Por su parte, la verdadera condición pétreo del forjado de hormigón armado del techo de la planta semisótano queda oculta en su cara inferior por la existencia del falso techo de yeso blanco.

A diferencia de épocas pasadas, la constitución material de la estructura deja de ser ya un dato determinante en su configuración formal. Mientras que, por ejemplo, las cubriciones abovedadas del pasado debían su forma al óptimo comportamiento a compresión de

75. Parece pertinente apuntar aquí la -quizá casual- cercanía lingüística entre la palabra volumen y el término latín lumen, que significa luz.

76. “Renunciamos a la escultura en cuanto masa entendida como elemento escultural. Todo ingeniero sabe que las fuerzas estáticas de un cuerpo sólido y su fuerza material no dependen de la cantidad de masa; por ejemplo: una vía de tren, una voluta en forma de T, etc. Pero vosotros, escultores de cada sombra y relieve, todavía os aferráis al viejo prejuicio según el cual no es posible liberar el volumen de la masa. Aquí, en esta exposición, tomamos cuatro planos y obtenemos el mismo volumen que si se tratase de cuatro toneladas de masa”. GABO, Naum; PEVSNER, Antoine: Manifiesto del realismo [1920], en CIRLOT, Lourdes (ed.): Primeras vanguardias artísticas. Barcelona: Labor, 1993. Citado en SORIANO, Federico: Sin Tesis. Barcelona: Gustavo Gili, 2004, p. 66

su materia pétreo, el uso de materiales mecánicamente tan eficaces como el acero o el hormigón armado relega la elección del material estructural a cuestiones contingentes muy alejadas de su función mecánica, como por ejemplo, el precio o la disponibilidad de uno u otro en un determinado entorno geográfico, la agresividad de los agentes atmosféricos, la pericia del constructor, etc.

En el proyecto para el edificio de oficinas de Bacardí en Santiago de Cuba que Mies desarrolla en 1957, precedente de la Neue Nationalgalerie, la estructura superior se plantea inicialmente en acero, pero la agresividad atmosférica y las dudas sobre la precisión de la construcción cubana aconsejan finalmente el uso del hormigón armado sin que por ello la estructura experimente ninguna modificación en su forma. Tres años más tarde se plantea también en hormigón armado una estructura análoga en la propuesta para el Museo Schäfer en Alemania, elección que difícilmente puede explicarse por la protección que el hormigón ofrece a las armaduras de acero al recubrirlas en un ambiente tan distinto como el europeo o por la duda que pudiera suscitar la cualificación de la mano de obra alemana. Finalmente, pese a las similitudes formales de la cubierta de la Neue Nationalgalerie en relación a sus predecesoras, Mies recupera su preferencia por el acero como material estructural, quizá por la elevada disponibilidad presupuestaria del proyecto y por la óptima relación entre la eficiencia mecánica y el peso propio que exige el notable aumento de la distancia libre entre soportes de la cubierta berlinesa con respecto a las versiones previas.

77. "Las nuevas estructuras van a posibilitar la realización de formas geométricas puras, básicamente tectónicas. Las dimensiones de pilares y vigas, las luces y los vuelos permitidos por las nuevas tecnologías del acero y del hormigón y las consiguientes posibilidades que ofrecen –grandes huecos, estratificación horizontal, desaparición de la estructura de la línea de fachada, etc.- aportarán a la arquitectura aquellas características que desde antiguo parecían estar vedadas, tales como la ingravidez, la inestabilidad, el dinamismo, etc.". *IÑIGUEZ, Manuel: La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001, p. 193*

La necesaria condición abstracta de la estructura moderna despoja a la flexión de sus históricos atributos tectónicos. Privada de todo elemento figurativo o tectónico, la cubierta se presenta como una forma paralelepédica sin vinculación alguna con la gravedad y, por tanto, sin función estructural aparente. Se descubre así en la arquitectura moderna una actitud análoga en la cuestión tectónica a la antes referida en relación al peso: del mismo modo que la pesantez no se combate con su opuesto -la ligereza- sino con su negación -la levedad-, la tectónica clásica no se sustituye por un nuevo sistema tectónico -como ocurrió en la arquitectura decimonónica-, sino que

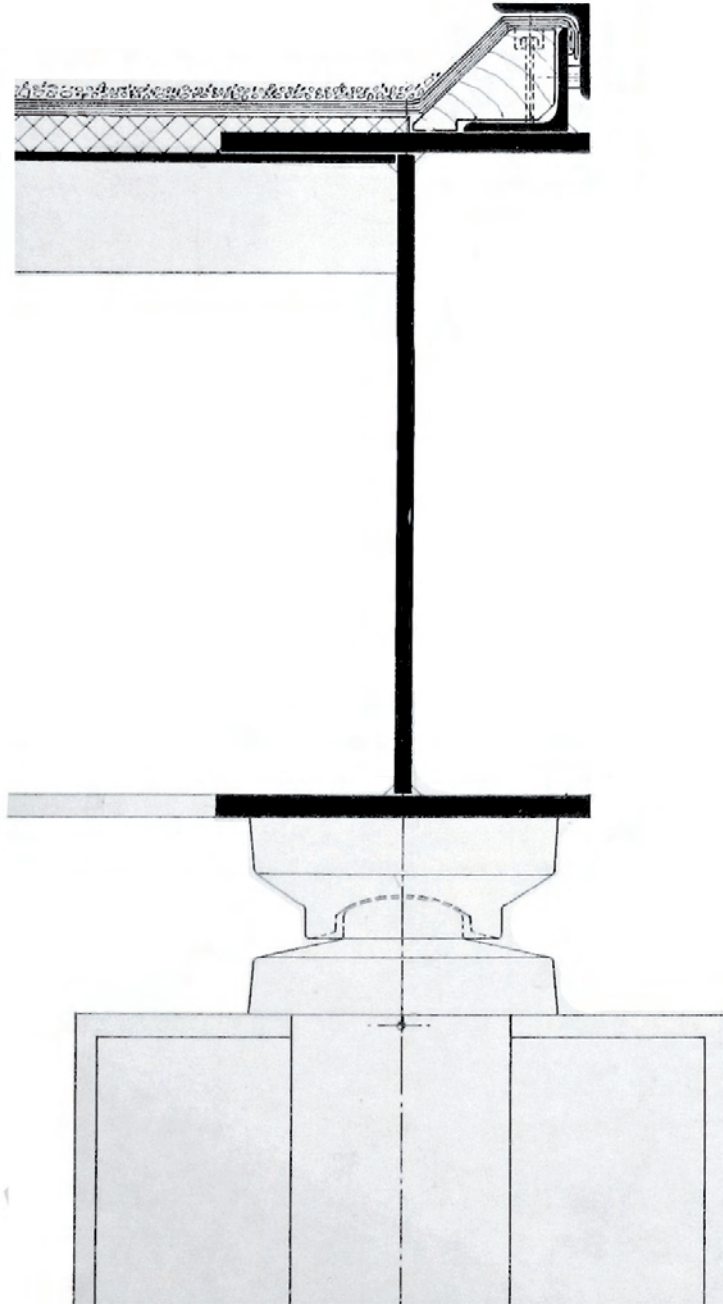
directamente se obvia en favor de una arquitectura esencialmente *atectónica* ⁷⁷. La arquitectura moderna recupera por medio de la abstracción formal, material y figurativa la atectonicidad característica de las estructuras más arcaicas. La cubierta consigue así esa deseada apariencia leve a cambio, eso sí, de renunciar explícitamente a la expresión de ese esfuerzo tan importante y a la vez característico del hecho arquitectónico que supone la cubrición del espacio.

Tal como se ha expuesto anteriormente, al techo moderno se le exige *planeidad* en el sentido geométrico y formal del término, pues en ella reside la condición libre y fluida del espacio y la dualidad, la posibilidad de la planta libre, y reciprocidad entre suelo y techo. Pero, desde un punto de vista tectónico, se le exige también *planeidad* superficial, pues su condición atectónica se define fundamentalmente por la neutra lisura de su cara inferior. En este sentido, cualquier elemento que sobresalga o descuelgue del techo a modo de viga o capitel debe ser eliminado, pues su presencia revelaría, en cierto modo, esa función estructural que se intenta ocultar ⁷⁸.

Cuando la propia tipología estructural no lo permite, como es el caso del techo de la planta inferior de la Neue Nationalgalerie, esta lisura atectónica queda garantizada por la superposición de un falso techo que es capaz de ocultar, de forma sencilla, todos aquellos aspectos que conviene esconder, como la naturaleza nervada del forjado reticular de hormigón o los desniveles provocados por la presencia de los capiteles de refuerzo a cortante sobre los pilares.

Caso distinto es el de la gran cubierta de acero que cubre el vestíbulo de acceso. Su planeidad geométrica en la cara inferior viene definida ya por la propia estructura: las notables diferencias en las solicitaciones mecánicas a que se ven sometidas las distintas zonas de la estructura no se resuelven aumentando el canto de las jácenas, sino que, como se ha señalado anteriormente, se absorben por medio de variaciones en la composición del acero y el grosor de las pletinas. Asegurada esta planeidad geométrica, la construcción del plano visual que debe definir la cara inferior de la cubierta se confía a la disposición reticular de las pletinas horizontales inferiores

78. "Debemos advertir que, en general, el espacio del Estilo Internacional era un sistema que tendía a prohibir que se viesen las vigas, y que lo más importante no era que el tejado fuese llano, sino que lo fuese el techo interior, y que techos y suelos presentasen planos ininterrumpidos. Esta restricción parece deducirse del concepto de libertad de la columna, ya que la columna libre difícilmente podía asumir una relación explícita con las vigas que pudiesen descansar en ella sin llevar a una compartimentación del espacio y, por lo tanto, a una cierta violación de la libertad del plano. De hecho la aparición de las vigas tenía que acabar prescribiendo posiciones fijas para las divisiones; y, dado que esas posiciones fijas deberían alinearse con las columnas, resultaba esencial que, si se quería afirmar con cierta elocuencia la independencia de columnas y divisiones, la parte interior del tejado, el techo, quedase expresado como una superficie horizontal ininterrumpida. Por tanto en los edificios de Mies y de Le Corbusier concebidos hacia el año 1929, la columna sirve, fundamentalmente, como puntuación de un espacio de extensión horizontal que, sobre todo en Mies, queda caracterizado por la igualdad neutral de la sección. En estos edificios la columna no promueve la expresión espacial del vano estructural, ni una serie de columnas sirven para definir células estructurales individuales. Más bien sucede todo lo contrario. La columna es una interpolación, una cesura en el espacio general, y la expresión espacial del vano estructural se halla estrictamente subordinada a una expresión espacial del techo plano que soportan las columnas". ROWE, Colin: Manierismo y arquitectura moderna y otros ensayos. Barcelona: Gustavo Gili, 1999, p. 140. Neo-"clasicismo" y arquitectura moderna II, escrito entre 1956-57, publicado en 1973



F.36. Detalle de la entrega entre la viga perimetral y el pilar (E 1/20).
VANDENBERG, Maritz: *New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe*.
London: Phaidon, 1998, p. 55. Original modificado por el autor.

que, más allá de optimizar mecánicamente el conjunto, configuran virtualmente una enorme superficie plana en la que la relación entre hueco y macizo pierde profundidad. El contraste entre la luz que ilumina la parte inferior de las alas de las vigas y la sombra en la que quedan sumidos los cofres contribuye a configurar un plano reticulado que oculta su verdadera profundidad.

La abstracción tectónica de la cubierta se evidencia también en la ineludible expresión de su canto. En un larguísimo proceso de refinamiento visual y técnico, el dintel monolítico prehistórico se descompuso en el entablamento clásico en varios elementos que, más allá de su verdadera función constructiva, encontraban sentido como expresión visual o representación del descenso de las cargas gravitatorias a través de los elementos portados y portantes. En cierto modo podría decirse que en la Neue Nationalgalerie se mantiene la constitución tripartita del entablamento clásico -formado tradicionalmente por una cornisa, un friso y un arquitrabe- pero convenientemente abstraída de su expresión tectónica. Los elementos clásicos quedan reducidos a su mínima expresión hasta el punto de ser presentados como parte de una abstracta malla geométrica. La cornisa de este templo moderno está formada por la pletina horizontal que remata superiormente el alma de la viga, y que se complementa con un doble perfil en "L" que permite absorber el grueso de la formación de las pendientes de evacuación de aguas pluviales de la cubierta. El friso se identifica aquí por la viga de borde de alma llena de 1,80 metros de canto que recorre todo el perímetro. Lógicamente la metopa como decoración figurativa desaparece. Por su parte, el triglifo se reduce a un pequeño perfil vertical que indica la posición de las vigas que se entregan perpendicularmente contra la parte interna del friso. Por último, el arquitrabe, antaño la parte más "estructural" del entablamento, queda únicamente expresado por los dos centímetros de canto visto de la pletina inferior.

Hasta aquí se han expuesto resumidamente los distintos mecanismos formales, materiales y figurativos utilizados por uno de los más importantes maestros modernos a fin de abstraer y aliviar conceptual y visualmente la estructura de cubrición espacial del fenómeno



F.37. Unidad estructural abstracta formada por un entablamento moderno y una columna sin basa ni capitel.
VANDENBERG, Maritz: *New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe*. London: Phaidon, 1998, p. 15

gravitatorio. La eliminación de la flecha provocada por la gravedad en los elementos sometidos a flexión y el desuso de su contrario, la forma estructural abovedada, dota a la cubierta estructural moderna de una planeidad horizontal que desplaza la histórica importancia de la vertical la dirección natural de la gravedad. Por medio del revestimiento continuo la estructura se libera de su condición material, perdiendo así en pesantez visual. En la claridad geométrica y la ausencia de las figuraciones tectónicas del pasado reside la ambigüedad de la función portante de la estructura. Aplicados a la cubierta, estos mecanismos contribuyen de manera decisiva a construir esa anhelada levedad, pero será en la reflexión sobre la condición del apoyo, en su ambigua negación, donde la arquitectura moderna podrá expresar esa levedad visual sin necesidad de tener que recurrir a la idea de ascensión.

III.5.3.3. La levedad como abstracción de la condición del apoyo

*“La transmisión de las fuerzas gravitatorias desde la suspendida losa de cubierta hacia el suelo a través de las columnas delicadamente articuladas es fácilmente legible por el espectador -un proceso excitante por las grandes luces y la eficiencia estructural de los elementos involucrados-”.*⁷⁹

Maritz Vandenberg

Por medio de su masiva y opaca pesantez, el muro de carga tradicional permite conjugar la función estructural como apoyo lineal y continuo, con la necesidad de delimitación espacial y protección lumínica. No obstante, la moderna posibilidad de concentrar enormes tensiones en secciones muy reducidas hace innecesaria la tipología mural. Abstraído así de su capacidad mecánica, el muro estructural deviene en un paramento de delimitación espacial desvinculado de sus cualidades gravitatorias, como son la pesantez, la masividad, la materialidad, el grosor y la opacidad⁸⁰. Ya sea cerramiento de fachada o partición interior, el paramento moderno se presenta como una superficie de mínimo grosor y variado comportamiento frente a la

79. VANDENBERG, Maritz: New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe. London: Phaidon, 1998, p. 23

80. “Los muros han perdido todo su grosor y gravedad”. ALMONACID CANSECO, Rodrigo: Mies van der Rohe: el espacio de la ausencia. Valladolid: Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial, 2006, p. 20

“Pero el muro moderno no sólo quiere optimizarse sino también reducirse, minimizarse hasta desaparecer si fuera posible. Sin grosor y sin masa. Transparente. El muro moderno se desmaterializa aunque conserva sus condiciones de aislamiento y seguridad”. SORIANO, Federico: Sin Tesis. Barcelona: Gustavo Gili, 2004, pp. 77-79

luz -transparencia, translucidez u opacidad- que, evitando cualquier expresión material que pueda vincularse con la pesantez o la función estructural, se dispone en planta con total libertad.

La libertad de composición y disposición de los paramentos de compartimentación y cerramiento se debe, sin duda, a la posibilidad de concentrar las cargas gravitatorias en elementos puntuales de soporte. En la independencia entre el cerramiento espacial y la estructura vertical, en combinación con la planeidad de la cara inferior del techo, reside el principio de libertad de la planta moderna. La relación topológica entre la abstracta delimitación espacial vertical y los elementos estructurales que soportan el peso deviene, entonces, una cuestión fundamental en la arquitectura moderna en general y en la obra de Mies en particular.

Las necesidades funcionales de compartimentación de la planta inferior de la Neue Nationalgalerie se resuelven por medio de tabiques -paramentos de compartimentación espacial sin función portante- dispuestos conforme a la retícula que modula todo el proyecto. De esta manera, a pesar de la independencia funcional y mecánica entre la estructura y la compartimentación, ambos elementos quedan vinculados por la geometría ortogonal que organiza la planta. El revestimiento blanco que cubre pilares y tabiques dota a ambos de una abstracción material que les otorga una equivalente ambigüedad en lo que se refiere a su disímil función portante y delimitadora.

Tanto los tabiques como los pilares cuentan en su parte inferior con un rodapié de madera que, a modo de tapajuntas, sirve para resolver el encuentro entre el suelo y el plano vertical. La presencia de la basa en la columna clásica, ese elemento tectónico que al mismo tiempo resuelve el apoyo estructural del fuste y expresa por medio de su aparente aplastamiento el peso soportado y transmitido al suelo, queda así reducida a tal nimio y prescindible elemento. No obstante, cabe señalar que la existencia de una junta entre el fuste del pilar y el rodapié impide el contacto visual entre ambas partes, simulando con ello la falta de apoyo.

81. En las figuras 13 y 35.a se puede observar la descomposición inicial del volumen del pilar en cuatro planos perpendiculares e independientes.

Los tabiques que compartimentan el gran espacio de exposición de esta planta inferior adquieren un grosor considerable a fin de absorber el grueso de los pilares que quedan embebidos en su interior: se trata de mostrar estos paramentos como superficies planas y sin incidentes. A pesar de la abstracción material y mecánica que brinda el revestimiento blanco que cubre toda su superficie, este grosor excesivo remite más a la presencia de un muro portante que a la apariencia de un elemento de compartimentación. Para contrarrestar este efecto Mies echa mano a su bagaje vanguardista y descompone visualmente el volumen paralelepédico del muro en cuatro planos verticales que, liberando las esquinas, no entran en contacto. A pesar de que en las perspectivas realizadas durante el proceso de proyecto puede observarse la misma descomposición planar en los pilares ⁸¹, en la realidad construida éstos se conforman como una abstracta barra blanca de sección cuadrada y constante en toda su altura que nada tiene que ver con la sutileza visual del éntasis del fuste pétreo de la columna clásica.

La incidencia de la luz eléctrica sobre el plano expositivo genera una sombra en el encuentro entre el tabique y el falso techo que desvincula visualmente ambos elementos. Al identificarse el tabique únicamente con los planos que de él sobresalen y no con el fondo que les sirve de base, éstos transmiten cierta sensación de flotación, pues no entran en contacto en ningún momento ni con el suelo ni con el techo. Este sencillo truco visual, por otra parte tan evidente, es lo que les abstrae en apariencia de toda posible función portante y les otorga, al mismo tiempo, esa abstracta condición leve.

En su parte superior el pilar se entrega directamente contra el falso techo registrable. Desaparece así el capitel, el elemento tectónico que, diseñado con ahínco desde la antigüedad, resuelve estructuralmente y expresa visualmente la transmisión de las cargas al apoyo. Podría considerarse, en última instancia, que el capitel se reduce aquí a las cuatro líneas de sombra que delimitan la placa del falso techo contra la que se entrega el pilar, y a la pequeña junta que deja el arquitecto entre el fuste y el falso techo. Pero, aún así, es evidente que la tectónica tripartita de la columna clásica, tan profusamente

82. Ver apartado III-3.3.1. La tectónica de la estructura arquiteada.

83. "Una columna, cuando se usa, debería seguir considerándose un gran acontecimiento en la construcción del espacio. Con demasiada frecuencia no parece más que un poste o un puntal". KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas. Madrid: El Croquis, 2003, p. 85. El orden de los espacios y la arquitectura (1957).



F.38. Tabique expositivo y pilar de la planta inferior de la Neue Nationalgalerie. www.it.wikipedia.org



F.39. Detalle de un pilar de la planta inferior de la Neue Nationalgalerie.

Fotografía del autor.

elaborada por medio de líneas de sombra y figuraciones diversas⁸², se transforma en la arquitectura moderna en un barra abstracta⁸³ que, en tanto que carente de todo atributo tectónico, no expresa ya en modo alguno su grave condición estructural.

Bötticher identifica la noción de tectónica con la expresión, o incluso la representación, de la función estructural⁸⁴, cuya razón de ser reside en la satisfacción de esa universal necesidad de ordenar equilibradamente pesos y apoyos a fin disponer la materia grave que conforma el espacio. La tectónica revela, pues, la pertenencia del hecho arquitectónico al fenómeno gravitatorio⁸⁵. La eliminación de los elementos tectónicos de la columna clásica no puede reducirse, pues, a una cuestión meramente estilística. La ausencia de signos gravitatorios responde a la voluntad de abstraer formal y figurativamente a la arquitectura moderna de su ineludible naturaleza gravitatoria. A esta ausencia de representación tectónica se suma la ostensible reducción de la sección del soporte moderno en relación a sus predecesores clásicos, posible gracias a los enormes avances de la tecnología estructural a lo largo de los últimos dos siglos.

Así pues, tres son los mecanismos visuales empleados en el diseño del soporte moderno a fin de desvincularlo de su ineludible condición gravitatoria: la reducción de la sección, la ausencia de signos tectónicos que expresen su función portante y la ocultación o ambigüedad de la capacidad portante de su verdadera materialidad. El soporte moderno se presenta entonces como un elemento visualmente incapaz de soportar esfuerzo o peso alguno, lo que automáticamente imprime en el elemento soportado esa apariencia leve. Se trata pues de despojar a la columna de su capacidad portante para transmitir la sensación de que la carga ya no es tal. La ponderación visual de la pesantez de cualquier cubrición estructural se establece inconscientemente en relación a la condición del soporte, presuponiendo su apariencia material, tectónica y dimensional proporcional a la carga. Es por ello que la pesantez aparente de una cubierta ya aliviada en gran medida de su gravidez por medio de la abstracción, se ve obligatoriamente

84. Ver apartado I-2.2.2.2. Bötticher y Semper: estructuralismo y espacialidad archi-Tectónica.

85. "Las articulaciones y la sintaxis de los elementos constructivos (en el capitel, en la columna), al formalizar las estructuras de obras de arquitectura, se han llenado de figuras más o menos gratuitas, que sólo pueden explicarse como signos demostrativos visuales de la inmersión de lo construido en el campo gravitacional. La arquitectura es, a través de esos signos, un espejo de esa emocionante inmersión. Nos advierte primero y luego nos conmueve física y síquicamente al comprobar la obediencia y dependencia común de toda la materia a la ley natural". NAVARRO BALDEWEG, Juan: Navarro Baldeweg. Madrid: Tanais, 2001, p. 16. La Caja de resonancia.



F.40. Exposición en el vestíbulo de la Neue Nationalgalerie.

JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe*. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 78



F.41. Planos flotantes como soporte expositivo en el gran vestíbulo de la Neue Nationalgalerie. www.e-flux.com

minorada por la presencia de un apoyo despojado de su condición portante. Idealmente astático, es decir, formal y mecánicamente equivalente sea cual sea su posición -del derecho o del revés-, el soporte moderno pierde su sentido estructural para convertirse en una suerte de conector visual o de separador espacial entre suelo y techo que puntúa y pauta el espacio libremente abstraído contenido entre ambos planos.

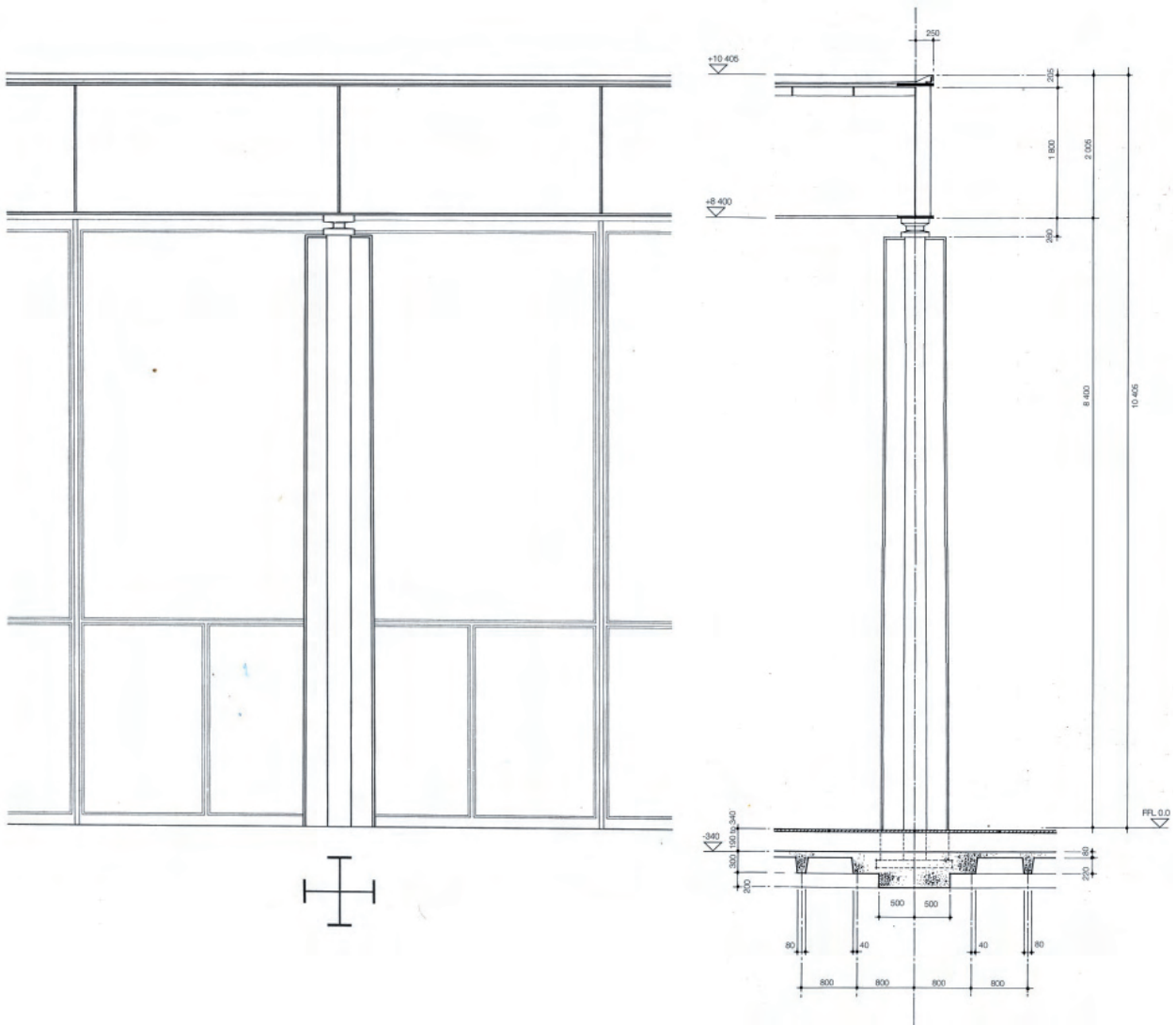
En la planta superior de la Neue Nationalgalerie Mies desarrolla las cuestiones relativas a la compartimentación espacial y al soporte estructural con mayor ambición. La innecesidad funcional de cualquier tipo de división espacial, más allá del mobiliario que define la zona de recepción, hacen de este espacio el ideal construido de la planta libre, un espacio universal capaz de albergar cualquier función, incluida la expositiva. A tal efecto Mies plantea la posibilidad, ya ensayada en proyectos museísticos anteriores desarrollados a lo largo de su carrera, de disponer en el espacio las obras pictóricas con total libertad. Sujetos a suelo y techo por cables prácticamente invisibles ⁸⁶, los soportes expositivos se nos aparecen como abstractos planos blancos suspendidos en el aire, haciendo realidad esa ingravidez compartida por la física einsteiniana y las composiciones pictóricas vanguardistas.

Cada uno de los ocho pilares que soporta la cubierta se constituye por medio de cuatro pletinas en forma de "T" de tres centímetros de espesor que, dispuestas perpendicularmente, comparten un mismo centro. Esta disposición se revela especialmente eficaz frente a las sollicitaciones bidireccionales a que se ven sometidos los pilares dada su ubicación perimetral en la planta cuadrada de la cubierta⁸⁷. En efecto, la organización centrífuga del acero permite al mismo tiempo maximizar la respuesta mecánica de pilar y liberar de masa innecesaria la sección resistente. Este ahuecamiento libera el pilar del peso superfluo, rompiendo con el esquema clásico que vincula la solidez con la pesantez ⁸⁸. Una vez más la capacidad mecánica del elemento estructural no se corresponde necesariamente con la concentración de la masa portante -que con frecuencia resulta contraproducente-, sino con su adecuada disposición espacial.

86. "Para la presentación de las pinturas Mies van der Rohe diseñó una amplia variedad de grandes pantallas blancas de diversas proporciones, que fueron rítmicamente dispuestas y suspendidas de la cubierta mediante fijaciones invisibles". WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin. *Berlin: Vice Versa, 1995, p. 21*

87. "Estructuralmente, esta sección resulta eficaz ante el pandeo en doble dirección que supone la carga del área de cubierta que le corresponde a cada pilar". MORELL SIXTO, Alberto: Espacios sin caja, en CAMPO BAEZA, Alberto (ed): Aprendiendo a pensar. *Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 43*

88. "La claridad constructiva y la musculosa serenidad, propiedades que por lo general se asocian más a la ingeniería civil que a la arquitectura, se logran mediante la supresión del peso superfluo. Hemos despojado los edificios de toda carga innecesaria para hacerlos lo más ligeros posible –comentó Mies van der Rohe-. La pesadez se suele considerar sinónimo de robustez. En mi opinión, es todo lo contrario". CARTER, Peter: Mies van der Rohe trabajando. *London: Phaidon 2006, p. 8*



F.42. Planta, alzado y sección del conjunto formado por el pilar y la cubierta. E 1/100. Composición del autor a partir de BLASER, Werner: *Mies van der Rohe* (6a Ed). Barcelona: Gustavo Gili, 1987, p. 194 y VANDENBERG, Maritz: *New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe*. London: Phaidon, 1998, p. 54

De forma análoga a la estrategia empleada en los tabiques expositivos de la planta inferior, pero en esta ocasión de modo literal, las cuatro caras del volumen que conformaría el pilar se descomponen en planos independientes. Estas alas estructurales quedan expuestas a la luz en toda su anchura, reluciendo con claridad y destacando ciertos brillos en su superficie negra; por efecto de su propia sombra, el alma cruciforme del pilar queda sumida en la oscuridad. Este delicado equilibrio entre la luz y la sombra contribuye sobremanera a la descomposición visual del soporte ⁸⁹.

Este fuste cruciforme estrecha su sección poco a poco a medida que se eleva del suelo. En su parte superior el capitel de la columna clásica se sustituye por una rótula sobre la que se apoya puntualmente la cubierta. Al carecer de basa en su parte inferior el pilar se hunde atravesando el suelo flotante de granito con el que se pavimenta el podio, hasta apoyarse en el pilar de hormigón que le sirve de sustento en la planta inferior. Ocurre en la basa de estos pilares cruciformes lo mismo que en el capitel de los pilares cuadrangulares de la planta inferior, a saber, que el revestimiento -sea un falso techo o un falso suelo- oculta la verdadera condición estructural del encuentro entre el elemento vertical y el horizontal.

Son las nuevas posibilidades estructurales que brinda la ingeniería moderna las que hacen innecesaria la presencia de los elementos tectónicos que identificaron históricamente a la columna clásica: el capitel ya no es necesario para resolver la transición el peso del arquitecónico a la columna, que se puede solventar con un simple y reducido apoyo; el fuste cruciforme se ahueca sin reducir su capacidad portante; la basa es ya innecesaria y, en caso de existir, sería un engaño poco elegante.

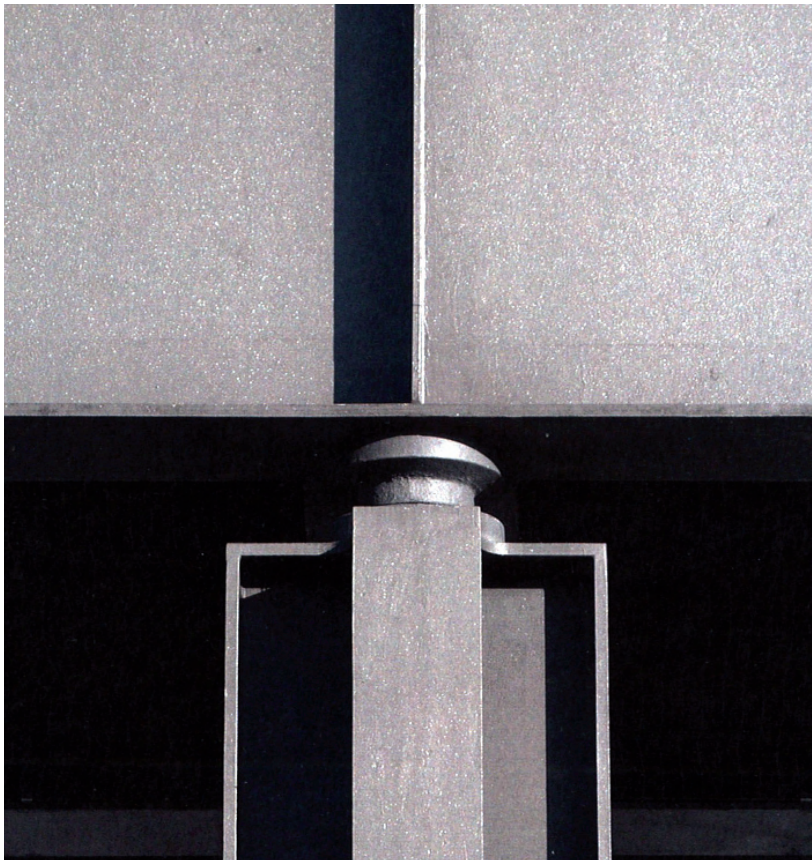
No obstante, a diferencia de los pilares de la planta inferior, su abstracción atectónica no impide al pilar cruciforme expresar su robustez y firmeza en la satisfacción de la función portante. La sección del pilar reproduce, en cierto modo, la disposición en planta de los ocho pilares, ya que en ambos casos las esquinas quedan liberadas de todo apoyo ⁹⁰. Los pilares se disponen en cada lado

89. "Ocho columnas soportan la cubierta, dos por cada lado del cuadrado. Están diseñadas, no son perfiles industriales de doble T. Están expresamente forradas y no son un producto estándar de la industria como sucede con los pilares de la casa Farnsworth. Es la luz la que las traza, no la estática". VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 53. Neue Nationalgalerie. Berlín, Alemania.

90. "Las columnas se construyen con pletinas soldadas de 3 cm de espesor y su sección cruciforme en 4 tes, repite el esquema de la planta con las alas enfrentadas y esquinas liberadas. (...) Los soportes se colocan a cinco módulos de los extremos en cada uno de sus lados para evitar la definición de las aristas de su volumen espacial, descomponiéndose así el espacio en planos y favoreciendo la sensación flotante". MORELL SIXTO, Alberto: *Espacios sin caja*, en CAMPO BAEZA, Alberto (ed): *Aprendiendo a pensar*. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 43



F.43. Esquina en voladizo de la Neue Nationalgalerie. www.flickr.com (Johannes Lietz)



F.44. Detalle del capitel.

JÄGER, Joachim: Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 50

del cuadrado a cinco módulos de la esquina y se separan entre sí otros ocho. Esta particular disposición permite exhibir voladizos de dimensiones inimaginables hasta el momento -unos 18 metros-, una proeza estructural que contribuye enormemente a construir esa anhelada sensación de levedad. La mera posibilidad de este enorme voladizo transmite la sensación de que la cubierta apenas pesa y que los pilares no soportan carga alguna.

La disposición perimetral de los pilares, situados justo en el borde de la cubierta, apunta también en esta dirección y contribuye a generar una cierta sensación de sólida y equilibrada inestabilidad. Desde un punto de vista meramente mecánico, esta ubicación no se corresponde con el esquema estructural más eficiente pues, con toda probabilidad, la ubicación de los pilares en la línea de cerramiento hubiera contribuido a disminuir la flecha central de la cubierta y a contrapesar los momentos del vano interior con los de los voladizos de ambos lados⁹¹.

No obstante, esta disposición retranqueada hubiera impedido la clara expresión de la relación sintáctica que finalmente se establece entre el plano horizontal de la cubierta y la línea vertical del pilar, un esquema que alude sin duda a la relación entre carga y soporte tan elocuentemente representada por la unidad arquitrabada clásica. Se descubre entonces que, a pesar de desarrollar toda una serie de mecanismos visuales destinados a negar la condición pesante de la cubierta y la capacidad portante del pilar, el arquitecto moderno sigue sintiendo la necesidad de señalar ese episodio tan especial para el hecho arquitectónico que representa la ineludible -y no por ello siempre evidente- relación entre lo portado y lo portante.

No obstante, Mies utiliza la tecnología estructural moderna para introducir en esta cuestión un matiz importante. Ya no se trata de señalar esa transición visual de las cargas del elemento horizontal al soporte vertical que en la unidad arquitrabada clásica se expresa por contacto entre el capitel y el arquitrabe, sino que se aprovecha la ocasión para aludir, una vez más, a la inherente condición flotante de la gravedad moderna. Una rótula situada en la cúspide del pilar

91. "Si las columnas hubieran sido retrasadas hasta el cerramiento de vidrio, se hubiera reducido considerablemente la luz de la malla estructural y el conjunto hubiera sido mucho más efectivo desde un punto de vista estático sin comportar ninguna desventaja funcional. Mies van der Rohe, obviamente bien asesorado por su ingeniero de Chicago y consciente de ello, prefirió emplazar las columnas en el borde de la cubierta, aunque de lejos no era la solución óptima desde un punto de vista estructural". WACHTER, *Gabriela* (ed); Peter Craven (trad): Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin. Berlin: Vice Versa, 1995, p. 70



F.45. Imagen del pilar desde el interior del recinto acristalado.

VANDENBERG, Maritz: *New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe*. London: Phaidon, 1998, p. 17

reduce el contacto entre lo portado y lo portante a un simple punto que, en determinadas situaciones lumínicas, adquiere la apariencia de una mera sombra. El capitel clásico se reduce entonces a este simple apoyo puntual, una especie de capitel esencial⁹² que en su versión más abstracta se convierte en una sombra que articula la ambigua relación entre una carga abstraída de su peso y un soporte despojado en apariencia de su función portante⁹³. El capitel en forma de sombra deviene en el apoyo inmaterial de un plano de cubierta que parece flotar sobre el espectador.

Fuera se intenta exhibir un apoyo que desde el interior se pretende ocultar o, por lo menos, velar. Al constituirse los ocho grandes pilares perimetrales en los únicos soportes de la cubierta, el interior del recinto acristalado queda libre de estructura. Es desde este interior donde se hace evidente la desproporción entre el enorme plano de cubierta y la nimia superficie de contacto entre ésta y el pilar. Además, los pilares existentes se perciben a través de los reflejos y los brillos de un vidrio que no resulta siempre tan transparente como imaginó el arquitecto en las perspectivas lineales desarrolladas durante la fase de proyecto, perdiendo así en presencia y visibilidad desde el interior.

La dirección del museo advierte la necesidad de disponer de algún tipo de elemento que permita proteger las obras expuestas en el vestíbulo superior cuando la luz solar sea lo suficientemente horizontal como para incidir directamente sobre ellas. Mies se ve obligado entonces a aceptar la inclusión de una cortina perimetral de suelo a techo situada justo detrás del vidrio aunque, en aras de garantizar la transparencia del cerramiento proyectado, pide que sólo se utilice cuando la presencia de la luz solar amenace la integridad de las obras expuestas. Del mismo modo que el color del vidrio hace imperceptible la presencia del contrafuerte desde el interior de la catedral gótica, la cortina activada por la luz vela con su presencia la percepción del soporte situado a siete metros de distancia. Cuando esto ocurre, no sólo se desdibuja el límite de la cubierta que rebosa el cerramiento, sino que desde dentro se tiene la percepción de que son los pliegues de luz y sombra de la

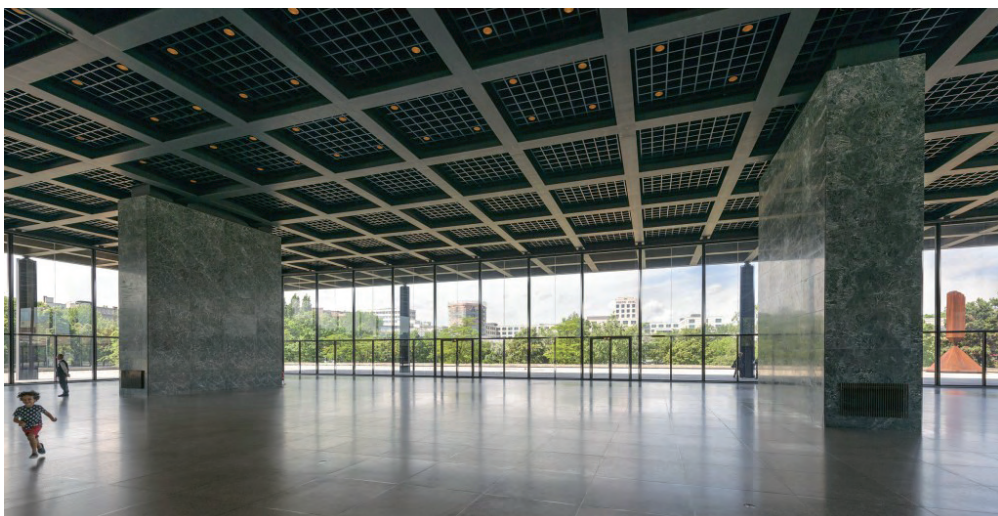
92. "Durante el siglo XX, el desarrollo de nuevas técnicas constructivas, en especial del uso generalizado de la retícula estructural con el consiguiente proceso de desmaterialización de los muros que ello comporta, ha tendido a desplazar el centro de atención del problema del peso hacia los apoyos, o sea, hacia las formas de sustentación de las losas y al modo concreto en que las cargas se transmiten al terreno. Las ocho columnas de acero que sostienen la gran cubierta del museo de Berlín de Mies van der Rohe podrían ser un buen ejemplo de lo que estamos diciendo. La pequeña rótula esférica que, a modo de capitel esencial, resuelve el apoyo de la losa sobre las columnas, a pesar de ser una respuesta técnica muy depurada, no responde al famoso principio de la "sinceridad constructiva", supuestamente de obligado cumplimiento para todo arquitecto moderno, sino más bien a la vieja estrategia de simular la ingravidez de una construcción cuyo techo no oculta, por otra parte, una gran robustez y corpulencia. Hay algo aquí que nos recuerda la imperturbable sonrisa de las cariátides, que no muestran ni el menor signo de incomodidad por el hecho de soportar sobre sus cabezas un poderoso entablamento". *Carlos Martí Arís, en ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 9*

93. "El capitel es una especie de rótula plana para el apoyo simple de la placa de la cubierta. Pero al igual que el fuste, brilla por su ausencia. Aunque sí que existe físicamente, se trata de una pieza tan mínima que es inapreciable. De hecho, lo es, ya que lo único que podemos observar es una sombra allí donde debería encontrarse el ábaco y equino clásicos". *ALMONACID CANSECO, Rodrigo: Mies van der Rohe: el espacio de la ausencia. Valladolid: Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial, 2006, p. 61*

"Las columnas son sólidas y potentes porque son pocas y su capitel es únicamente una junta, una sombra en la sombra". *VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): Obras maestras. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 53. Neue Nationalgalerie. Berlín, Alemania.*



F.46. Distinta presencia del soporte visto a través del vidrio o de la cortina.
COHEN, Jean-Louis: *Mies van der Rohe*. Madrid: Akal, 2007, p. 125



F.47. Los dos robustos conductos de ventilación revestidos de mármol en contraposición
con los verdaderos soportes estructurales. www.mimoa.eu

cortina los que soportan el plano de cubierta, contribuyendo así a su levedad visual.

Es entonces cuando la presencia de los dos conductos de ventilación apantallados que atraviesan el espacio desde la planta inferior hasta alcanzar la cubierta adquiere una mayor significación. Tanto su dimensión como su revestimiento marmóreo dota a estas pantallas rectangulares de una apariencia estructural muy criticada en su momento⁹⁴. A fin de contrarrestar esta apariencia mecánica, Mies resuelve el encuentro entre el conducto y la cubierta por medio de una amplia junta negra en sombra que evita el contacto visual entre ambos elementos⁹⁵. De este modo, aunque visualmente el mármol se apoya sólidamente sobre el granito, se niega la posibilidad del apoyo de la cubierta de acero sobre el mármol, lo que desmiente su apariencia estructural.

El conjunto de todos estos signos contradictorios -unas veces negando visualmente la posibilidad del apoyo, otras expresando su carácter estructural- es lo que dota al soporte estructural moderno de la capacidad de aludir a esa levedad grave con semejante nitidez. La dicotomía del carácter tectónico-atectónico del soporte, su ambigua condición estructural y abstracta, contribuye de manera inestimable a construir esa levedad arquitectónica que deriva de la gravedad flotante de la física einsteiniana y las vanguardias europeas. Esta abstracta ambigüedad gravitatoria devendrá en sello identificativo de las mejores obras de arquitectura modernas.

Es en este contexto en el que deben encuadrarse aquellas estrategias proyectuales que son capaces de aludir simultáneamente a ideas opuestas desde el punto de vista del hecho gravitatorio. La tensión entre la abstracción atectónica y la tectónica estructural es un buen ejemplo de ello, así como la ambigüedad de la expresión de la relación entre carga y soporte. En el caso concreto de Mies van der Rohe se recupera también esa idea aristotélico-galileana según la cual la disposición de la materia grave en el mundo se establece en relación a la vertical de acuerdo a su mayor pesantez o ligereza⁹⁶,



F.48. Imagen del espacio interior visualmente delimitado por la cortina. El oscuro conducto de ventilación adquiere una presencia notable sobre este telón de fondo. WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): *Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin*. Berlin: Vice Versa, 1995, p. 78

94. "Mies van der Rohe fue también acusado de preferir un ideal de la forma abstracta a la estructuralmente viable, y por tanto al racionalismo constructivo. Fue en este contexto que las chimeneas de servicios revestidas de mármol del espacio de exposiciones principal fueron enormemente criticadas. Su apariencia de soporte, se criticó, daban la falsa impresión de tener una función portante". WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): *Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin*. Berlin: Vice Versa, 1995, p. 25

95. "Aún sin tener ninguna función portante, no estando conectados con la cubierta, parecen soportes o columnas en el espacio". JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 18*

96. *A tal efecto ver los apartados II-2.1. Aristóteles: gravedad telúrica y luz etérea y II-3.1.1. El principio del fin de la gravedad aristotélica.*



F.49. Contraposición entre el podio estereotómico y el belvedere tectónico en el lado norte. Fotografía del autor.



F.50. Belvedere tectónico sobre podio estereotómico ahuecado por el programa.

Vista del patio abierto a oeste. www.vizcayado.blogspot.com



F.51. Vista nocturna del podio abierto al patio y la estructura abierta al podio. www.domusweb.it

correspondiendo a los cuerpos masivos y pesantes un lugar en contacto con la tierra y a los elementos ligeros una posición aérea más elevada, desvinculada de lo telúrico. Es obligado señalar que esta distinción entre arriba y abajo entra en frontal oposición con la equivalencia formal -analizada anteriormente- que supone la construcción del suelo y el techo por medio de planos horizontales abstraídos de su condición estructural-gravitatoria.

La constante necesidad miesiana de construir un plano horizontal por medio del cual fijar las relaciones del proyecto con su entorno inmediato se traduce, frecuentemente, en la construcción de un podio estereotómico de apariencia masiva que, en determinadas ocasiones, se ahueca a fin de alojar en él un programa servidor. Sobre este podio estereotómico se posa una construcción de carácter tectónico y apariencia más ligera⁹⁷. La Neue Nationalgalerie es, sin duda, el máximo exponente de este esquema en la obra de Mies. En la parte inferior, en contacto con la tierra, se construye un podio de hormigón armado que, convenientemente revestido en piedra, debe transmitir una inequívoca sensación de pesantez y solidez. Sobre este podio estereotómico se apoya el belvedere de acero formado por los ocho pilares y la cubierta, una estructura tectónica vinculada a la idea de ligereza⁹⁸. Sin no pocas contradicciones internas, de acuerdo al análisis de los distintos momentos en que se expresa y niega al mismo tiempo la condición del apoyo, con este gesto Mies recupera para el conjunto del proyecto aquella histórica dicotomía entre el soporte y la carga, lo portante y lo portado, lo estereotómico y lo tectónico, lo pesado y lo ligero, lo grave y lo leve, lo telúrico y lo etéreo, lo opaco o lo diáfano... En definitiva, entre aquello asociado a la gravedad y aquello otro vinculado a la luz.

Es precisamente en la activación por medio de la abstracción de estos signos gravitatorios opuestos donde reside la complejidad y la riqueza de la gravedad arquitectónica moderna. En la voluntad de dar forma construida a esa "flotación grave" einsteiniana, tan difícil de asimilar desde la mera experiencia, reside la naturaleza de la arquitectura moderna como hecho espacial.

97. La contraposición entre la estereotomía del podio y la tectónica del belvedere -empleando aquí estos términos en el sentido que les otorga K. Frampton- ha sido ya analizada en el presente trabajo de investigación a propósito de la obra de Juan Navarro Baldeweg (1-2.1.3.1. Estratificación vertical de lo pesado y lo ligero) y Alberto Campo Baeza (1-2.2.3.2. El belvedere tectónico sobre el podio estereotómico), como no podía ser de otro modo deudores ambos de la arquitectura de Mies van der Rohe.

98. "La gran cubierta de la Galería, que hace referencia a la línea del horizonte, parece estar suspendida sobre un basamento estereotómico. Pero, por otro lado, se apoya con seguridad sobre éste, formando con los soportes un todo tectónico que, desde el interior, se impone sobre el entorno que lo circunda. Aparece así, un equilibrio entre la lógica constructiva de la forma tectónica con el espacio continuo de la vanguardia. El basamento es continuo y de granito gris y la cubierta y pilares, se acaban con pintura negra evidenciando su presencia y unidad frente al basamento". MORELL SIXTO, Alberto: Espacios sin caja, en CAMPO BAEZA, Alberto (ed): Aprendiendo a pensar. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 42

"Difícilmente hubieran podido hacerse una puesta en escena más dramática, con la oposición entre el fuertemente anclado plinto hecho de granito y el volumen acristalado absuelto de toda masa. La monumentalidad clásica se conjuga con la transparencia moderna... Como una escultura o un objeto de culto, el moderno pabellón de acero es emplazado en el proverbial plinto, ceremonialmente elevado". Fritz Neumeier, "Der Spätheimkehrer. Mies van der Rohes Neue Nationalgalerie in Berlin", en Neue Nationalgalerie Berlin. Dreissig Jahre, exh. Cat. Neue Nationalgalerie (Berlin, 1998), pp. 27-36. Citado en JÄGER, Joachim: Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 51

III.5.4. LA ESPACIALIDAD DE LA LUZ ABSTRACTA

“Quizá sea esta la cualidad más destacable de estos contingentes nuevos espacios: la ausencia de direccionalidad lumínica y, con ella, la tendencia a la desaparición del borde, del límite y del contorno: un espacio sin sombras”.⁹⁹

José Antonio Sosa Díaz-Saavedra

Aunque las investigaciones realizadas entre los años treinta y sesenta del siglo XIX por Michael Faraday y James Clerk Maxwell sobre el fenómeno electromagnético no tenían inicialmente ningún interés para con la luz, sus observaciones y desarrollos matemáticos conducen finalmente a la formulación de una nueva teoría en la que la luz se conceptualiza como una onda electromagnética. Puesta en duda ya desde principios de siglo, esta nueva teoría pone fin definitivamente a la concepción corpuscular de Newton. La teoría electromagnética alcanza entonces una amplia aceptación entre la comunidad científica, a pesar de no ser capaz de explicar correctamente algunos fenómenos recientemente descubiertos¹⁰⁰.

La necesidad de dar explicación a estos fenómenos conduce, a principios del siglo XX, a una nueva formulación sobre la naturaleza de la luz: la cuántica. En 1905 Einstein publica un artículo en el que consigue explicar el efecto fotoeléctrico basándose en la idea de Planck de que la energía no se propaga de manera continua, sino por medio de paquetes llamados “cuantos”. Recuperando en cierto modo la concepción corpuscular de Newton, Einstein concibe la luz como partículas liberadas de masa a las que llama “fotones”. Aunque este hallazgo le vale el Premio Nobel de Física en 1921, su propio autor reconoce la incapacidad de la teoría cuántica de la luz de dar explicación a determinados fenómenos. Einstein pone solución a esta dificultad otorgando a la luz un carácter dual que, en determinadas ocasiones, manifiesta su naturaleza corpuscular, mientras que en otras muestra un carácter inequívocamente ondulatorio¹⁰¹.

99. SOSA DÍAZ-SAAVEDRA, José Antonio: Espacios sin sombra, en *Arquitectura: Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM)*, ISSN 0004-2706, N.º. 330, 2003, p. 57

100. Ver apartado II-4.1.1. El siglo XIX: de la luz corpuscular a la onda electromagnética.

El mismo año en que publica su explicación sobre el fenómeno fotoeléctrico, Einstein publica también su teoría de la relatividad restringida, en la que establece la velocidad de la luz en el vacío como una referencia constante de carácter universal. Ese mismo año publica también un artículo en el que descubre la importancia de la velocidad de la luz en la reciprocidad entre masa y energía ¹⁰².

A pesar de reconocer la naturaleza dual ondulatoria y cuántica de la luz, en cualquier caso liberada de masa, una década más tarde Einstein predice en su teoría de la relatividad general la gravitación de la luz. Sin embargo, la curvatura del rayo luminoso por efecto de la gravedad de una gran masa, como una estrella o un planeta, no se debe a algún tipo de atracción de naturaleza newtoniana, sino a la propagación rectilínea de la luz a través de un espacio-tiempo curvado por la gravedad ¹⁰³.

Esta representación einsteiniana de la luz se constituye como una teoría abstracta, una construcción intelectual del fenómeno físico de consecuencias tan poco intuitivas como difícilmente sensibles a la experiencia cotidiana y, por tanto, difícilmente aprehensibles. A pesar de advertir la importancia de estos descubrimientos, la dificultad de conceptualizar esta nueva manera de entender la luz lleva a las vanguardias europeas a construir un discurso artístico sobre la luz moderna un tanto confuso que, en demasiadas ocasiones, se agota en la utilización irreflexiva de la terminología propia del lenguaje científico. No obstante, en una parte importante de la obra pictórica vanguardista es posible observar ciertas cuestiones que, como veremos, tiene una incidencia directa en el modo de concebir la luz en la arquitectura moderna.

En aquellas composiciones donde se representan volúmenes en el espacio, la luz es concebida como un fenómeno abstracto cuya principal finalidad es hacer visibles los planos de color que los definen. La luz representada es una luz adireccional, sin un único foco definido, utilizada para producir las diferencias de intensidad lumínica que hacen posible la identificación volumétrica de los distintos planos. Esta falta de dirección del rayo lumínico supone

101. Ver apartado II-4.1.2.1. La naturaleza cuántica de la luz.

102. Ver apartado II-4.1.2.2. La velocidad de la luz como constante universal.

103. Ver apartado II-4.2.2. La gravitación de la luz en la relatividad general.



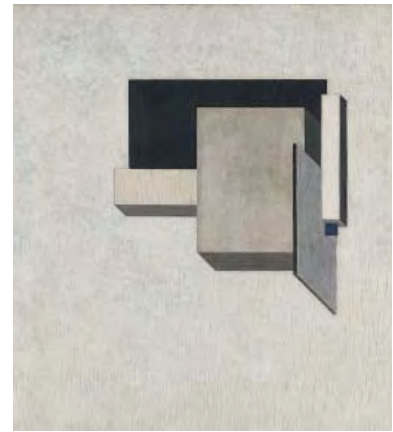
F.52. Imagen de la claridad interior en ausencia de luz solar directa; puede advertirse el reflejo de la luz en suelo y el brillo en el techo. Fotografía del autor.

también la ausencia de sombras proyectadas, lo que, en conjunción con la inexistencia de cualquier orientación direccional del espacio y el gusto por la representación axonométrica, imprime al espacio y a los objetos que en él se representan un carácter flotante. La pintura vanguardista no se deleita, pues, en la expresión artística de la experiencia sensible del fenómeno lumínico, sino que emplea la luz, convenientemente abstraída de su dirección y su capacidad de generar sombras, como fondo espacial y elemento necesario para la percepción visual tridimensional de los objetos representados. En plena analogía con la física teórica einsteiniana, la pintura vanguardista antepone la conceptualización de esta entidad física universal que es la luz, a su experiencia sensible cotidiana ¹⁰⁴.

A pesar de que el origen del carácter marcadamente abstracto de la luz vanguardista hay que encontrarlo con toda seguridad en la intelectualización artística del fenómeno lumínico bajo la influencia de la física einsteiniana, no puede pasarse por alto que estas vanguardias artísticas se desarrollan en el norte de Europa, una latitud geográfica caracterizada por la suavidad de su luz solar. En base a esta observación parece lícito aventurar entonces que la condición abstracta de la luz vanguardista puede deberse también a las propiedades que, de manera natural, caracterizan a la luz nórdica, una luz suave, difusa, indirecta, adireccional, constate, densa, homogénea ¹⁰⁵.

Los principios de la arquitectura moderna se establecen en este mismo entorno geográfico, bajo la influencia de una luz nórdica convenientemente abstraída. Igual que en las representaciones pictóricas vanguardistas, durante la primera arquitectura moderna esta luz naturalmente uniforme y homogénea se limita a revelar la existencia visual de la obra, sin mayor implicación en la configuración del espacio. En este sentido, el ideal de la luz moderna se identifica con una claridad neutra, sin dirección definida.

Mies se instituye en paradigma de esta actitud. En las perspectivas lineales desarrolladas para sus proyectos no hay espacio para la luz; en todo caso, la luz se identifica con el blanco soporte sobre



F.53. El Lissitzky: "Proun 1-C", 1919. Detalle en el que pueden observarse planos y volúmenes sin sombras proyectadas flotando en el espacio. GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: Después de Einstein: una arquitectura para una teoría, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, p. 106

104. "En el siglo XX fueron los pintores quienes introdujeron la nueva concepción del espacio, conscientemente opuesta a la infatigable superficialidad de la pintura y la arquitectura de finales del siglo XIX y al Art Nouveau". GIEDION. *Sigfried: La arquitectura, fenómeno de transición: las tres edades del espacio en arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 1975, p. 7

105. *Sobre la luz nórdica en la arquitectura* ver ORDEN, Verónica: Luz de norte, Tesis doctoral. Barcelona: Grupo PAB, Departamento de Proyectos Arquitectónicos, ETSAB, UPC, 2013.

el que se dibujan las líneas que configura el espacio¹⁰⁶. La luz desaparece y, con ella, todos los efectos lumínicos que se producen como consecuencia de la interacción de la luz con la materia; los brillos, las diferencias de intensidad lumínica, los reflejos, los degradados, las transparencias, las sombras... en la perspectiva todo ello se abstrae en favor de una blanca claridad ¹⁰⁷ que, de tan homogénea, se identifica con la noción misma de espacio. El espacio moderno debe su condición abstracta a las propiedades de una luz que no se limita a cualificarlo visualmente, sino que llega a identificarse con él: el espacio es abstracto, homogéneo, continuo, adireccional... porque la luz que lo configura, su propia luz, reúne estas cualidades.

Tal y como se ha expuesto anteriormente, el espacio moderno participa al mismo tiempo de la exterioridad de la primera concepción espacial, de la interioridad de la segunda, y de la interrelación entre interior y exterior de la tercera, estableciendo un orden espacial totalmente nuevo. La dicotomía entre interior y exterior desaparece sin tener que recurrir a la fusión de ambos. Esta cuarta concepción espacial es capaz de abrirse al exterior sin perder su carácter interior, pues ambas situaciones espaciales ni se segregan ni se funden sino que, manteniendo su propia entidad, se vinculan entre sí de un modo continuo ¹⁰⁸.

De acuerdo con la tesis mantenida en la presente investigación, el carácter interior o exterior del espacio arquitectónico viene definido por la cualidad de la luz y la sombra que lo configuran. En la *primera concepción* espacial el espacio arquitectónico es sinónimo de *exterior*; sin apenas manipulación alguna, la luz solar se impone a la sombra proyectada por los objetos, creando un espacio de *sombras en la luz*. La *segunda concepción* se define por el carácter *interior* de un espacio que se aísla del exterior, construyendo una sombra en la que se manifiesta una luz que, pese a compartir con la luz solar exterior sus mismas propiedades físicas, ha sido objeto de manipulación arquitectónica a fin de convertirse en una luz particular, propia y apropiada para ese espacio. Durante la *tercera concepción* espacial los avances de la tecnología decimonónica

106. Tal como se expone a lo largo del presente apartado, la ausencia de fenómenos lumínicos en las perspectivas de Mies no debe asociarse al desconocimiento o la indiferencia en relación a estas cuestiones, sobre las que el arquitecto demuestra en su obra construida una notable maestría y sensibilidad.

107. "Nótese como Mies van der Rohe no ocupaba al proyectar su atención en la luz, salvo como iluminación necesaria homogénea". APARICIO GUIZADO, *Jesús María: Construir con la razón y los sentidos*. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 82

108. Ver apartado III-5.2. La estructuración del espacio continuo.

permiten la construcción de un espacio arquitectónico que, aunque lumínicamente exterior, no queda expuesto a las inclemencias atmosféricas. El cerramiento transparente hace posible la construcción de un espacio homeostáticamente interior aunque lumínicamente exterior, es decir, un espacio *interior exteriorizado* en el que la luz impera sobre la sombra.

El espacio moderno de la cuarta concepción aglutina estas consideraciones lumínico-espaciales en su voluntad de constituirse como un *interior en continuidad con el exterior*. Satisfecha con creces esa histórica ansia de luz que caracterizó a la arquitectura de hierro y cristal del siglo XIX, cuyo interior quedaba inundado de luz solar sin mediación alguna, la arquitectura moderna recupera esa sombra que caracteriza el espacio interior de la segunda concepción espacial. La opacidad del plano de cubrición espacial deviene en este sentido una cuestión fundamental, pues en ella reside la construcción de la sombra proyectada que garantiza el carácter interior del espacio. Sin embargo, esta rotunda opacidad horizontal se combina con la total permeabilidad lumínica que hace posible la combinación del mínimo soporte estructural y la máxima transparencia del cerramiento. Esta sabia combinación de opacidad horizontal y transparencia vertical hace realidad el ideal del espacio moderno.

La estructura gravitatoria de cada concepción espacial establece una relación precisa con el carácter lumínico del espacio que contribuye a construir; así pues, la estructura adintelada monolítica de la primera concepción se muestra incapaz de cubrir el espacio, de modo que se limita a configurar espacios exteriores donde predomina la luz solar; la estructura mural y cupulada de la segunda etapa protege el espacio interior de la luz exterior; y la esbelta estructura lineal de la tercera concepción permite inundar de luz el espacio. Durante la etapa inicial de la cuarta concepción espacial, tanto en la estructura de acero de la Escuela de Chicago como en el desarrollo europeo de la estructura en hormigón armado, el esqueleto reticular en general y la estructura de bandejas en particular, encuentran su razón de ser en la maximización de la luz que penetra horizontalmente a través del plano vertical de cerramiento y la oposición a la luz que incide



F.54. Reflejo y claridad como propiedades de la luz nórdica.

JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe*. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 97

verticalmente sobre el plano de cubrición horizontal. No sólo el hueco acristalado se hace cada vez más grande hasta identificarse con la propia noción de fachada, sino que los elementos estructurales que hacen posible estos huecos -pilares, capiteles, dinteles, etc.- tienden a minimizarse para permitir la máxima entrada de luz ¹⁰⁹. Así pues, en su tendencia a eliminar aquellos elementos considerados estructuralmente superfluos o innecesarios, la abstracción atectónica del fenómeno gravitatorio contribuye también a maximizar la cantidad de luz que ingresa en el interior del espacio moderno.

A pesar de las limitaciones funcionales que presenta su iluminación natural para el correcto desarrollo del programa expositivo ¹¹⁰, el gran vestíbulo de la Neue Nationalgalerie de Mies deviene en paradigma de la luz moderna. La enorme cubierta plana protege el espacio de la incidencia directa de la luz solar, dando lugar a una sombra proyectada que sume al espacio en la penumbra. Esta rotunda opacidad contrasta con la total diafanidad del vítreo cerramiento vertical que, por medio de su transparencia, permite una total transividad lumínica y visual entre el espacio acristalado y el exterior.

Tal como se ha expuesto anteriormente, el deambulatorio perimetral -que resulta del desfase que se produce entre la cubierta opaca proyectada en voladizo y el cerramiento transparente- se convierte en un espacio de transición entre el interior y el exterior, en un umbral espacial que no pertenece a ninguna de las dos categorías espaciales pero que, sin embargo, participa de ambas al mismo tiempo. Cuando el espectador se encuentra bajo la cubierta del porche, pero permanece fuera del recinto de cristal, tiene la sensación de no estar ni dentro ni fuera, sino de estar “entre” el interior y el exterior.

La luz contribuye de manera decisiva a esta ambigüedad espacial del límite entre interior y exterior. En condiciones normales, se tiende a asociar el área oscurecida por la sombra proyectada por la cubierta con una cierta noción de interioridad, mientras que se identifica la zona directamente iluminada por el Sol con el espacio exterior. Éste incide directamente sobre la fachada de cristal de la Neue

109. “Luz y espacio, preferidos a todos los estilos”. *Industrial Chicago*, vol. I, 1891, p. 69.

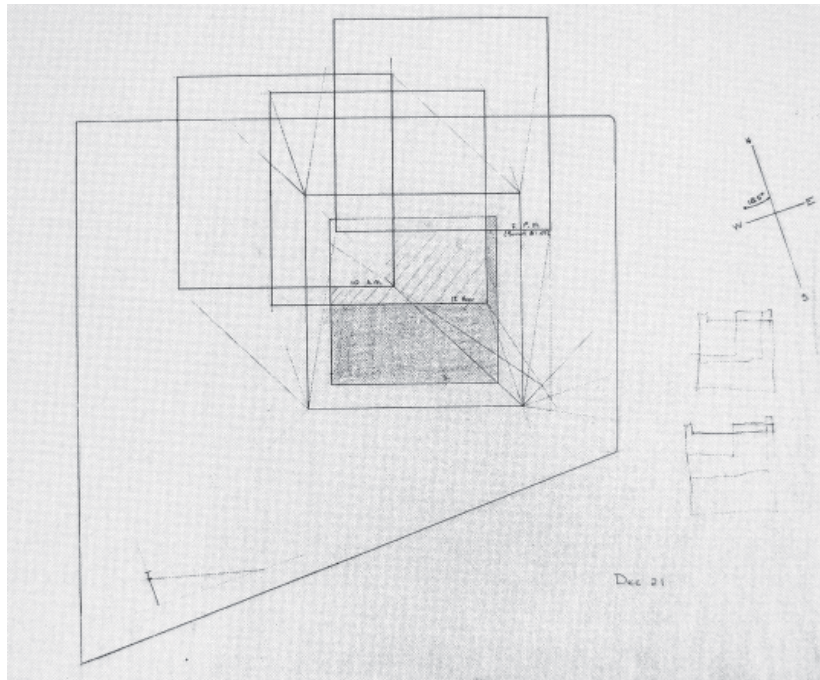
“Espacio, luz, ventilación y seguridad fueron los objetivos propuestos en la construcción del Leiter”, habiéndolos logrado de una manera perfecta”. *Industrial Chicago*, vol. I, 1891, pp. 204-205.

“Su fachada está proyectada para que cumpla sus funciones indispensables, sobre todo el admitir luz. Sus elementos fundamentales son las “ventanas de Chicago”, prolongadas en sentido horizontal, admirablemente homogéneas y estudiadas para que coincidan con la estructura de sostén”.

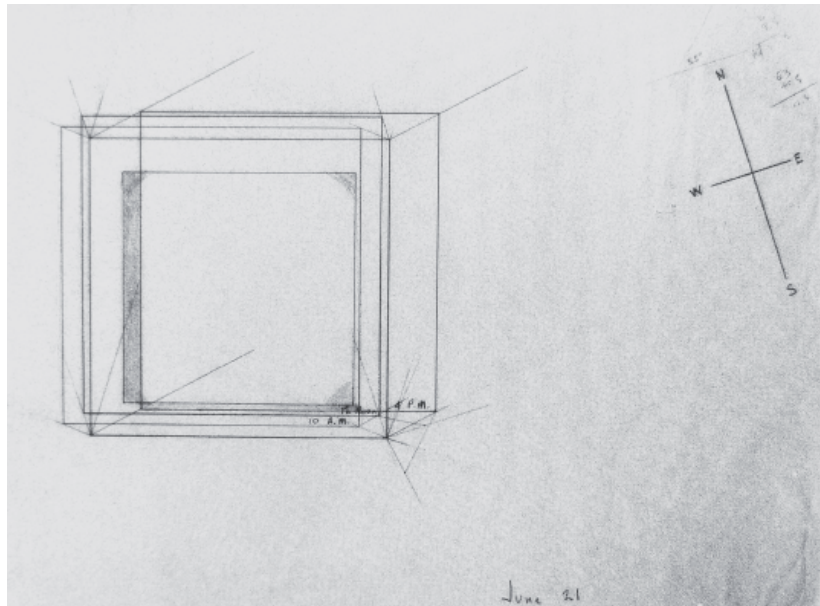
GIEDION, *Sigfried*: *Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición (5a ed.)*. Madrid: Dossat, 1978, pp. 388, 401 y 405 respectivamente.

110. *En la Neue Nationalgalerie Mies van der Rohe antepone el carácter universal de la obra a la satisfacción de las necesidades concretas del programa expositivo. Como consecuencia, ciertas decisiones proyectuales relativas a la correcta iluminación del espacio expositivo quedan relegadas a un segundo plano. Sobre las deficiencias de la iluminación del espacio expositivo de la Neue Nationalgalerie, ver VANDENBERG, Maritz: New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe. London: Phaidon, 1998, pp. 13-22 y WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin. Berlin: Vice Versa, 1995, p. 16*

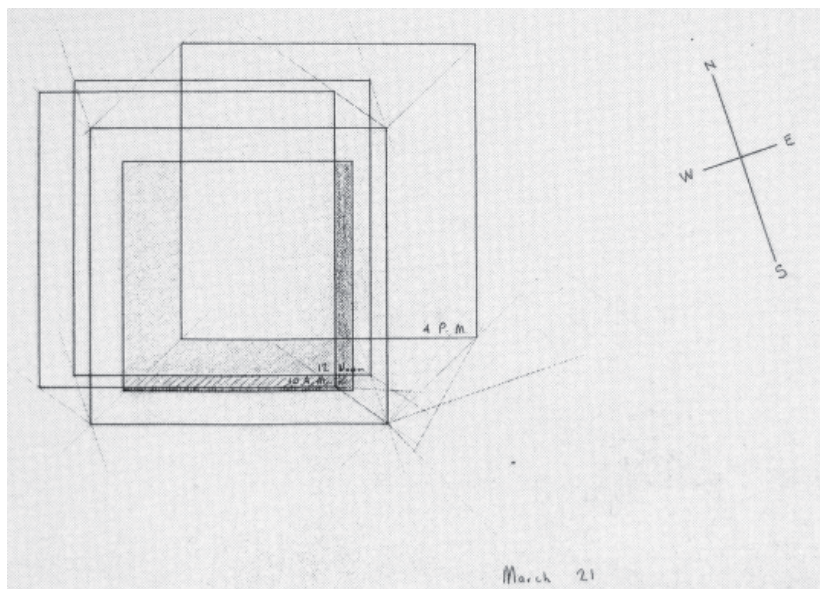
F.55. Estudios de la incidencia solar y la proyección de la sombra de la cubierta en planta. SCHULZE, Franz (ed); DANFORTH, George E.: *The Mies van der Rohe Archive: an illustrated catalogue of the Mies van der Rohe drawings in the Museum of Modern Art. Part II; volume XIX: New National Gallery, Martin Luther King Jr. Memorial Library, and other buildings and projects.* New York and London: Garland, 1992, p. 227



Incidencia solar y sombras proyectadas en el solsticio de invierno (21 de diciembre)



Incidencia solar y sombras proyectadas en el solsticio de verano (21 de junio)



Incidencia solar y sombras proyectadas en el equinoccio de primavera (21 de marzo)

Nationalgalerie cuando tiene muy poca inclinación con respecto a la horizontal. La proporción vertical del porche, de 8,40 metros de altura libre bajo cubierta y 7,20 metros de profundidad entre el borde de la cubierta y el cerramiento de cristal, hace que la línea de proyección de la sombra arrojada se encuentre la mayor parte del tiempo en el interior del recinto acristalado. Se produce así una “dislocación” entre la sombra de la cubierta y el recinto delimitado por el cristal. El área que queda directamente iluminada por la luz solar, aún cuando se encuentra cubierta y delimitada por el recinto acristalado, adquiere un cierto carácter exterior. Por contra, la zona que queda sumida en la sombra, incluso cuando se encuentra fuera de la caja de cristal, adquiere el carácter lumínico de un interior.

Sin embargo, esta situación sólo se produce cuando el Sol brilla con fuerza. Cuando el cielo nublado actúa como pantalla difusora -una situación frecuente en esta latitud-, el rayo solar pierde su direccionalidad de manera natural y, con ello, su capacidad de generar sombras proyectadas bien definidas. Se convierte entonces en una luz difusa y uniforme, en una claridad homogénea muy similar a la de las representaciones pictóricas vanguardistas. Cuando esto ocurre, la luz natural del exterior y la luz que configura el interior apenas presentan diferencias; esta homogénea claridad natural, ideal moderno de una luz natural que parece abstracta, hace que el interior y el exterior devengan lumínicamente equivalentes¹¹¹. La ideal transparencia del cerramiento vítreo permite la continuidad total de la luz, hecho que contribuye de manera decisiva a la continuidad espacial entre interior y exterior que caracteriza al espacio moderno¹¹². Puede identificarse en la luz arquitectónica moderna una cierta analogía con la naturaleza dual que Einstein otorga a la luz pues, así como en el ámbito de la física se acepta que la luz a veces se comporta como un cuanto de energía y otras lo hace como una onda electromagnética, convenientemente arquitecturizada la luz solar puede poseer al mismo tiempo un carácter exterior o interior.

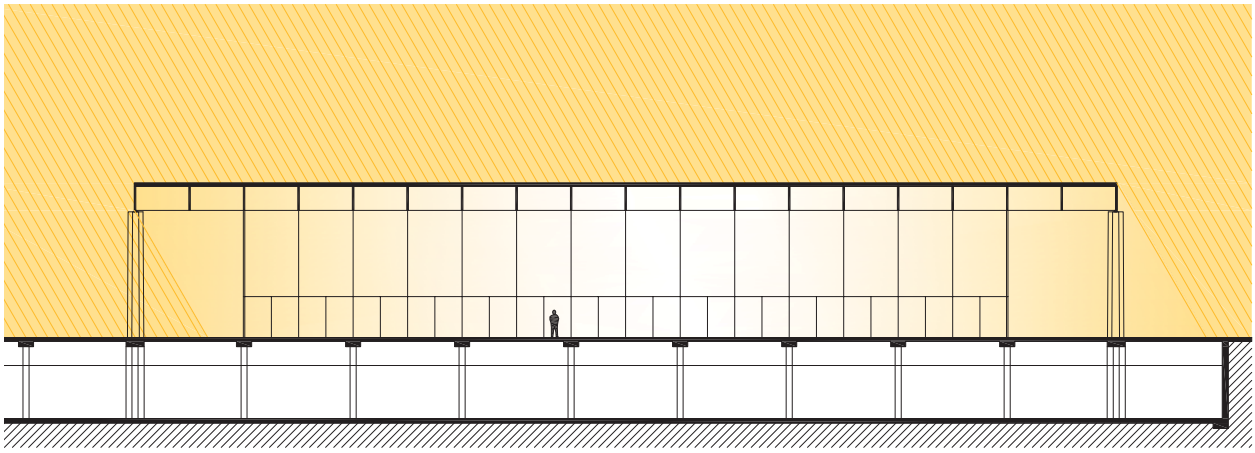
Desde un punto de vista puramente lumínico, la consecuencia de esta claridad adireccional se convierte en el principal fin de la arquitectura moderna¹¹³. La misión del plano horizontal de la cubierta ya no es

111. “Con independencia del tiempo, otro clima caracterizado por una suave luz prevalece en el interior, en lugar de perder la conexión con el mundo exterior uno percibe los muros de cristal como una membrana transparente que hace de intermediaria entre a vida interior y la exterior. (...) Es un “interior que aparenta estar fuera”, tal y como Fritz Neumeyer señaló acertadamente”. JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 17*

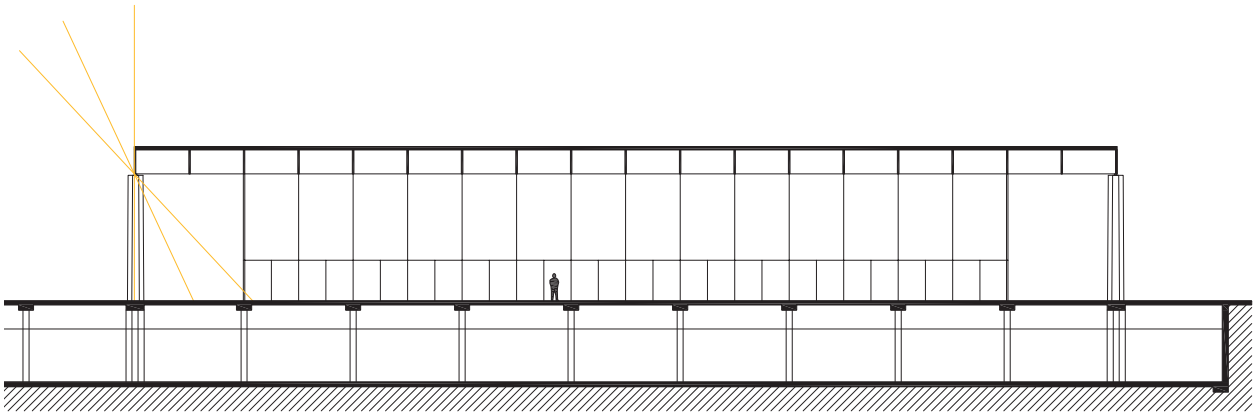
112. *La eventual presencia de las cortinas hace más difusa si cabe la luz que baña el interior del espacio pero, al mismo tiempo, su presencia luminosa impide la continuidad visual.*

113. “Este reduccionismo ha tenido lugar en la arquitectura moderna cuando se ha querido conseguir lo que se denomina “un nivel uniforme en la iluminación interior”, lo cual supone hacer abstracción del fenómeno lumínico y de su beneficiosa influencia psicológica y estimulante que la luz natural variable tiene en el ser humano”. YÁÑEZ PARAREDA, Guillermo: *Arquitectura solar e iluminación natural: conceptos, métodos y ejemplos. Madrid: Munilla-Lería, 2008, p. 419*

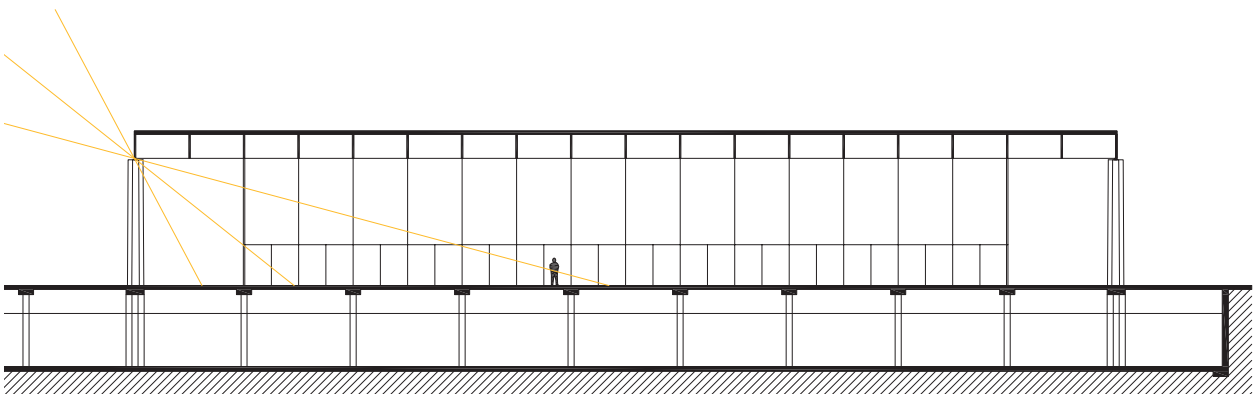
114. “El Movimiento Moderno se ha ocupado de la luz más que de la sombra ya que sus autores mayoritariamente son originarios de países de latitudes altas”. APARICIO GUIASADO, Jesús María: *Construir con la razón y los sentidos. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 34*



a)



b)



c)

F.56. Esquemas solares en sección. Dibujos realizados por el autor (inclinaciones solares extraídas de www.gaisma.com)

- a) Representación de la luz horizontal continua.
- b) Inclinación de la luz solar en Santiago de Cuba
- c) Inclinación de la luz solar en Berlín

construir una sombra, como ocurría en la segunda concepción espacial, sino privar a la luz solar exterior de su dirección vertical ¹¹⁴. Idealmente esta claridad interior, suficientemente débil como para no provocar sombras y suficientemente densa como para identificarse con la noción misma de espacio, fluye homogénea y continuamente por el espacio con independencia de las particularidades de la luz solar exterior ¹¹⁵. El umbral, que en la Neue Nationalgalerie adquiere la forma de un gran porche, se convierte entonces en un elemento fundamental de la arquitectura moderna, pues en él se produce la transición entre la luz solar exterior y la claridad interior.

Igual que en la tercera concepción espacial, y a diferencia de las anteriores, la orientación solar del edificio pierde su histórica importancia. Sin embargo, mientras que en el siglo XIX esta falta de interés por la orientación solar se debía a que el espacio arquitectónico se inundaba de luz por todas partes, ahora la orientación solar pierde sentido en tanto que se trata de abstraer a la claridad interior de las propiedades formales de la luz solar. En este sentido, cabe señalar que la arquitectura del llamado “Estilo Internacional” no se caracteriza, precisamente, por su sensibilidad hacia las particularidades de la luz solar que ilumina el enclave geográfico donde se construye; cualquier eventual ajuste proyectual relacionado con la luz solar tiene como objetivo, la mayoría de las veces, la consecución de esta moderna claridad interior.

Esto lo ilustra muy bien el caso de la Neue Nationalgalerie, cuyo porche perimetral es, en realidad, la herencia formal de la necesidad de proteger de la incidencia solar directa la fachada acristalada del proyecto para las oficinas de Bacardí en Santiago de Cuba. La intensidad de la luz solar de esta latitud tropical hace especialmente desaconsejable la alineación perimetral de los grandes paños de vidrios que caracterizaban sus propuestas anteriores -como en la *casa cincuenta por cincuenta* de 1950-, haciendo necesaria su protección solar. Mies advierte en el porche el elemento de protección solar más eficaz en una latitud donde la luz del Sol alcanza inclinaciones notables ¹¹⁶ (90º de inclinación en verano, 70º durante los equinoccios y 45º en invierno), aunque lo incorpora a su proyecto sin atender a

115. “Este “aire” contenido en ámbitos de esta naturaleza adquiere muy diferentes modos de percibirse en función de algunos parámetros, como (...) el modo de plantearse la luz. De tal modo que en unos casos el espacio resulta opresor, mientras que en otros parece liviano. El vestíbulo de la Galería Nacional de Berlín de Mies van der Rohe está conformado por el plano del suelo y por la cuadrícula de acero negro que conforma el techo. Apenas tiene límites en el perímetro. El vidrio propicia que, desde el interior, nuestra mirada se prolongue hasta el infinito. Hecho que se ve incrementado por la circunstancia de que el gran cuadrado negro, que parece gravitar sobre nosotros, y el suelo atraviesan la línea del vidrio prolongándose con nuestra mirada. La luz natural, a excepción de la primera o la última hora del día, en la que el sol puede entrar, es siempre igual”. *ARNUNCIOPASTOR, Juan Carlos: Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, pp. 93-94*

116. “Inicialmente Mies conceptualizó el edificio Bacardí como una especie de Crown Hall en acero. Pero debido al húmedo clima tropical de Cuba pronto cambió de opinión y cambió el diseño para emplear piedra y hormigón. Por extraño que parezca, algunas de las más importantes ideas en el diseño del edificio derivan del Hotel Hilton en Cuba, donde Mies y su director de oficina, por aquél momento Gene R. Summers, se alojaban. De acuerdo con Summers, Mies se fijó en la terraza jardín del hotel, que estaba soportada por tres postes de madera. Mies determinó que “el muro del vestíbulo del hotel ... estaba dispuesto unos quince pies (aproximadamente 4.6 metros) detrás de los postes”, y dijo “podríamos hacer lo mismo. Deberíamos crear una galería debajo de la cubierta exterior y fuera del muro de cristal” . Mies plasmó su idea en unas cuantas servilletas, ahora legendarias (preservadas en el Museum of Modern Art). En ellas se representan los elementos clave del diseño de Bacardí, visible hoy en la Neue Nationalgalerie. Por ejemplo, la gran cubierta de acero de la Neue Nationalgalerie se proyecta dos paneles de techo más allá del muro de cristal en la terraza, haciendo posible así exactamente la galería cubierta que Mies había concebido entonces. (...) Igual que en el Pabellón [de Barcelona], el proyecto de Bacardí fue concebido como un continuum espacial abierto hacia el exterior, una idea enfatizada por la proyección de la cubierta, concebida también como protección contra el soleado clima cubano”. *JÁGER, Joachim: Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, pp. 41-42*



F.57. Imagen reflejada en el cristal. La sombra proyectada por la cubierta y la presencia de las cortinas potencian el reflejo. www.flickr.com



F.58. Reflejo del entorno urbano, el voladizo estructural y los soportes en el cerramiento acristalado. www.germanhistorydocs.ghi-dc.org

la orientación concreta de cada una de las fachadas. La voluntad de disponer grandes superficies de vidrio como cerramiento de fachada, a pesar de las características solares del lugar y sin plantearse siquiera la posibilidad de concebir una fachada más cerrada o con huecos de menor dimensión, da muestra del interés del arquitecto por garantizar la transitividad lumínica del cerramiento.

A pesar de que el Sol berlinés es mucho más horizontal (62º y 14º de inclinación en verano y en invierno respectivamente) y su luz mucho menos intensa y frecuente, Mies repite el mismo porche perimetral en la Neue Nationalgalerie. Por medio de la opacidad de la cubierta plana se neutraliza el carácter particular de la luz solar propia de cada lugar concreto a fin de convertirla, una vez ya en el interior del espacio, en una luz abstracta de carácter nórdico. Este carácter nórdico-abstracto es a la luz arquitectónica moderna lo que la velocidad de la luz en el vacío es a la teoría de la relatividad especial: una constante definitoria y definitiva de carácter universal.

Tal como se ha señalado anteriormente, la transparencia del vidrio que conforma el cerramiento no es total. En determinadas ocasiones, cuando la posición relativa entre el ángulo de incidencia de la luz sobre el plano acristalado y la línea de visión del observador lo permite, es posible vislumbrar en la superficie vítrea algún destello, brillo, reflejo o sombra capaz de delatar su presencia ¹¹⁷. Cuando el espectador se encuentra en el interior del recinto acristalado estos fenómenos luminosos apenas tienen trascendencia. Sin embargo, cuando el espectador se encuentra fuera y la luz no incide directamente sobre el vidrio, el reflejo del contexto urbano y el cielo adquiere tal fuerza que se pierde gran parte de la transparencia y el recinto acristalado adquiere la apariencia de un cuerpo etéreo que toma prestada la imagen que le rodea ¹¹⁸. Cuando esto ocurre, en el vidrio se imprime también la imagen de los pilares y el voladizo de la cubierta que, al duplicarse, parecen proyectarse hacia el interior creando una imagen ciertamente inverosímil.

Tal y como se ha expuesto anteriormente, en la física einsteiniana la luz “gravita”, pero no en el sentido clásico del término. La trayectoria

117. Sobre los reflejos del vidrio, ver apartado III-4.3.1. La luz vitrificada como cerramiento espacial.

118. La presencia de las cortinas potencia aún más si cabe estos reflejos.



F.59. Transición continua de la claridad interior a la luz difusa exterior.

Presencia de brillo luminoso en el suelo de granito pulido y en el techo de acero pintado.

JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe*. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011, p. 8

rectilínea de la luz se curva por la presencia de una gran masa, pero esta curvatura no se debe a la atracción -en sentido newtoniano- que ejerce esta masa sobre la luz, por definición carente de masa en la física einsteiniana. La explicación de esta desviación de la trayectoria reside en la curvatura que experimenta el espacio-tiempo por acción de esta masa: el rayo luminoso sigue con su trayectoria “rectilínea” pero, al atravesar una zona espacio-temporal curvada por acción de la gravedad, describe un movimiento curvo. La constatación visual de esta desviación de la luz sirvió en 1919 para dar validez empírica a la curvatura gravitatoria del espacio-tiempo predicha en la Teoría de la Relatividad General formulada tres años antes ¹¹⁹.

En la arquitectura, como en la física, el movimiento de la luz depende también de la estructura gravitatoria del espacio en su sentido moderno. En determinados momentos, a primera y última hora del día y en determinados momentos del año, la luz solar berlínesa es tan horizontal que atraviesa todo el espacio acristalado de la Neue Nationalgalerie sin proyectar sobre el pavimento más sombra que la de los pilares y las carpinterías. Por medio de su proyección horizontal, indiferente a la clásica verticalidad del peso y la caída, manifiesta la luz su condición ingravida ¹²⁰.

Situación distinta se produce en aquellos momentos en que el rayo solar adquiere una componente más vertical. La luz incide entonces directamente contra el pavimento y es reflejado hacia arriba. El carácter de esta reflexión depende del acabado superficial del granito que conforma el pavimento: la superficie rugosa de la piedra exterior hace que una cierta cantidad de luz se refleje en direcciones erráticas, mientras que el acabado pulido del pavimento interior garantiza que toda la luz se refleje en una única dirección.

Es por ello que, desde el interior del recinto acristalado, puede percibirse con claridad la diferente reacción de la luz reflejada. Mientras que en el pavimento exterior apenas se aprecia reflejo alguno, en la superficie pulida del interior se refleja la claridad del cielo y, también, la imagen invertida de la estructura y el contexto urbano

119. Ver apartado II-4.2.2. La gravitación de la luz en la relatividad general.

120. Sobre esta cuestión, a propósito del Stonehenge en la primera concepción espacial, ver apartado III-2.4. Gravedad y luz como realidades contrapuestas.

que rodea al museo. A pesar de su apariencia difusa y etérea, esta imagen invertida y duplicada del plano de cubierta y los elementos de soporte contribuye de manera especial a la configuración dual del espacio anteriormente referida ¹²¹. La simetría horizontal de los elementos estructurales neutraliza en apariencia el natural sentido descendente de la gravedad, que virtualmente parece desaparecer en el plano del suelo. En lo conceptual y en lo aparente, la distinción entre arriba y abajo deja de ser una cuestión objetiva del espacio construido para adscribirse únicamente a la percepción corporal del campo gravitatorio terrestre por parte del espectador. El peso de la gravedad queda visualmente neutralizado por su propio reflejo, mientras que la claridad del cielo en el suelo dota al espacio de una luminosa levedad.

121. Ver apartado III-5.3.2. *La planeidad como abstracción de la forma de cubrición.*

122. Otros autores han identificado la misma estrategia en el Pabellón de Barcelona:

“Robin Evans observará que estos efectos vertiginosos están enfatizados por el reflejo vertical del volumen alrededor de un horizonte que coincide con la altura del ojo y también con la junta horizontal central del plano de ónice, lo cual sugiere una inversión potencial entresuelo y techo acentuada paradójicamente por las diferencias de acabado. Como subraya Evans, el suelo refleja la luz y el techo la recibe, por lo que las diferencias perceptivas de un tono plano serían mayores en un mismo material. Mies utilizó “asimetrías materiales para crear simetría óptica, haciendo rebotar la luz natural para hacer que el techo fuera más parecido al cielo y también para crear un ambiente más abierto”. *FRAMPTON, Kenneth: Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal, 1999, p. 174. Frampton se refiere a Robin Evans, “Mies van der Rohe’s Paradoxical Symetries”, AA Files, núm. 19 (primavera de 1900), p. 113.*

“Es necesario reseñar que cuando Mies van der Rohe trabaja en una ciudad mediterránea como lo es Barcelona incorpora una lámina de agua y el blanco travertino como recursos materiales que invierten la orientación de la luz haciendo del plano de tierra, en su reflexión, foco de la misma, de tal manera que ilumina el techo equilibrándolo en su grado de penumbra (y color) con el suelo”. *APARICIO GUIZADO, Jesús María: Construir con la razón y los sentidos. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 82*

La luz reflejada en el suelo invierte su trayectoria descendente y se eleva en el espacio hasta incidir directamente contra la cara inferior del techo ¹²². Al oponerse más o menos perpendicularmente al rayo luminoso, la luz se hace especialmente visible a través del brillo que se produce en el ala inferior de los perfiles de color negro que conforman la estructura de la cubierta. En cambio, la dificultad de la luz de proyectarse contra el alma de los perfiles y la parte superior del cofre estructural hace que éstas queden sumidas en la oscuridad. Esta diferente reacción frente a la luz da lugar a un juego de claroscuros por medio del cual la luz marca la retícula estructural y la sombra oculta la profundidad de la estructura ¹²³.

Este juego de brillos, lógicamente más intensos en el perímetro que en el centro, contribuye de manera especial a la continuidad lumínica del espacio. La transición entre la luz interior y la exterior no se produce ya en la línea que separa la luz de la sombra, sino que adopta la forma de una suave degradación entre la luz exterior y la claridad interior.

La combinación de estas múltiples reflexiones hace que en un mismo espacio coincidan luces con distintas direcciones en planta (la luz difusa horizontal que atraviesa el perímetro de cristal por todas direcciones) y en sección (la luz que atraviesa el espacio sin incidir sobre el suelo, la que se proyecta contra el pavimento, la que se refleja en él y la

que después de rebotar en el techo vuelve al suelo). Como resultado de esta múltiple combinación de luces, de tan variada dirección y de parecida intensidad, las sombras propias y proyectadas por los objetos se anulan y neutralizan. El espacio moderno no encuentra su razón de ser en la sombra sino en la luz, en una suave luz sin dirección que, anulando toda sombra, alude a una *clara* levedad¹²⁴.

Con independencia de las características particulares de la luz solar de cada lugar, la obra moderna despliega una serie de mecanismos proyectuales destinados a manipular la luz exterior a fin de convertirla en una luz interior de marcado carácter nórdico. Esta *luz abstracta* en forma de claridad difusa contribuye de manera decisiva a configurar un espacio que participa al mismo tiempo del interior y del exterior, donde la gravedad no desaparece sino que, de acuerdo con los preceptos de la física moderna, se convierte en una *gravedad leve*.

III.5.5. LA ABSTRACCIÓN DE LA GRAVEDAD Y DE LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO CONTINUO

Tras un siglo de incertidumbre en la representación física de la naturaleza de la gravedad y de la luz, a principios del siglo XX Albert Einstein encabeza una importante revolución científica que da lugar a un nuevo modo de conceptualizar el espacio, la gravedad y la luz.

Por vez primera en la historia, el trasvase de este nuevo conocimiento científico al ámbito de la arquitectura no se produce como consecuencia lógica de la evolución en el tiempo del conjunto del conocimiento humano, sino que resulta de la aprehensión consciente de dicho conocimiento. Sin embargo, esta transmisión de conocimiento no se produce de manera directa desde el ámbito de la física al de la arquitectura, sino que se articula a través de los movimientos artísticos de vanguardia de principios de siglo. Las indagaciones conceptuales y artísticas de estos movimientos, especialmente interesados en incorporar al arte las consecuencias de las nuevas teorías físicas, acaban teniendo una incidencia importantísima en la interacción arquitectónica del espacio, la gravedad y la luz a través de la estructura.

123. "En su papel de soporte, la columna y su rótula reinterpretan la tradición tectónica de Occidente, mientras que la lectura del tejado en forma de huevera, pintado de gris oscuro y bordeado con negro mate, depende del juego de planos, situados a diferentes profundidades espaciales, de tal modo que los rebordes más bajos en intersección del armazón espacial parecen flotar como una retícula algo más ligera bajo el sofito interno y negro del tejado. En este caso, la estética negro sobre negro de Mies, que recuerda al minimalismo de Ad Reinhardt, se hace legible a través de la luz reflejada. Mediante las variaciones de luminosidad, Mies alude a la tradición vanguardista a través de la profundidad incierta del armazón espacial. De hecho, en esta última obra pasamos de una solución tectónica extremadamente hábil a la afirmación intangible y casi mística de lo sublime en forma de un plano universal suspendido en el espacio". FRAMPTON, Kenneth: Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal, 1999, p. 192

124. No hay que confundir la ingravidez asociada a la inversión de la luz y la sombra descrita a propósito del Pantheon de Roma (apartado III-3.5.2. La ingravidez de la luz reflejada) con el fenómeno descrito en el espacio moderno. En la segunda concepción del espacio la inversión de la luz alude a la ausencia de gravedad, mientras que en la cuarta concepción espacial la multidireccionalidad de la luz anula la sombra y alude así a la levedad de la gravedad einsteiniana.

Es innegable que la noción física de espacio-tiempo desarrollada por Minkowski y Einstein se convierte en un elemento fundamental en las reflexiones europeas de principios de siglo sobre la espacialidad del arte en general y de la arquitectura en particular. En plena analogía con el continuo espacio-temporal, el espacio arquitectónico moderno se configura como una entidad abierta y continua. En términos puramente espaciales, esta nueva concepción se abre al exterior sin perder su carácter interior, combinando la transitividad y la apertura propias del siglo XIX con la dicotomía espacial entre interior y exterior que caracteriza a las etapas anteriores: interior y exterior ni se segregan ni se funden sino que, manteniendo su propia entidad, se vinculan entre sí de un modo continuo.

Formada únicamente por un techo y su soporte, la estructura reticular en esqueleto se convierte en el sistema estructural capaz de garantizar la continuidad horizontal de un espacio arquitectónico que se define únicamente por dos planos, el del suelo y el del techo. El paralelismo de ambos planos dota al espacio de una homogeneidad que propicia la continuidad entre interior y exterior. La isotropía y la homogeneidad que brindan los dos planos horizontales dispuestos a una cierta distancia permite la libre disposición de los planos verticales que, sin función gravitatoria alguna, organizan y compartimentan el espacio.

La presencia de los elementos verticales se minimiza al máximo a fin de no obstaculizar esta continuidad. El muro portante opaco se transforma en cerramiento transparente y los soportes puntuales se minimizan en número y sección. El límite entre interior y exterior deja de ser algo definido para convertirse en un espacio intermedio que, sin pertenecer propiamente al interior o al exterior, participa de ambos al mismo tiempo a fin de cerrar sin confinar, de delimitar sin limitar.

Durante la mayor parte de la historia, la arquitectura se identificó con la ineludible necesidad de disponer adecuadamente las masas más o menos pesantes que la conforman, siendo el espacio la consecuencia lógica de tal operación material. A pesar de sus enormes diferencias, desde Aristóteles hasta Newton la gravedad se interpretó como una ley física que regía la relación entre las masas, describiendo su posición

y movimiento a través de un espacio que no jugaba ningún papel en dicha interacción física. Pero con su teoría de la Relatividad General, Einstein describe la gravedad como un fenómeno que rige la relación de la masa de la materia con la estructura del espacio, en la que la pesantez se sustituye por la levedad y la caída por la flotación.

La arquitectura incorpora esta leve gravitación a una forma estructural que, por medio de la abstracción, se despoja de cualquier signo o elemento tectónico que pueda hacer referencia a la gravedad; alude así a una levedad que ya no necesita oponerse a la pesantez por medio de la ligereza. La levedad deviene en fin, la abstracción en instrumento y la atectónica en consecuencia.

La planeidad de la cubrición moderna responde a la voluntad de hacer desaparecer a la gravedad de la forma estructural pues, durante milenio y medio, la física había asociado el fenómeno gravitatorio con la curvatura y la arquitectura había encontrado en la curvatura la solución al problema gravitatorio de la cubrición espacial. La tecnología estructural y los nuevos métodos de cálculo hacen posible la cubrición horizontal de grandes espacios sin aparente esfuerzo, lo que, en conjunción con la ausencia de elementos tectónicos que revelen su naturaleza estructural, dota a la cubierta plana de una apariencia leve.

La horizontalidad de los dos planos que delimitan el espacio elimina, en lo conceptual, la importancia de la vertical gravitatoria. Al mismo tiempo, la equivalencia formal y figurativa entre suelo y techo termina con la clásica dicotomía gravitatoria entre lo que se mantiene arriba y lo que cae hacia abajo. La expresa ocultación de la materia estructural por medio de un revestimiento superficial abstrae al elemento de cubrición de su condición material, liberándolo en apariencia de la acción de la gravedad; la masa deja paso al volumen y, éste, al plano, una entidad abstracta sin grosor y, por tanto, sin peso.

El soporte moderno se caracteriza por su capacidad de dar respuesta al fenómeno gravitatorio empleando una sección resistente mínima. Gracias a su abstracción formal y material, oculta su función portante hasta negar, incluso, el punto de apoyo o contacto con la cubierta.

La reflexión teórica de Albert Einstein sobre la naturaleza dual -a la vez cuántica y electromagnética- de la luz, una entidad física cuya velocidad en el vacío deviene en constante universal, difícilmente puede encuadrarse en la experiencia sensible cotidiana del fenómeno luminoso. Esta circunstancia no escapa a las vanguardias artísticas, que anteponen la conceptualización de esta entidad física universal a su cotidiana experiencia sensible. La arquitectura moderna, cuyo origen geográfico se localiza en el norte de Europa, encuentra en la luz nórdica, una luz suave, difusa, indirecta, adireccional, constante, densa, homogénea... la luz natural que representa el ideal abstracto de la luz vanguardista.

Desde un punto de vista puramente lumínico, esta claridad sin dirección se convierte en el principal fin de la arquitectura moderna. La misión del plano horizontal de la cubierta ya no es construir una sombra, sino abstraer a la luz solar exterior de sus propiedades físico-geométricas más elementales, a saber, su natural dirección vertical y su capacidad de generar sombra. Esta abstracción lumínica se produce de manera gradual a través de un ámbito espacial a modo de umbral que, sin pertenecer ni al interior ni al exterior, participa de ambos al mismo tiempo.

Sumido en una luz sin sombra ni dirección, el espacio mismo y los objetos en él contenidos adquieren esa levedad representada en las obras pictóricas vanguardistas. El espacio moderno no encuentra su razón de ser en la sombra sino en la luz, en una suave luz sin dirección que, anulando toda sombra, alude a una clara levedad.

La Neue Nationalgalerie de Berlín, el último proyecto construido por Mies van der Rohe, se erige en paradigma de la abstracción que caracteriza a la arquitectura moderna. Con la única ayuda de dos planos horizontales se construye un espacio interior en continuidad horizontal con el exterior, en el que la gravedad se abstrae de la pesantez y la caída en favor de la levedad y la flotación, y la luz solar se convierte en una luminosa claridad abstraída de su dirección natural y su capacidad de generar sombra.

CONCLUSIONES

III.6.1. La estructuración gravitatoria del espacio

III.6.1.1. El peso de la primera concepción espacial

III.6.1.2. La curvatura gravitatoria de la segunda concepción espacial

III.6.1.3. La ligereza de la tercera concepción espacial

III.6.1.4. La levedad de la cuarta concepción espacial

III.6.1.5. La gravedad en la construcción del espacio

III.6.2. La estructuración lumínica del espacio

III.6.2.1. La sombra exterior de la primera concepción espacial

III.6.2.2. La luz interior de la segunda concepción espacial

III.6.2.3. La luminosidad ligera de la tercera concepción espacial

III.6.2.4. La abstracción lumínica de la cuarta concepción espacial

III.6.2.5. La luz en la configuración del espacio

III.6.3. Hacia la transparencia estructural

III.6. CONCLUSIONES

En esta tercera y última parte de la presente investigación se ha ahondado en aquellos mecanismos proyectuales que, a lo largo de la historia, han permitido manipular y representar conscientemente la interacción física entre la gravedad y la luz con la finalidad de estructurar el espacio arquitectónico.

Este análisis se ha fundamentado en una previa interpretación de la teoría de las concepciones espaciales desarrollada por Sigfried Giedion, según la cual se han ido sucediendo distintas maneras de comprender el espacio arquitectónico a lo largo de la historia. Concretamente, en la presente investigación se han señalado cuatro modos de concebir el espacio: la arquitectura como espacio exterior, la arquitectura como espacio interior, la arquitectura como espacio interior exteriorizado y la arquitectura como espacio interior en continuidad con el exterior.

La primera concepción espacial se desarrolla desde la prehistoria hasta la Grecia clásica; la arquitectura de este periodo se conforma en base a la idea de *recinto*, un espacio exterior en tanto que abierto cenitalmente. La segunda concepción espacial se desarrolla desde la Roma imperial hasta el siglo XVIII; la arquitectura de este periodo se fundamenta en la idea de *aula*, un espacio de naturaleza introvertida que, aislándose lumínica y visualmente de su entorno, adquiere un carácter marcadamente interior. La tercera concepción espacial se desarrolla durante el siglo XIX; por medio de la transparencia de sus límites el *aula* se abre a su entorno, posibilitando que el interior y el exterior se fundan y confundan en una misma entidad espacial. La cuarta concepción espacial se desarrolla durante el siglo XX y se basa en la idea de *porche*, una entidad espacial que podría definirse como un interior en continuidad con el exterior.

Como consecuencia del análisis aquí desarrollado, se advierte que el nacimiento y posterior desarrollo de una nueva concepción espacial arquitectónica requiere de la conjunción de tres factores fundamentales: la necesidad de satisfacer nuevas demandas de

orden espacial, la posibilidad de desarrollar nuevas posibilidades estructurales y constructivas, y la capacidad de comprender la naturaleza física del mundo de un modo totalmente nuevo. La aparición de nuevas necesidades espaciales coincide, normalmente, con la capacidad técnico-estructural de satisfacer esa voluntad espacial. A su vez, el desarrollo de la tecnología estructural que permite disponer en equilibrio estático la materia que conforma el espacio arquitectónico es consecuencia de los avances de la física aplicada. Y la física aplicada sigue los preceptos de las indagaciones teóricas previas. Se constata, así, que es en el desarrollo de la física teórica en general y de la representación científica de la gravedad y de la luz en particular, donde se encuentra el germen de una nueva manera de concebir el espacio arquitectónico.

En la presente investigación se han analizado aquellas estrategias proyectuales que, a lo largo de la historia, han permitido manipular los fenómenos de la gravedad y de la luz a fin de estructurar el espacio arquitectónico. Se han reunido, además, una serie de indicios que señalan una íntima correspondencia entre la evolución histórica de las teorías físicas sobre la gravedad y la luz y la noción de espacio en la arquitectura. A fin de asegurar una visión global y completa del estudio desarrollado, conviene repasar los principales atributos arquitectónicos y científicos de ambos fenómenos.

III.6.1. La estructuración gravitatoria el espacio

El análisis desarrollado en el presente apartado pone en evidencia la correlación que existe entre las distintas maneras de conceptualizar la naturaleza del hecho gravitatorio que han ido sucediéndose a lo largo de la historia, y el modo de ordenar arquitectónicamente los efectos de la gravedad sobre la materia estructural que conforma el espacio arquitectónico.

El conocimiento científico del hecho gravitatorio no ha evolucionado de manera continua, sino sincopada. A lo largo de la historia se han sucedido periodos perfectamente definidos en el tiempo en los que

se han alternado momentos de hegemonía de grandes formulaciones teóricas y etapas de casi total vacío conceptual. Una tras otra, las grandes teorías físicas sobre la gravedad han sido sistemáticamente invalidadas por la observación de nuevos fenómenos o por la formulación de nuevas concepciones teóricas que pocos puntos en común han tenido con las teorías anteriores.

La arquitectura ha manifestado siempre esta circunstancia en el desarrollo de las tipologías estructurales que han hecho posible la construcción del espacio. Es en el elemento de cubrición espacial, precisamente allí, donde se plantea el mayor reto gravitatorio de la arquitectura, donde puede advertirse con mayor claridad la influencia de la comprensión física de la gravedad, no sólo en lo que respecta a la representación arquitectónica de los principales atributos gravitatorio-estructurales de la forma construida sino, sobre todo, en las consecuencias espaciales de la disposición de la materia de acuerdo con las leyes de la gravedad.

III.6.1.1. El peso de la primera concepción espacial

La arquitectura de la primera concepción espacial se desarrolla desde la pura intuición, pues la física como forma objetiva del conocimiento humano no aparece hasta prácticamente el final de esta etapa. Igual que el resto de sus contemporáneos, Aristóteles -el filósofo que tuvo mayor influencia posteriormente- no identifica la gravedad como una ley natural, sino que la confunde con sus manifestaciones más elementales, los fenómenos de la caída y el peso, dos estados distintos del movimiento natural de la materia grave, la primera en acto y el segundo en potencia. El fenómeno de la caída se explica como el movimiento natural de los cuerpos pesados hacia su lugar propio, el centro de la tierra, siguiendo siempre la línea que une el cuerpo con el centro del mundo, una dirección que identificamos con la noción de vertical. El fenómeno del peso aparece precisamente cuando esta tendencia natural a la caída de los cuerpos pesados se ve impedida por algún motivo. Señala Aristóteles que este movimiento natural sólo se produce en

la dirección vertical, siendo el horizontal originado por la acción de algún agente externo.

Desde el más tosco trilito prehistórico hasta el más refinado pórtico griego, aún con anterioridad a cualquier formulación física teórica, la arquitectura de esta primera concepción espacial expresa la contraposición entre la verticalidad de la gravedad y la horizontalidad de la cubrición. El soporte reconoce la naturaleza vertical del fenómeno gravitatorio al mantenerse erguido en equilibrio estático. En cambio, la voluntad de cubrir el espacio hace necesaria la disposición de una cierta cantidad de materia sobre el propio espacio, lo que obliga a desplazar horizontalmente el peso de la materia hasta los apoyos, siguiendo una dirección perpendicular a la dirección natural de la gravedad. Esta misión recae en la estructura, concebida como un elemento que debe resistir y soportar el peso de la materia a fin de impedir su caída. La satisfacción de esta necesidad estructural se resuelve por medio de la sección del elemento de cubrición, que debe ser capaz de resistir a los esfuerzos de flexión provocados por su propio peso. Sin embargo, esto deviene particularmente difícil cuando el material empleado tiene una gran peso propio, no posee una adecuada resistencia a flexión y necesita constituirse como un único elemento para poder trabajar a flexión: el dintel pétreo empleado en la arquitectura monumental de esta primera concepción arquitectónica reúne todas estas dificultades.

Así pues, aunque posible, esta operación espacial presenta una enorme dificultad de orden estructural. Un ejemplo paradigmático lo constituyen las salas hipóstilas, espacios cubiertos y soportados por una retícula de columnas. La separación entre estos soportes viene limitada por la dimensión del dintel, que en tanto que debe soportar los esfuerzos a flexión por medio de su cohesión interna, debe resolverse en una sola pieza. Los soportes, verdaderamente robustos a fin de garantizar su estabilidad frente a los empujes laterales, deben disponerse muy próximos entre sí. El espacio libre cubierto que se consigue liberar entre los soportes es tan mínimo, que el esfuerzo estructural no parece proporcionado al resultado espacial obtenido. Quizá la preferencia de esta primera concepción espacial por el

espacio exterior, un espacio por definición descubierto, se deba a la dificultad estructural que plantea la cubrición del espacio.

El sentido original de la estructura adintelada de esta primera concepción espacial no reside en la cubrición del espacio interior, sino en la formalización de los límites que configuran el espacio exterior. Es en el pórtico, el peristilo, la stoa o el soportal, donde la unidad arquitrabada manifiesta su primigenio carácter espacial, su mayor transitividad, cualidad, complejidad y profundidad frente al muro simple, en su misión de delimitar un recinto.

III.6.1.2. La curvatura gravitatoria de la segunda concepción espacial

La segunda concepción espacial nace durante la época de hegemonía romana. Los romanos fueron los primeros en distinguir la ley de la gravedad del fenómeno del peso, la *gravitas* del *pondus*, identificando la primera como la causa del segundo, un hecho de notable importancia en tanto que las culturas anteriores, incluso las más desarrolladas, no fueron capaces de realizar esta distinción conceptual fundamental. Aunque durante dos siglos los romanos se limitaron a reproducir el conocimiento físico elaborado por los filósofos griegos, durante la primera época imperial resurgió el interés por los temas físicos. Como consecuencia de ello, algunos filósofos romanos pusieron en cuestión determinadas teorías helenas, como por ejemplo la explicación aristotélica de la naturaleza y el movimiento de los cuerpos celestes. Interesa aquí la obra de Plutarco, quien, contraviniendo a la física aristotélica, propone que la causa de la esfericidad y el movimiento circular de los planetas debe ser la misma que la que impele a los cuerpos pesados a caer hacia el suelo. Así, mientras que para Aristóteles los movimientos circulares de los cuerpos celestes no tienen ninguna relación con las leyes físicas que rigen el movimiento natural -siempre vertical y rectilíneo- de los cuerpos de acuerdo con su grado de pesantez o ligereza, Plutarco incluye a la órbita circular y la esfericidad planetaria en lo que milenio y medio se identificará plenamente con la noción de gravedad. Sin embargo, el declive de la hegemonía romana frena

el desarrollo del conocimiento científico y, durante milenio y medio, no se produce apenas ningún avance. Ya en el siglo XVII, Galileo descubre la trayectoria parabólica de los proyectiles terrestres, Kepler describe la órbita elíptica de los planetas y Newton demuestra, en su Ley de Gravitación Universal, que el origen y la causa de estos movimientos curvos tanto terrestres como celestes es la gravedad. Más adelante, a principios del siglo XX, nace la conciencia de que la gravedad es la responsable de la curvatura tanto de la materia como del propio espacio, tal como describe Einstein en su teoría de la relatividad general.

La intuición romana de la curva inherente a la gravedad induce a considerar la conveniencia de introducir una cierta curvatura en la cubrición estructural del espacio. A tal efecto, cabe señalar que la gran cúpula del Pantheon de Adriano, la mayor jamás construida con hormigón sin armar -de más de 43 metros de diámetro interior- empieza a construirse en el año 118 d.C., aproximadamente dos décadas después de que Plutarco pusiera en crisis la teoría aristotélica y sentase las bases de un nuevo modo de entender la gravedad. Parece lícito, por tanto, advertir en esta coincidencia temporal una cierta relación causal entre la utilización de las formas estructurales curvas que hacen posible el espacio interior y el nacimiento de nueva intuición sobre la naturaleza física de la gravedad.

Durante la primera concepción espacial se desarrollan dos estrategias destinadas a minimizar los efectos de la gravedad sobre la cubrición del espacio, como emplear materiales menos pesados e introducir una cierta componente vertical en la geometría de la cubierta. Nace así la cubierta inclinada de madera, que permite una mayor separación de los soportes estructurales. Sin embargo esta doble estrategia se descubre insuficiente a la luz de una nueva manera de comprender la gravedad. La estructura arquitecónica, una estructura que se esfuerza por resistir los efectos de la gravedad, deja paso a las formas estructurales curvas como el arco de descarga, la bóveda o la cúpula, en las que la traslación horizontal de las cargas hacia los soportes verticales se produce de un modo progresivo, describiendo una directriz curva. No se trata ya de luchar contra

la gravedad ni de oponer resistencia a sus efectos sino, más bien, de encauzarla asumiendo la cualidad masiva de la arquitectura, la condición ineludible del peso y la amenaza eterna de la caída como cuestiones inherentes a la construcción del espacio. La tendencia a la caída de la materia que conforma la cubrición comprime la masa y fija su posición, quedando garantizada su estabilidad por geometría y cohesión interna. Por su parte, la concentración de peso en la parte inferior de la estructura contribuye a contrarrestar el empuje horizontal que la cubrición curva transmite al soporte.

En la posibilidad de cubrir grandes espacios con cierta solvencia y la necesidad de disponer de masivos soportes a fin de contrarrestar los empujes laterales reside la preferencia de esta segunda concepción espacial por el espacio interior, por definición cerrado y aislado de su entorno. La masa no sólo porta, cierra y cubre el espacio, sino que lo delimita. Antaño considerados como una amenaza para el hecho constructivo, el peso y la caída devienen ahora en garantía de estabilidad estática de las formas estructurales abovedadas de cubrición espacial.

III.6.1.3. La ligereza de la tercera concepción espacial

La tercera concepción del espacio se desarrolla al mismo tiempo que se cuestiona la validez de la física newtoniana. En 1831 Faraday describe el fenómeno electromagnético sin recurrir a la noción de fuerza a distancia de Newton, lo que evidencia la artificiosidad de un concepto que había sido puesto en duda ya a finales del siglo XVII. De hecho, el propio Newton reconoce en las revisiones posteriores a su primera edición de los *Principia* la necesidad de fundamentar su teoría sobre la gravitación en algo más sólido que unas misteriosas fuerzas a distancia, y construye una explicación complementaria en la que explica el origen de dichas fuerzas en la existencia del éter. Pero en 1887 Michelson y Morley publican los resultados de unos experimentos sobre la luz en los que se concluye que el éter no existe, hecho que invalida los fundamentos de la gravitación universal de Newton sin que se vislumbre teoría alternativa alguna.

Esta crisis teórica se traslada también al ámbito de la arquitectura, que pone en duda los principales atributos gravitatorios que hasta entonces habían caracterizado a la estructura: la necesidad del peso y la condición del apoyo.

El siglo XIX es sin duda el siglo del hierro. Aunque era conocido desde antiguo, su industrialización le otorga un nuevo rol en la construcción. Posee la capacidad de concentrar grandes esfuerzos en secciones muy reducidas, lográndose con ello una respuesta mecánica máxima con un mínimo de materia y, además, tiene la particularidad de presentar un óptimo comportamiento mecánico tanto a compresión como a tracción. Es por ello que, lejos de optimizar las históricas formas estructurales comprimidas, a lo largo del siglo se busca una tectónica propia y apropiada a la capacidad mecánica del hierro, que haga de la tracción la nueva protagonista del fenómeno tensional.

El hallazgo de esta nueva forma estructural se vehicula a través de un nuevo modo de entender y representar el fenómeno resistente. Aprovechando la noción matemática de vector desarrollada en el siglo XVII, el peso propio, las sobrecargas y las reacciones de la estructura se conceptualizan como fuerzas vectoriales que se transmiten a través de los elementos estructurales. Trascendiendo su condición abstracta, el cálculo se adentra en el ámbito de la forma al identificar cada uno de los vectores que actúan sobre la estructura con una barra metálica. Se abandona la idea de estructura como un conjunto de elementos masivos, pesantes y de una cierta dimensión que soportan a compresión la acción de la gravedad por medio de la sección y la forma, para dar paso a una nueva concepción estructural basada en la acción solidaria de una gran cantidad de barras o elementos cortos, rígidos, rectos y de mínima sección, en los que la tracción deviene un esfuerzo fundamental. La masa deja paso entonces a la línea, lo que se traduce en una disminución real y aparente al mismo tiempo del peso de la estructura: es posible construir cada vez más espacio con menos gravedad sin apenas esfuerzo.

La introducción de articulaciones y contactos tangenciales en lugar

del simple apoyo horizontal altera la clásica relación tectónica entre carga y soporte, permitiendo que estructuras enormes aparenten descansar delicadamente sobre el suelo o simulen mantenerse ingravidamente suspendidas en el aire. En tanto que la ponderación visual de la pesantez de cualquier cubrición estructural se establece inconscientemente en relación a la robustez del soporte, presuponiendo su sección proporcional a la carga y considerando la masividad de su parte inferior como una garantía de estabilidad, la minimización del soporte decimonónico no hace más que contribuir al aligeramiento aparente de la estructura en su conjunto.

El encauzamiento de la gravedad por medio de líneas de fuerza en celosía hace que la estructura deje de ser un límite infranqueable de contención espacial. El espacio ya no se encuentra encerrado en el interior de la masa sino que, en total transitividad visual y lumínica con el exterior, se abre y se expande más allá de los delgados elementos que apenas lo definen.

III.6.1.4. La levedad de la cuarta concepción espacial

Tras un siglo de incertidumbre en la representación física de la naturaleza de la gravedad, a principios del siglo XX Albert Einstein propone un nuevo y revolucionario modo de conceptualizar el espacio y la gravedad. Gracias a las vanguardias artísticas europeas de principios de siglo, por vez primera en la historia el trasvase de este nuevo conocimiento científico al ámbito de la arquitectura se produce de un modo consciente, dando lugar a la cuarta concepción del espacio arquitectónico.

La revolucionaria noción física de espacio-tiempo desarrollada por Minkowski y Einstein influye sobremanera en el desarrollo de la espacialidad arquitectónica moderna. El espacio moderno se abre al exterior sin perder su carácter interior, combinando la transitividad y la apertura propias del siglo XIX con la dicotomía espacial entre interior y exterior que caracteriza a las etapas anteriores. El interior y el exterior ni se segregan ni se funden sino que, manteniendo su

propia entidad, se vinculan entre sí de un modo continuo. El espacio moderno es un espacio interior en continuidad con el exterior.

La estructura reticular en esqueleto se convierte en el sistema estructural que hace posible esta continuidad espacial horizontal. No en vano, Le Corbusier patenta su estructura Dom-Ínó en 1915, sólo un año antes de que, tras una década de intensa investigación, Einstein publique su famosa teoría de la relatividad general. La estructura reticular se caracteriza por definir el espacio moderno -continuo, homogéneo e isótropo- únicamente por medio de dos planos horizontales, el de suelo y el de techo. A fin de garantizar esta continuidad horizontal, la presencia de los elementos verticales de soporte y compartimentación se minimiza al máximo. El muro portante opaco se transforma en cerramiento transparente, las paredes interiores se convierten en tabiques sin función portante y los soportes, puntuales, se minimizan en número y sección. El límite entre interior y exterior deja de ser algo definido para convertirse en un espacio intermedio que, sin pertenecer propiamente al interior o al exterior, participa de ambos al mismo tiempo a fin de cerrar sin confinar, de delimitar sin limitar.

Por medio de la teoría de la relatividad general Einstein presenta la gravedad como la ley fundamental que rige la relación de la masa de la materia con la estructura del espacio. Despojada de la visión newtoniana de la gravitación, según la cual la gravedad se representa como una fuerza de atracción mutua entre masas, la gravitación einsteiniana descansa sobre dos ideas fundamentales: la curvatura del espacio-tiempo por acción de la masa y la flotación libre de la masa en el espacio-tiempo. Einstein asocia la caída de los cuerpos graves con la flotación libre y despoja con ello al peso de su ancestral origen gravitatorio, al que relaciona exclusivamente con la física del estado sólido y la elasticidad de la materia. Contraviniendo los preceptos de la física clásica, según los cuales la flotación se da en ausencia de peso, en la teoría einsteiniana la noción de peso aparece, precisamente, cuando se impide la flotación. La gravitación moderna sustituye así la pesantez por la levedad y la caída por la flotación.

La arquitectura incorpora esta leve gravitación a una forma estructural que, por medio de la abstracción, se despoja de cualquier elemento tectónico que pueda hacer referencia a la noción clásica de la gravedad; ya no se trata de oponerse a la pesantez por medio de la ligereza, sino de negarla por medio de la levedad. La planeidad de la cubrición moderna responde a la voluntad de hacer desaparecer a la gravedad de la forma estructural pues, durante milenio y medio, la arquitectura había encontrado en la inherente curvatura de la gravedad la solución al problema gravitatorio de la cubrición espacial. La ausencia de signos que revelen su naturaleza estructural, la ambigüedad –cuando no ocultación- de su verdadera constitución material, y la aparente facilidad con que la tecnología moderna permite resolver la cubrición de grandes superficies, permite abstraer a la cubierta plana del peso de la gravedad clásica. A ello contribuye también la abstracción tectónica del soporte, cuya mínima sección hace visualmente inverosímil la satisfacción de su función portante, restando así pesantez al elemento de cubrición.

La estructuración de la gravedad por medio de planos horizontales que se apoyan en soportes de mínima sección y número permite construir un espacio gravitatoriamente abstracto capaz de establecer una franca relación con su entorno sin tener que renunciar a su carácter interior cubierto.

III.6.1.5. La gravedad en la construcción del espacio

En la presente investigación se ha podido constatar la correspondencia existente entre la evolución de la descripción del movimiento de origen gravitatorio de los cuerpos dotados de masa y el modo de encauzar las cargas gravitatorias en la arquitectura.

La dicotomía entre la verticalidad natural de la gravedad y la artificialidad del movimiento horizontal señalada por Aristóteles se corresponde con la contraposición entre la verticalidad de lo portante y la horizontalidad de lo portado en la unidad estructural arquitrabada propia de la primera concepción espacial. Milenio

y medio más tarde, en su explicación del movimiento de los proyectiles terrestres, Buridan y Oresmes desmienten la descripción aristotélica del movimiento de los proyectiles y se postulan a favor de una trayectoria ascendente inclinada y una caída totalmente vertical. Esta descripción se fundamenta en la combinación de la componente vertical y la horizontal, que en la arquitectura da lugar a la cubierta inclinada, una forma de cubrición en la que se introduce una componente vertical a la cubrición horizontal. Más tarde, en línea con las intuiciones de Plutarco, Tartaglia y Galilei advierten que la trayectoria de los proyectiles debe ser curva en todo su desarrollo. Esto coincide en lo conceptual -no en lo temporal- con la introducción de la directriz curva en las formas de cubrición espacial, como son el arco, la bóveda y la cúpula. En base a Kepler, Newton constata esta curvatura no sólo en el movimiento de los proyectiles terrestres, sino también en el movimiento de los cuerpos celestes.

La negación de los fundamentos de la descripción newtoniana de la gravedad en el siglo XVIII induce a un gradual abandono de las formas estructurales abovedadas por formas de cubrición más libres. No obstante, ello no impide la incorporación de la matematización vectorial del movimiento gravitatorio al ámbito de la forma estructural, descomponiendo los elementos estructurales clásicos en barras dispuestas en celosía. Finalmente, la constatación einsteiniana de la curvatura no euclídea del espacio-tiempo tiene un efecto sobre la forma arquitectónica contrario al esperado y, en vez de propugnarse el desarrollo de formas estructurales curvas, se imponen las geometrías euclídeas más elementales, como la línea recta y el plano.

Se constata así el terrible sino de la arquitectura, un arte inherentemente estático que se ve ineludiblemente sometido a los avatares de una ley natural, la gravedad, destinada a regir las leyes del movimiento de la masa por el espacio. La arquitectura se descubre entonces como el arte de disponer en equilibrio estático una determinada cantidad de masa con fines espaciales evitando su natural tendencia al movimiento por acción de la gravedad ⁰¹.

Hasta aquí se han apuntado de un modo resumido aquellos indicios

01. G. Semper: "El ideal de la tectónica es lo estático (...). Pero del mismo modo que lo estático implica lo dinámico, en la tectónica se afirma el movimiento potencial". Citado en HERNÁNDEZ LEÓN, Juan Miguel: *La casa de un solo muro*. Madrid: Nerea, 1990, p. 126

que señalan la correspondencia, no siempre lineal en el tiempo ni inmediata en lo conceptual, entre el modo de comprender la naturaleza física de la gravedad -la ley que rige la relación entre la masa y el espacio- y la manera de manipular estructuralmente sus efectos sobre la materia que delimita el espacio arquitectónico.

Así, en correspondencia con la física aristotélica, fundamentada en la pesantez de los distintos elementos que conforman el mundo, el principal atributo gravitatorio-estructural de la primera concepción espacial es el peso. La cubrición abovedada de la segunda concepción espacial se fundamenta, precisamente, en la constatación de la naturaleza curva del fenómeno gravitatorio advertida desde Plutarco hasta Newton. La crisis de la noción de fuerza con la que Newton identifica la gravedad se corresponde con el aligeramiento de la estructura arquitectónica que caracteriza a la tercera concepción espacial. La constatación por parte de Einstein de que el peso no es una cualidad de origen gravitatorio y de que la gravedad se fundamenta en la flotación libre de la materia imprime a la estructura arquitectónica de la cuarta concepción espacial de una aparente levedad.

Se descubre así que cada representación científica del fenómeno gravitatorio ha inducido a un determinado modo de resolver el problema estructural que plantea la cubrición del espacio. En este sentido, se advierte la adecuación de cada una de las cuatro tipologías estructurales a la naturaleza propia de cada concepción espacial: por su dificultad de cubrir el espacio la estructura adintelada se identifica con la arquitectura como espacio exterior; la naturaleza masiva y envolvente de la estructura abovedada se corresponde con el carácter introvertido del espacio de la segunda concepción espacial; la desmaterialización lineal de la estructura en celosía define un espacio apenas interior que se abre totalmente al exterior; por último, la estructura reticular plana configura un espacio interior que se mantiene en total continuidad con el exterior. No debe sorprender, pues, que desde el ámbito de la física se postule que la gravedad define las propiedades físicas y geométricas del espacio -Einstein-, y que desde la teoría de la arquitectura se afirme que *la gravedad construye el espacio* -Campo Baeza⁰².

02. Alberto Campo Baeza: "La GRAVEDAD CONSTRUYE EL ESPACIO. Los elementos materiales pesantes, que hacen reales las formas que conforman el espacio, tienen que acabar transmitiendo la Gravedad, el peso de su materialidad, a la tierra. El sistema gravitatorio sustentante, la estructura, es la que ordena el espacio, la que lo construye". CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 78. Idea, luz y gravedad, bien temperadas: Sobre las bases de la Arquitectura, 1995

III.6.2. La estructuración lumínica del espacio

El análisis realizado en el apartado anterior pone en evidencia la correlación existente entre las distintas representaciones físicas sobre la naturaleza de la gravedad y el modo de manipularla arquitectónicamente a través de los tipos estructurales que han ido sucediéndose a lo largo del tiempo. En el caso de la luz resulta más difícil hallar una relación tan evidente entre su conceptualización científica y su manipulación arquitectónica. Esta diferencia se debe fundamentalmente al modo distinto en que ha evolucionado el conocimiento científico de ambas realidades físicas.

Tal como se apuntaba anteriormente, la historia de la gravedad se construye a base de grandes teorías físicas, muy claras y muy definidas en el tiempo, que conceptualmente concuerdan con los tipos estructurales que hacen posible la construcción de las sucesivas concepciones espaciales arquitectónicas. En cambio, la dificultad de conceptualizar la naturaleza física de la luz ha provocado que su evolución histórica sea mucho más confusa. De las primeras reflexiones de los pensadores griegos surgieron distintas concepciones sobre su naturaleza que, de algún modo, han ido desarrollándose a lo largo del tiempo. Como consecuencia de esta amplia variedad de ideas, durante largos periodos de tiempo llegaron a coexistir, en absoluta disputa, teorías sobre la naturaleza de la luz diametralmente opuestas. Sin embargo, ninguna de estas teorías llegó nunca a formularse con suficiente solidez, lo que asentó a la reflexión sobre la naturaleza de la luz en un estado de permanente provisionalidad. Esta circunstancia ha dificultado sin duda la translación del conocimiento científico sobre la luz al diseño arquitectónico, que en demasiadas ocasiones ha intentado suplir esta ausencia interpretando el significado de la luz desde el ámbito de la estética, la metafísica, el funcionalismo, etc.

Sin embargo, tal como se desprende del análisis realizado sobre las teorías elaboradas por los físicos más importantes de la historia, aún cuando sus autores no reconocen explícitamente ninguna vinculación entre ambas realidades físicas, la necesidad de convivir coherentemente

en una misma concepción cosmológica ha hecho que los estudios desarrollados por cada autor sobre la gravedad y la luz se hayan influenciado mutuamente. Valga como ejemplo Isaac Newton, quien modifica su teoría sobre la gravedad al desarrollar su teoría corpuscular de la luz, o Albert Einstein, cuya teoría sobre la gravitación se elabora como una generalización de su teoría sobre la luz.

Se descubre entonces que si la representación científica de la luz es capaz de condicionar la conceptualización física de la gravedad, y ésta repercute en el modo de manipular arquitectónicamente la gravedad a través de la estructura -un elemento que se descubre determinante en la configuración del espacio y sus posibilidades de iluminación-, es lícito concluir que, aunque sea de un modo indirecto, el conocimiento físico de la luz tiene también una incidencia importante en la concepción del espacio arquitectónico.

Así pues, unas veces por falta de consistencia teórica, otras por falta de unanimidad científica, es difícil encontrar una correspondencia precisa entre la conceptualización física de la naturaleza de la luz y su manipulación arquitectónica. Sin embargo, esta dificultad no impide, en absoluto, el reconocimiento de la importancia fundamental de la luz en el hecho espacial. A continuación se exponen aquellos aspectos relacionados con la luz que, interactuando con la gravedad, inciden en la configuración del espacio arquitectónico.

III.6.2.1. La sombra exterior de la primera concepción espacial

Desde el menhir prehistórico hasta el *gnomon* romano, la operación proyectual más sencilla en relación a la luz consiste en disponer un elemento lineal en posición vertical. Al oponerse con su opacidad al paso de la luz a través de su masa, el elemento enhiesto proyecta en el paisaje iluminado por la luz del sol una sombra cambiante, que dota al lugar de una determinada orientación. La arquitectura de esta primera concepción espacial establece así una estrecha relación entre el Sol y la forma construida, reconociendo en su orientación la imposibilidad de actuar sobre el rayo solar que incide sobre el objeto arquitectónico.

En efecto, en tanto que exterior y descubierto, el espacio de esta primera concepción espacial se configura por medio de un juego de sombras proyectadas en un fondo completamente iluminado por la luz del Sol. La unidad arquiteada propia de esta concepción espacial expresa así su superioridad frente al muro pues, además de resistir los efectos de la gravedad, supera su inherente condición opaca para abrir paso a la luz, enmarcando una porción de luz solar que se distingue de la que rodea a la sombra proyectada. Nace así la noción de “luz estructural”, una cuestión arquitectónica de vital importancia que se refiere, al mismo tiempo, al espacio libre entre dos apoyos gravitatorios y a la luz que habita entre ellos. Se reconoce así la elemental contraposición existente entre la gravedad y la luz. En efecto, allí donde hay materia se manifiesta el peso de la gravedad y se priva la existencia de la luz, mientras que allí donde la materia deja paso al espacio desaparece el peso y se hace la luz.

Esta contraposición ontológica entre la gravedad y la luz se encuentra también presente en la física aristotélica. Según el filósofo griego, el mundo está conformado por una serie de esferas concéntricas donde se dispone naturalmente la materia de acuerdo con su pesantez o ligereza: en el centro se encuentran los elementos pesados, primero la tierra y luego el agua, mientras que en las esferas exteriores se encuentran el aire y el fuego, el más ligero. El éter, un quinto elemento de origen celeste, posee la capacidad de ocupar todo el espacio libre de materia sin verse sometido a los efectos de la pesantez o la ligereza. Su extrema sutileza hace de él un elemento diáfano que, convenientemente activado por el fuego, da lugar a la aparición de la luz; sin ese estímulo el diáfano se mantiene en potencia, no en acto.

Se descubre entonces que, tanto en la física aristotélica como en la arquitectura de la antigüedad, la gravedad y la luz se conciben como realidades opuestas entre sí, relacionándose la primera con el peso, la oscuridad y el descenso hacia lo telúrico, vinculándose la segunda a la levedad, la diafanidad y el ascenso hacia lo etéreo. Invariablemente desde entonces, la arquitectura se ha fundamentado en esta aristotélica contraposición.

III.6.2.2. La luz interior de la segunda concepción espacial

La segunda concepción del espacio se fundamenta en la idea de que construir espacio es construir luz, y que para manifestar esa luz es necesaria la construcción previa de una sombra. En tanto que las propiedades de la luz no pueden ser modificadas en origen, es el propio objeto arquitectónico el que debe encargarse de orientarse correctamente en relación al Sol a fin de establecer con precisión las propiedades de la luz que debe configurar el espacio a lo largo del tiempo. Materialmente opaca y gravitatoriamente ineludible, con su sola presencia la estructura se convierte en el primer y más importante elemento de control de la relación entre la luz y la sombra en la configuración del espacio. La masa no sólo porta, cierra y cubre el espacio, sino que controla con precisión la luz que lo configura. La construcción precisa de esta luz, propia y apropiada a cada espacio, deviene en motivo y fin último del hecho arquitectónico en esta etapa.

En tanto que la presencia de la luz en el elemento estructural revela la ausencia de gravedad, se desarrollan distintas estrategias proyectuales dirigidas a sustituir la masa del elemento de cubrición por el espacio, conservando, o incluso mejorando, su respuesta mecánica. Este es el caso, por ejemplo, del óculo, cuya presencia revela la ausencia del soporte central etrusco o de la dovela central del arco de descarga, elementos antes imprescindibles que deviene estructuralmente innecesarios en la cúpula gracias al principio del anillo de compresión. En el reconocimiento de la gravedad como una cualidad inherente de la construcción del espacio reside, paradójicamente, la posibilidad de construir una luz arquitectónica.

Además de configurar el espacio, la manipulación consciente de la dirección e intensidad del rayo luminoso por medio de su reflejo en los paramentos que configuran el interior permite potenciar o subvertir la relación natural entre la sombra y la luz, enfatizando o minimizando con ello la pesantez de los elementos estructurales que parecen sustentar el espacio. Se descubre, pues, que más allá de su inestimable importancia en la cualificación del espacio, la luz sirve también para modificar la sensación visual de pesantez o ligereza.

III.6.2.3. La luminosidad ligera de la tercera concepción espacial

Una vez dominado y superado el problema de la gravedad por medio de las estructuras lineales de esta tercera concepción espacial, la luz adquiere un nuevo protagonismo y una libertad plena en el hecho espacio-estructural. Cuestiones tan importantes como la "luz estructural" o la reciprocidad entre ligereza y luminosidad ven modificado su significado por un ansia de luz sin precedentes en la historia de la arquitectura, coincidente en el tiempo con la invalidación de la condición etéreo-copular de la luz newtoniana a favor de la formulación ondulatorio-electromagnética de Faraday y Maxwell.

La idea de ligereza adquiere en la estructura metálica un significado pleno, pues no sólo alude a la disminución real del peso de la construcción, sino que hace referencia también a la abundancia de luz. Su doble condición diáfana -en tanto que libre de soportes y lumínicamente transitiva- la convierte en una estructura de gran luz, en la que la luz no pasa sólo por entre los apoyos, sino que penetra también por entre las barras que conforman los propios elementos estructurales.

El encauzamiento de la gravedad por medio de líneas de fuerza en celosía hace que la estructura deje de ser un límite infranqueable de contención espacial y oposición lumínica. El espacio ya no se encuentra encerrado en el interior de la masa sino que, en total transitividad visual y lumínica con el exterior, se abre y se expande más allá de los delgados elementos que lo definen. Antaño configurado por una luz confinada en una sombra interior, el espacio se ve inundado ahora por una luz procedente directamente del exterior; la orientación solar del espacio pierde así su histórica importancia. Esta identificación lumínica del espacio interior con el exterior, donde las sombras son devoradas por una luz que todo lo ilumina, es el rasgo lumínico más importante de esta nueva concepción espacial.

La necesidad de proteger el espacio arquitectónico de los agentes atmosféricos exteriores hace necesaria la participación de un

elemento constructivo ajeno al sistema portante: el cerramiento. En el siglo XIX, el material capaz de proteger el espacio del exterior sin comprometer su cualidad lumínica es el vidrio. La luz solidificada en el cristal transparente contiene y protege al espacio de todos los agentes exteriores menos de sí misma. Construido en base a la cantidad y no a la cualidad, el espacio se inunda de luz y, sin posibilidad de construir sombra alguna, la orientación pierde su importancia histórica.

A partir del siglo XVII las teorías que no consideraron la luz como una actualización o movimiento del medio etéreo se plantearon el problema de la materialidad de la luz y, con ello, de relación recíproca entre la luz y la materia. Aunque algunas teorías anteriores intuyeron la reciprocidad entre materia y luz, no fue hasta Newton que se planteó abiertamente que la luz podía convertirse en materia y la materia en luz. Tres siglos más tarde Einstein formuló matemáticamente esta idea a través de su célebre fórmula $E=mc^2$, en la que la materia y la energía eran representadas como dos formas de una misma realidad.

La posibilidad de que la luz fuera una realidad física de naturaleza material, o de que existiera una cierta relación de reciprocidad entre luz y materia, indujo a algunos físicos a plantearse si la luz, hasta entonces considerada totalmente ajena a los designios de la gravedad, podía verse afectada por ésta de algún modo. Kepler fue el primero en cuestionarse la posibilidad de que la luz pudiera pesar o gravitar, y llegó a la conclusión de que la luz no pesaba. Posteriormente, Descartes se planteó también esta misma cuestión con idéntica respuesta. Estas conclusiones eran previsibles, pues ambos físicos plantearon la naturaleza de la luz como virtud de los cuerpos o como presión etérea, al margen de cualquier nota de materialidad. Con la teoría corpuscular de la luz, formulada por Newton a principios del siglo XVIII, estas consideraciones recibieron algunos matices: la luz pasó a ser considerada como una realidad física corpórea y material. Finalmente fue Einstein quien, a principios del siglo XX, postuló la naturaleza dual, a la vez corpuscular y ondulatoria, másica y energética de la luz.

El amplio uso del cristal en la arquitectura decimonónica parece poner de relieve todas estas cuestiones, pues la materia pesante del muro opaco es sustituida por el vidrio, que debido a su particular estructura molecular, aúna la diafanidad de la luz y el peso de la gravedad. El cristal hace posible la luz total en el espacio y torna ingrávida en tanto que transparente a la estructura, al mismo tiempo que precisa del hierro estructural para soportar el peso de su propia transparencia.

III.6.2.4. La abstracción lumínica de la cuarta concepción espacial

La reflexión teórica de Albert Einstein sobre la naturaleza dual de la luz difícilmente puede encuadrarse en la experiencia sensible cotidiana del fenómeno luminoso, una circunstancia que dificulta su implementación al ámbito del arte. Sin embargo, la arquitectura moderna, cuyo origen geográfico se localiza en el norte de Europa, encuentra en la luz nórdica esa luz natural, suave, difusa, indirecta, adireccional, densa y homogénea que expresa el ideal abstracto de la luz representada en las obras pictóricas vanguardistas. El objetivo de la arquitectura moderna en relación a la luz consiste en conseguir construir esa luz abstracta con independencia de las condiciones lumínicas del emplazamiento y de la orientación concreta del espacio.

El plano horizontal de la cubierta ya no tiene como misión la construcción de una sombra, sino la abstracción de la luz solar exterior de sus propiedades físico-geométricas más elementales -a saber, su natural dirección vertical y su capacidad de generar sombra- a fin de transformarla en una neutra claridad interior. Por su parte, la transparencia del cerramiento vertical hace posible la transición continua entre la intensa luz solar exterior y la suave penumbra que conforma el interior. Sumido en una luz sin sombra ni dirección, el espacio mismo y los objetos en él contenidos adquieren ese carácter leve propio de las representaciones pictóricas de la vanguardia artística. El espacio moderno no encuentra su razón de ser en la sombra sino en una suave luz sin dirección que, anulando toda sombra, alude a una leve claridad.

III.6.2.5. La luz en la configuración del espacio

Al interactuar con la materia, la luz se ve reflejada y hace perceptibles los límites que delimitan el espacio: además de revelarlo visualmente, lo dota de una cualidad y un carácter arquitectónico. Es en el cambiante diálogo entre la luz y la sombra donde reside la clave de la interioridad o la exterioridad del espacio arquitectónico. Es por ello que la luz deviene en un elemento fundamental en la configuración del espacio arquitectónico.

Pero, a diferencia de la gravedad, no es posible hallar una correspondencia directa entre la evolución de su representación física y el modo de manipularla arquitectónicamente a lo largo de la historia. Tal como se ha apuntado ya, con toda probabilidad esta circunstancia se deba a la dificultad de su conceptualización, que ha dado lugar a una gran cantidad de construcciones teóricas sobre su naturaleza y sus fenómenos que ha hecho imposible su unívoca implementación en el ámbito de la forma arquitectónica. Puede ser que también haya podido contribuir el hecho de que, a diferencia de la gravedad, los efectos de la luz en la arquitectura no se representan, sino que se manifiestan⁰³, lo cual restringe el margen de maniobra de su manipulación arquitectónica con fines espaciales.

La representación física de la luz influye en la conceptualización científica de la gravedad, fundamental en la concepción de la estructura gravitatoria que define la forma del espacio arquitectónico y la relación entre la luz y la sombra que lo caracteriza. A su vez, la cualidad del espacio depende de la manipulación estructural de la luz que lo configura, siendo la estructura resultado de un determinado modo de comprender la naturaleza física de la gravedad, atenta siempre a la manera de conceptualizar científicamente la luz. Se pone de manifiesto así que, aunque de un modo indirecto, la comprensión física de la luz ejerce una influencia decisiva en su manipulación arquitectónica y, por tanto, en la manera de concebir el espacio.

Al mismo tiempo, tanto desde el ámbito de la física como de la arquitectura, la luz y la gravedad han sido siempre concebidas

03. "En otras manifestaciones artísticas, como en la pintura y en la escultura, existe un concepto previo y consciente sobre la luz antes de su representación, que es susceptible de ser modificado en el transcurso de su realización en función de la respuesta que en cada momento se produce entre la obra y el artista. Por el contrario, la luz en la arquitectura no se representa, se manifiesta. La elección consciente durante el proceso de proyecto del tipo de luz que debe configurar el espacio, es una especulación intelectual que sólo es posible verificar, con mínimas posibilidades de corrección, una vez construido". DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, Tomo I, p. 317.*

como realidades opuestas: la luz se relaciona con lo ígneo y lo etéreo, la gravedad con lo térreo y lo telúrico; la luz se asocia con la diafanidad y la transparencia, la gravedad con la opacidad y la oscuridad; la luz se vincula a la ligereza y la levedad, la gravedad está íntimamente vinculada a la pesantez.

Desde sus inicios, la arquitectura ha representado esta contraposición de maneras muy distintas, unas veces enfatizándola, otras subvirtiéndola. La percepción de la acción de la gravedad sobre la materia arquitectónica ha sido siempre subrayada o atenuada por medio de la luz y de su opuesto, la sombra. En este sentido la historia de la arquitectura podría explicarse en base al desplazamiento del protagonismo de la gravedad hacia la primacía de la luz, pues la arquitectura ha aspirado siempre a construir cada vez más espacio con menos gravedad y más luz.

III.6.3. HACIA LA TRANSPARENCIA ESTRUCTURAL

El análisis teórico sobre la estructuración espacial de la gravedad y de la luz en el hecho arquitectónico a lo largo de la historia desarrollado en la pretende investigación pretende dotar al arquitecto de un conocimiento suficientemente amplio y preciso sobre la naturaleza de ambos fenómenos como para convertirse en herramienta proyectual a la hora de concebir el espacio. Esto parece especialmente acertado cuando se advierte que, con el paso de los siglos, la intuición artística ha ido cediendo la iniciativa a la comprensión científica. Si bien es cierto que en sus inicios la arquitectura se desarrolló en ausencia de método científico, a lo largo de la historia la situación se invierte progresivamente hasta que, en el siglo XX, la arquitectura no sólo se desarrolló en base al conocimiento científico, sino que lo hizo de manera totalmente consciente. Se advierte así la conveniencia de atender a los avances de la física teórica en su esfuerzo por comprender la naturaleza de la gravedad y de la luz.

Actualmente la gravedad se explica por las leyes de la relatividad

general, mientras que la interacción electromagnética, donde se incluye a la luz, se describe por medio de la física cuántica. Ambas teorías son consistentes en sí mismas, pero se descubren incompatibles cuando tienen que describir conjuntamente fenómenos que aúnan al mismo tiempo lo gravitatorio y lo electromagnético; tal es el caso de la teoría de los agujeros negros de Stephen Hawking. Es por ello que ya el propio Einstein empezó a trabajar en la unificación de las teorías sobre ambos fenómenos, una labor que aún hoy sigue pendiente. Esta unificación se está intentando llevar a cabo por medio de la inserción de la relatividad einsteiniana en la física cuántica, hecho que otorga mayor validez a la teoría cuántica de la luz que a la gravedad einsteiniana. Nos encontramos, pues, en una situación de incertidumbre científica que, en cierto modo, es análoga a la que se produjo durante la segunda mitad del siglo XVIII, cuando la teoría ondulatoria de la luz parecía incontestable y la gravitación universal empezaba a ser seriamente criticada. Como ya sabemos, ahondando en la luz surgió una nueva manera de comprender la gravedad, y con ello apareció un nuevo modo de concebir el espacio arquitectónico.

En el ámbito de la arquitectura esta voluntad de unificación parece tener su expresión más evidente en el auge de las estructuras transparentes. La posibilidad de erigir estructuras totalmente permeables al paso de la luz plantearía un escenario nuevo, en el que los parámetros que históricamente han regido la interacción arquitectónica entre la gravedad y la luz se verían notablemente alterados pues, históricamente, la gravedad y la luz se han manifestado siempre como fenómenos recíprocamente excluyentes en la forma arquitectónica: allí donde la gravedad ha manifestado su fuerza se ha impedido siempre el paso de la luz.

La posibilidad de emplear estructuras transparentes permitiría volver a unificar el cerramiento y la estructura, la delimitación espacial y la función resistente, en un mismo elemento. De este modo, por primera vez en la historia de la arquitectura se plantearía la posibilidad de que la materia que ordena los efectos de la gravedad en la construcción del espacio no se opusiera, necesariamente, al

paso de la luz. Se abriría la posibilidad de que ambos fenómenos pudieran interactuar al mismo tiempo sobre un mismo elemento sin que la presencia de uno excluyera necesariamente la posibilidad del otro, poniendo fin a la histórica dicotomía, tanto física como arquitectónica, entre ambos fenómenos.

El desarrollo de las estructuras transparentes permitiría conquistar la transparencia total del espacio, que quedaría definido únicamente por los brillos, los reflejos y las tenues sombras provocadas por la interacción de la luz con la materia transparente. Sin embargo, con toda probabilidad esta transparencia total no aportaría ningún valor nuevo a la arquitectura, pues ya desde el siglo XIX la arquitectura se ha caracterizado por la máxima transparencia de sus límites. Lo que probablemente daría con una nueva experiencia del espacio en relación a la luz y su estructura sería la posibilidad de gestionar el grado de diafanidad, translucidez y transparencia de los límites del espacio. En base a la representación electromagnética de la luz formulada a mediados del siglo XIX, podría imaginarse la posibilidad de utilizar vidrios electrocrómicos -aquellos que pierden su transparencia cuando se les aplica una corriente eléctrica- que, además, pudieran desarrollar una función estructural. De esta manera, la estructura arquitectónica ya no se vería forzada a debatirse entre la transparencia y la opacidad sino que, aludiendo a la naturaleza dual de la luz propuesta por Einstein, podría alternarse ambas reacciones frente al estímulo luminoso. Se terminaría así con la histórica dicotomía entre el interior y el exterior, pues un mismo espacio podría alternar ambas situaciones lumínicas a voluntad del usuario.

A punto de celebrar el siglo de la formulación de la relatividad general con que Einstein describió la gravitación, y a sabiendas de los enormes esfuerzos que la comunidad científica está dedicando a estas cuestiones, es fundamental estar bien atento a cualquier avance que pueda realizarse en el ámbito de la física pues, con toda probabilidad, en la próxima gran teoría sobre la gravedad y la luz se encontrará el germen de una nueva manera de concebir

04. CAMPO BAEZA, Alberto; La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras, 2ª ed., Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 32. UN MINUTO ANTES DE LA ÚLTIMA EXPLOSIÓN. Sobre el futuro de la Arquitectura. Luz y gravedad: el quid de la cuestión (Madrid, 1993).

el espacio arquitectónico. Y es que, tal como expresa Alberto Campo Baeza al reflexionar sobre la luz y la gravedad, *“el futuro de la Arquitectura dependerá de una posible nueva comprensión de esos dos fenómenos. O mejor que nueva, de un más claro y más profundo entendimiento”*⁰⁴.

IV.

CONCLUSIONES

4. CONCLUSIONES

IV.0. Introducción.....	559
IV.1. La gravedad y la luz en la teoría de la arquitectura.....	559
IV.2. El conocimiento físico sobre la gravedad y la luz.....	567
IV.3. La estructuración del espacio arquitectónico por la gravedad y la luz.....	573
IV.4. Epílogo.....	583

0. Introduction

Architecture is based on the relationship between matter and its absence, space. The character of this space depends on the interaction between the matter that defines it and the light that reveals it. There isn't a single architectural construction in the world that while creating space has been able to elude the forces of terrestrial gravity, or do without the effects of solar light. This simple verification itself, justifies the benefits of the current doctoral thesis.

Purpose of the research.

Due to the impossibility of modifying the properties of gravity and light that act on the origin and because of their physical nature, the architect is obliged to develop a series of design strategies destined to manipulate consciously the effects of both physical realities on the matter that creates the space. The purpose of this doctoral research is to reveal the principals on which the interaction between gravity and light in the structuring of architectural space is based.

Structure of the research.

In response to the different objectives that this research proposes, the thesis has been structured into three parts: the first delves into the historical origin and the theoretical principals of architectural theory on gravity and light; the second analyses the evolution of scientific knowledge on the physical nature of both phenomena; and the third and final part dissects the design strategies aimed structuring space through the architectural interaction between gravity and light.

I. FIRST PART.

IV.1. Gravity and light in the theory of architecture

The analysis of the theoretical reflections and design principles on the structural interaction between gravity and light for spatial purposes by Juan Navarro Baldeweg and Alberto Campo Baeza, two architects that have lead the reflection on these topics in our country, precedes the current

IV.0. Introducción

La arquitectura se fundamenta en la relación entre la materia y su ausencia, el *espacio*. El carácter de este espacio depende de la interacción entre la materia grave que lo define y la luz que lo revela. No existe ni una sola obra de arquitectura en el mundo que, en su afán por construir el espacio, haya podido eludir la acción de la gravedad terrestre, o haya podido prescindir de los efectos la luz solar. Esta sencilla constatación justifica, por sí misma, la oportunidad y la conveniencia de la presente investigación doctoral.

Ante la imposibilidad de modificar las propiedades de la gravedad y de la luz actuando en el origen y la causa de su naturaleza física, el arquitecto se ve obligado a desarrollar diversas estrategias proyectuales destinadas a manipular conscientemente los efectos de ambas realidades físicas sobre la materia que delimita el espacio. *La finalidad de la presente investigación doctoral es revelar los principios sobre los que se fundamenta la interacción de la gravedad y la luz en la estructuración del espacio arquitectónico.*

Finalidad de la investigación.

Respondiendo a los distintos objetivos que se impone la presente investigación, la tesis se ha estructurado en tres partes: la primera ha ahondado en el origen histórico y en los principios teóricos de la reflexión teórica arquitectónica sobre la gravedad y la luz; en la segunda se ha analizado la evolución del conocimiento científico sobre de la naturaleza física de ambos fenómenos; por último, en el tercer y último apartado se han analizado las estrategias proyectuales destinadas a estructurar el espacio por medio de la interacción arquitectónica de la gravedad y la luz.

Estructura de la investigación.

IV.1. La gravedad y la luz en la teoría de la arquitectura

I. PRIMERA PARTE.

El análisis de las reflexiones teóricas y proyectuales sobre la interacción estructural de la gravedad y de la luz con fines espaciales por parte de Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza, los dos arquitectos que durante las últimas décadas han liderado la reflexión

research, and at the same time it becomes its natural starting point. Both architects identify space as the leading element in architecture, and despite their differences and design peculiarities, they both recognize the structure as the physical element in which gravity and light interact.

I. Objective. Nevertheless, the analysis of the works of these two architects doesn't allow us to trace back to the origin of their interest in the architectural theory of the two physical fundamental realities. For this reason, the first objective of the research is to clarify the origins and the reasons for the architectural interest in gravity and light.

I. Development. The satisfaction of this first objective in itself would be enough for the complete development of a doctoral thesis. However, a research of this kind would distract from the purpose of the thesis outlined here. That is the reason why the analysis of the presence of reflections related to gravity and light in the theory of architecture from ancient history to the present day in this first part does not intend to do so in an exhaustive way.

In *The Ten Books on Architecture* (“*De Architectura, Libri Decem*”), the oldest treatise on Architecture, Marcus Vitruvius points out that *Construction (aedificatio)*, *Gnomonics (gnomonice)* –the science that studies the movement of solar light by means of a rod or gnomon fixed to the ground- and *Mechanics (machinato)* –the science that studies the equilibrium and movement of bodies subjected to a force, in this case gravity- as the three parts of architecture, identifying light and gravity as leading factors in architecture. With the end of the Roman Empire the treatise was forgotten, and throughout the Medieval Ages the Vitruvian postulates were replaced by the Christian metaphysics of light. The precepts of the treatise were recovered once again in the XV century; although the interest for the tripartite scheme of construction –*firmitas, utilitas, venustas*- managed to eclipse the three parts of architecture –“*aedificatio, gomonice, machinato*”-,

en torno a estas cuestiones en nuestro país, precede al inicio de la presente investigación y, al mismo tiempo, deviene en punto de partida natural de la misma. Ambos arquitectos identifican al espacio como el elemento protagonista del hecho arquitectónico y, a pesar de sus diferencias y particularidades proyectuales, reconocen en la estructura arquitectónica el elemento físico sobre el que interactúan la gravedad y la luz.

Sin embargo, el análisis de la obra de ambos arquitectos no permite rastrear en ningún caso el origen del interés de la teoría arquitectónica hacia estas dos realidades físicas fundamentales. Es por ello que la primera parte de la investigación se plantea como objetivo *el esclarecimiento de los orígenes y las razones fundamentales del interés arquitectónico por la gravedad y la luz.*

I. Objetivo.

La satisfacción de este primer objetivo bastaría en sí mismo para el desarrollo de una tesis doctoral completa. Sin embargo, una investigación de este tipo se alejaría de la finalidad de la tesis aquí planteada. Es por ello que debe entenderse el análisis de la presencia de reflexiones relacionadas con la gravedad y la luz en la teoría de la arquitectura desde la antigüedad hasta el presente desarrollado en esta primera parte no pretende agotar en absoluto esta cuestión.

I. Desarrollo.

En “De Architectura, Libri Decem” (*Los diez libros de arquitectura*), el tratado sobre arquitectura más antiguo conservado, Marco Vitruvio señala a la Construcción (*aedificatio*), la Gnomónica (*gnomonice*) -la ciencia que estudia el movimiento de la luz solar por medio de una vara o gnomon clavado en el suelo- y la Mecánica (*machinatio*) -la ciencia que se ocupa del equilibrio y el movimiento de los cuerpos sometidos a algún tipo de fuerza, en este caso la gravedad- como las tres partes de la arquitectura, señalando ya a la luz y la gravedad como verdaderos protagonistas del hecho arquitectónico. Con el fin del imperio romano el tratado cae en el olvido y, durante el Medievo, se sustituyen los postulados vitruvianos por la metafísica cristiana de la luz. Con el hallazgo del tratado en el siglo XV se recuperan los preceptos de la teoría vitruviana; no obstante, el interés por el esquema tripartito de la construcción -*firmitas, utilitas, venustas*-

making the gnomonic and mechanical aspects disappear from the theory of architecture.

Through his dual role of Physicist and Architect, when Sir Christopher Wren recovers Vitruvius' treatise, he partly recovers gravity and light in his interpretation by stating that Firmness depends on the geometrical reasons for Static, a part of Mechanics closely linked to Gravity, whereas Beauty depends on the geometrical reasons for Optics, the branch of Physics that studies light. However, the circumstances that accompanied the posthumous publication of his treatise on architecture in the middle of the XVIII century, lead us to think that his reflections had little repercussion on the field of the theory of architecture.

Between the end of the XVIII century and the beginning of the XIX, the most distinguished German thinkers devoted themselves to studying the nature of human knowledge linked to philosophy, art and science. This research manages to find references to gravity and light in the reflections on architecture between 1775 and 1889. In 1775 Baumgarten's "De Nonnullis ad poema pertinentibus" was published, and in 1819 Arthur Schopenhauer's first edition of "Die Welt als Wille und Vorstellung" (The world as free will and representation) was published, where he states that the purpose of architecture is none other than to express the phenomena of gravity and light.

The European avant-garde movements at the beginning of the XX century, partly inherited from the German nineteenth-century aesthetes, consciously incorporated the new postulates of modern physics on the nature of gravity and light. Although these ideas became the conceptual base of the beginning of modern architecture, by the 30s they had been pushed into the background. The revaluation of the theoretical legacy of avant-garde artists such as Theo Van Doesburg or Lazlo Moholy-Nagy during the 60s by Gyorgy Kepes and Kenneth

consigue eclipsar a las tres partes de la arquitectura -*aedificatio*, *gnomonice*, *machinatio*-, haciendo desaparecer así la gnomónica y la mecánica de la teoría de la arquitectura.

Gracias a su doble condición de físico y arquitecto, en su interpretación del tratado de Vitruvio, Sir Christopher Wren recupera en cierto modo a la gravedad y la luz, al afirmar que la *Firmeza* depende de las razones geométricas de la *Estática* -una parte de la mecánica íntimamente relacionada con la gravedad-, mientras que la *Belleza* depende de las leyes geométricas de la *Óptica* -la rama de la física que estudia los fenómenos de la luz-. No obstante, las circunstancias que acompañaron a la publicación póstuma de sus tratados sobre arquitectura a mediados del siglo XVIII, invitan a pensar que sus reflexiones debieron tener una escasa repercusión en el ámbito de la teoría arquitectónica.

Entre finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, los más ilustres pensadores alemanes se entregan con vehemencia y rigor a la reflexión sobre la naturaleza del conocimiento humano aunando la filosofía, el arte y la ciencia. La presente investigación consigue acotar la aparición explícita de la gravedad y de la luz en la reflexión arquitectónica entre el 1775, año en que Baumgarten publica el “*De Nonnullis ad poema pertinentibus*”, y el 1819, cuando se publica la primera edición de “*Die Welt als Wille und Vorstellung*” (*El mundo como voluntad y representación*) de Arthur Schopenhauer, donde se afirma que la finalidad de la arquitectura no es otra que expresar los fenómenos de la gravedad y de la luz.

Las vanguardias artísticas europeas de principios del siglo XX, en parte herederas de la estética alemana decimonónica, incorporan de manera consciente los nuevos postulados de la física moderna sobre la naturaleza de la gravedad y la luz. Aunque estas ideas devienen en la base conceptual de la arquitectura moderna en sus inicios, a partir de la década de los años treinta estas cuestiones se ven relegadas a un segundo plano. La revalorización del legado teórico de artistas de vanguardia tan destacados como Theo Van Doesburg o Laszlo Moholy-Nagy durante la década de los años

Frampton, put gravity and light once again in the centre of the theory of architecture. These reflections become the conceptual bases of the works of Juan Navarro Baldeweg and Alberto Campo Baeza, respectively.

I. Conclusions. This analysis allows us to confirm that the fundamental importance of gravity and light in architecture has been recognised since ancient times. All the studied authors have shown more interest in the spatial consequences of the interrelationship of both phenomena than in their particular condition, recognising the structure as the element in which this interrelationship occurs.

I. Contributions. This chronological and conceptual research on the origin and later development of the architectural interest in gravity and light from ancient up to current times has an unprecedented character and becomes the first contribution to this first part of the thesis. It has managed to create a guiding thread throughout the evolution of these architectural reflections on gravity and light within history. Thanks to this, it has discovered theoretical architectural references to gravity and light in authors as divers and distant as Vitruvius, Wren or Schopenhauer, a fact that reveals that the interest in both phenomena has always been present in architecture. It has managed to accurately determine the first time in history in which the notions of gravity and light first appeared in the theory of architecture, and also the reasons that have motivated the actual interest for these questions.

I. Continuity of the research. Future investigations could develop a more precise analysis on the evolution of the theoretical reflections on gravity and light. It would be fitting to study the German aesthetes of the end of the XVIII century and beginning of the XIX century in depth, in order to discover the exact circumstances of the appearance of the notions of gravity and light in the theory of architecture. It would also be interesting to delve into the process of consciously incorporating modern scientific

sesenta del siglo XX por parte de Gyorgy Kepes y Kenneth Frampton respectivamente vuelve a poner a la gravedad y a la luz en el centro de la reflexión arquitectónica. Estas reflexiones sientan las bases conceptuales de la obra de Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza respectivamente.

Este análisis permite constatar que ya desde antiguo se reconoce la importancia fundamental de la gravedad y de la luz en el hecho arquitectónico. Los autores estudiados se han interesado en las consecuencias espaciales de la mutua interrelación de ambos fenómenos más que en su condición particular, reconociendo en la estructura el elemento en el que se produce dicha interacción.

I. Conclusiones.

Esta indagación cronológica y conceptual en el origen y posterior desarrollo del interés arquitectónico por la gravedad y por la luz desde la antigüedad hasta la actualidad, tiene un carácter totalmente inédito y deviene en la principal aportación de esta primera parte de la investigación. Se ha conseguido construir un hilo conductor de la evolución de estas reflexiones arquitectónicas en torno a la gravedad y a la luz a lo largo de la historia; gracias a ello se han descubierto referencias teóricas sobre la gravedad y la luz en la arquitectura en autores tan distintos y tan distantes como Vitruvio, Wren o Schopenhauer, hecho que pone de manifiesto que se ha reconocido siempre la importancia fundamental de ambas cuestiones en el hecho arquitectónico. Se ha conseguido así determinar con precisión el periodo histórico en el que por primera vez aparecen de manera explícita las nociones de gravedad y luz en la teoría de la arquitectura, así como las razones que han motivado el interés actual por estas cuestiones.

I. Aportaciones.

En futuras investigaciones podría desarrollarse un análisis historiográfico más concreto sobre la evolución de la reflexión teórica en torno a la gravedad y la luz. Sería especialmente oportuno profundizar en la estética alemana de finales del siglo XVIII y principios del XIX a fin de descubrir con exactitud las circunstancias de la aparición de las nociones de “gravedad” y “luz” en la teoría de la arquitectura. Sería también interesante ahondar en el proceso

I. Continuidad de la investigación.

knowledge on gravity and light in the avant-garde European movements of the beginnings of the XX century.

II. SECOND PART.

IV.2. Physical knowledge of gravity and light

Despite placing gravity and light at the centre of their reflections on architecture, none of the authors analysed in the first part of this research, saw the necessity to dig deeper into the nature of the phenomena. This reveals the inability that the theory of architecture has to answer questions so apparently basic and simple as “What is gravity?” or “What is light?”, because they haven’t even asked it themselves. This fact encourages the research to broaden its range to areas of knowledge other than architecture.

It is at this point when one observes that, in spite of the architectural character of the analysed texts, they all share a special interest in the scientific knowledge of both phenomena. This unexpected circumstance reflects the need to incorporate into this research the physical knowledge of gravity and light, in order to find in the theory of physics the answers not already found in the theory of architecture.

Nevertheless, it is soon discovered that the theory of physics hasn’t quite yet developed a theory that offers straightforward answers to these questions. For two thousand years the brilliant minds of physics have tried to understand the nature of gravity and light and have formulated theories. Each theory has later on been systematically invalidated or replaced. Confirming the provisional character of scientific method, the current research focuses on the analysis of the historic evolution of the scientific knowledge of both questions.

The studies on the evolution of gravity and light carried out in the field of the history of physics is characterised by its partiality, since they have either based them upon the detailed

de incorporación consciente del conocimiento científico moderno sobre la gravedad y la luz en las vanguardias artísticas europeas de principios del siglo XX.

IV.2. El conocimiento físico sobre la gravedad y la luz

II. SEGUNDA PARTE.

A pesar de ubicar a la gravedad y a la luz en el centro de la reflexión sobre el hecho arquitectónico, ninguno de los autores analizados en la primera parte de la presente investigación plantea la necesidad de ahondar en la naturaleza de ambos fenómenos. Se descubre entonces que la teoría arquitectónica no es capaz de responder a preguntas aparentemente tan sencillas y elementales como ¿qué es la gravedad? o ¿qué es la luz?, porque ni siquiera ha llegado a plantearse. Esta circunstancia invita a ampliar el ámbito de estudio de la presente investigación a otras áreas del conocimiento más allá de la disciplina arquitectónica.

Es entonces cuando se observa que, a pesar del carácter arquitectónico de los textos analizados, todos ellos comparten un especial interés por el conocimiento de la naturaleza científica de ambos fenómenos. Esta inesperada circunstancia refleja la necesidad de incorporar el conocimiento físico sobre la gravedad y la luz al ámbito de estudio de la presente investigación a fin de encontrar en la física teórica las respuestas no halladas en la teoría de la arquitectura.

Sin embargo, pronto se descubre que la física no aún ha sido capaz de elaborar una teoría que ofrezca una respuesta definitiva a estas cuestiones. Durante dos mil años las mentes más brillantes de la física han intentado comprender la naturaleza de la gravedad y de la luz formulando teorías que, sistemáticamente, han sido posteriormente invalidadas o reemplazadas. Constatado el carácter provisional del método científico, la presente investigación se centra en el análisis de la evolución histórica del conocimiento científico sobre ambas cuestiones.

Los estudios sobre la evolución de la gravedad y de la luz realizados

study of the theories developed by a specific scientist, concentrating on a specific moment in history, or they focus on one of the phenomena. This bias is less surprising when one discovers that throughout history, the most important physicists have studied both phenomena equally. It is for this reason that this second phase of the research sets itself as a main objective to analyse the different theories in physics on the nature of gravity and light from ancient times till the XX century.

II. Objective.

II. Development. The analysis is structured into three parts. In the first, dedicated to ancient times, the physics of the Greek philosopher Aristotle is analysed, due to his influence as of the XV century. The second part focuses on the scientific revolution in the XVII century, which culminated in Isaac Newton's theories. The last part studies the modern physics of the XIX century, which, at the beginning of the XX century, lead to Albert Einstein's revolutionary ideas.

The approach to the knowledge of the physics of gravity is a history built on big theories and big voids. Its development can't be understood as an evolution of ideas throughout time, but as a succession of different unconnected theories that are radically opposed to their predecessors, which, , have progressively described the observed facts with more accuracy. In the evolution of the comprehension of the physics of gravity throughout history, one can distinguish three principal stages. In the first place we find the Aristotelian explanation that confuses gravity with weight, explaining it as a tendency of the terrestrial elements to steer, by simple affinity, towards the centre of the earth. A second phase would be Newton's universal gravitational law, according to which gravity is a mutual force of attraction that acts instantly on every matter, and whose intensity is directly proportional to the product of the masses and inversely proportional to the square of the distance that separates it. In the last stage, Einstein's general relativity conceives gravity as the law that

desde el ámbito de la historia de la física se han caracterizado por su parcialidad pues, o se han centrado en el estudio pormenorizado de las teorías desarrolladas por un científico en concreto, o se han acotado a un determinado momento histórico, o se han limitado al estudio de uno de los dos fenómenos. Esta parcialidad resulta cuanto menos sorprendente cuando se descubre que, a lo largo de la historia, los físicos más importantes han estudiado ambos fenómenos por igual. Es por ello que esta segunda fase de la investigación se impone como principal objetivo *el análisis de distintas teorías físicas sobre la naturaleza de la gravedad y la luz desde la antigüedad clásica hasta el siglo XX.*

II. Objetivo.

Este análisis se estructura en tres partes. En la primera, dedicada a la antigüedad clásica, se analiza principalmente la física del filósofo griego Aristóteles por la influencia que tuvo a partir del siglo XV. La segunda parte se centra en la revolución científica del siglo XVII, que culmina con las teorías de Isaac Newton. Por último se estudia la física moderna del siglo XIX que, a principios del XX, da lugar a las revolucionarias ideas de Albert Einstein.

II. Desarrollo.

La aproximación al conocimiento físico de la gravedad es una historia construida en base a grandes teorías y grandes vacíos. Su desarrollo no puede entenderse tanto como la evolución de una idea a lo largo del tiempo, sino como la sucesión de distintas teorías inconexas y radicalmente distintas a sus predecesoras que, una vez tras otra, han descrito con más acierto que las anteriores los hechos observados. En la evolución de la comprensión física de la gravedad a lo largo de la historia pueden distinguirse tres grandes etapas. En primer lugar encontramos la explicación aristotélica, que confunde la gravedad con el peso, explicándolo como la tendencia de los elementos terrestres a dirigirse, por simple afinidad, hacia el centro de la tierra. Un segundo momento lo constituye la ley de gravitación universal de Newton, según la cual la gravedad es una fuerza de atracción mutua que actúa instantáneamente sobre toda la materia y cuya intensidad es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Por último, en la relatividad general Einstein concibe la

governs the geometrical structure of space under the effect of the masses.

The history of the knowledge of the physics of light is more incoherent. From the first reflections of the Greek thinkers, different conceptions of light have arisen and, one way or another, have been developed throughout history. Different and totally opposed theories have coexisted in total dispute over long periods of time. Nevertheless, none of the theories managed to be formulated with enough strength, which adds to the permanently provisional character of the reflection of the nature of light. For Aristotle light was the “updating” of the clear sky; for Kepler it was a sort of intangible virtue of the body; for Descartes and Huygens it was a faint ethereal wave; Newton conceived it as the projection of a minute corpuscle; for Faraday and Maxwell light was an electromagnetic wave; and Einstein conceptualized it as a “quantum” of energy that behaved sometimes as a particle, and sometimes as a wave, depending on the observed phenomena.

II. Conclusions. One way or another, gravity and light have always been understood as opposing physical phenomena of nature. However, in their willingness to understand the physical nature of the world, the brilliant minds of physicists have tried to elaborate a coherent and joint explanation of the efficient cause and nature of both phenomena, two primitive realities that govern our own reality.

II. Contributions. The synthesis elaborated from the joint evolution of the scientific theories on gravity and light that have been produced throughout history, to where the horizon of this research reaches, is unprecedented. Therefore, this becomes the second contribution of this work. In addition, the following specific contributions should be noted: the exposure of the particular features of the different historical developments of the physical comprehension of gravity and light; the identification of the inherently opposed ontological character

gravedad como la ley que rige la estructura geométrica del espacio bajo la acción de la masa.

La historia del conocimiento físico de la luz es más confusa. De las primeras reflexiones de los pensadores griegos surgen distintas concepciones sobre la luz que, de un modo u otro, han ido desarrollándose a lo largo de la historia. Durante largos periodos llegan a coexistir, en absoluta disputa, teorías distintas y diametralmente contrapuestas. Sin embargo, ninguna de estas teorías llega nunca a formularse con suficiente solidez, lo que sume a la reflexión sobre la naturaleza de la luz en un estado de permanente provisionalidad. La luz fue para Aristóteles la “actualización” del diáfano; para Kepler, una suerte de virtud corporal inmaterial; para Descartes y Huygens, una onda etérea; Newton la concibió como la proyección de un diminuto corpúsculo; para Faraday y Maxwell la luz era una onda electromagnética; y Einstein la conceptualizó como un “cuanto” de energía que se comportaba unas veces como una partícula y otras como una onda, según el fenómeno observado.

De un modo u otro, la gravedad y la luz han sido entendidas siempre como fenómenos físicos de naturaleza contrapuesta. Sin embargo, en su voluntad de comprender la naturaleza física del mundo, las mentes más brillantes de la física han intentado elaborar una explicación coherente y conjunta sobre la causa eficiente y la naturaleza de ambos fenómenos, dos realidades primigenias que rigen por completo nuestra existencia.

II. Conclusiones.

La síntesis elaborada de una evolución conjunta de las teorías científicas sobre la gravedad y la luz que se han sucedido a lo largo de la historia hasta donde alcanza el horizonte de la presente investigación es inédita; lo cual constituye la principal aportación de la segunda parte del trabajo. Además, como aportaciones específicas, cabe señalar: la exposición de las características particulares del distinto desarrollo histórico de la comprensión física de la gravedad y la luz; la identificación del carácter ontológico inherentemente contrapuesto de ambas realidades físicas; y el descubrimiento de que, de un modo u otro, siempre se ha reconocido la posibilidad de la interacción física de

II. Aportaciones.

of both physical realities; and the discovery that, one way or another, the possible physical interaction between both phenomena has always been recognised, as is the necessity to coherently explain their physical nature within the same theoretical structure.

II. Continuity of the research.

The value of the second part of the research doesn't lie so much in its thoroughness as in the originality of its approach, since it is hard to find other research works that point out a joint historical evolution of the physical knowledge of gravity and light. Due to the expanse and conceptual nature of the objective that this second part of the current research outlined, the inability to exhaust such a topic in a doctoral thesis encompassed in the field of architecture was obvious from the beginning. For this very reason, this second part of the current research should be an encouragement for the development of future investigation that, from the scope of the history of science, could analyse with more precision and depth the evolution of the physical comprehension of both phenomena in particular authors or historical moments.

III. THIRD PART.

IV.3. The Structuring of architectural space through gravity and light

III. Objective.

The third part of this research constitutes the application of the previous reflections to the field of architecture. The main objective is the analysis of the design strategies engaged in the architectural manipulation of the structural interaction between gravity and light for spatial purposes.

III. Development.

This analysis is based on a personal interpretation of Sigfried Giedion's theory on the different spatial conceptions throughout history. Four spatial conceptions are distinguished depending on their interior and/or exterior conditions, according to the relationship between light and shade in the configuration of the architectural space. While luminously

ambos fenómenos, así como la necesidad de explicar coherentemente su naturaleza física dentro de una misma estructura teórica.

El valor de esta segunda parte de la investigación no reside tanto en su exhaustividad como en la originalidad de su planteamiento, pues apenas existen trabajos de investigación que señalen la evolución histórica conjunta del conocimiento físico sobre la gravedad y la luz. Tanto por su extensión como por su naturaleza conceptual, el desarrollo completo del objetivo que se plantea esta segunda parte de la presente investigación se antojaba ya desde un principio como una tarea inabarcable para una tesis doctoral encuadrable en el ámbito del proyecto arquitectónico. Precisamente por ello, esta segunda parte de la presente tesis doctoral debería servir para animar al desarrollo de futuras investigaciones que, desde el ámbito de la historiografía de la ciencia, pudieran analizar con la máxima precisión y profundidad la evolución de la comprensión física de ambos fenómenos en determinados autores o momentos históricos.

IV.3. La estructuración del espacio arquitectónico por la gravedad y la luz

La tercera parte de la presente investigación constituye sin duda la aplicación de las reflexiones anteriores al ámbito del proyecto arquitectónico. Se impone como objetivo *el análisis de las estrategias proyectuales empleadas en la manipulación arquitectónica de la interacción estructural entre la gravedad y la luz con fines espaciales.*

Este análisis se fundamenta en una particular interpretación de la teoría que Sigfried Giedion elabora sobre las distintas concepciones espaciales que se han sucedido a lo largo de la historia. Así, en la presente tesis doctoral se identifican cuatro concepciones espaciales que se distinguen por su condición interior y/o exterior, de acuerdo con la relación que se establece entre la luz y la sombra en la configuración del espacio arquitectónico. En tanto que lumínicamente opaca, esta relación de contraposición viene definida por la estructura portante, cuya constitución responde al desarrollo

II. Continuidad de la investigación.

III. TERCERA PARTE.

III. Objetivo.

III. Desarrollo.

opaque, this opposing relation is defined by the supporting structure, whose constitution responds to technological development and the conceptual understanding of the gravitational phenomena as a physical phenomenon of each period in history. The architectural structure thus transcends its unavoidable static-resistant function and its physical-material condition, and becomes the common link between shape and matter that, making gravity interact with light, makes the construction of space possible.

Finally, the realisation that all the authors analysed in the first part have shown an interest in the physical condition of gravity and light, demonstrates the convenience of basing the study of the spatial-structural importance of both phenomena, on the analysis carried out in the second part of the present study of the evolution of scientific knowledge of both physical realities.

The first spatial conception is developed from prehistory up to classical Greece. During this first, basically pre-scientific, stage there is no notion of “gravity” as a natural law. Instead, this is identified with the manifestation of their more evident phenomena: weight and fall. Architecture counters the inherent verticality of gravity with the necessary horizontalness to cover space. The preference for this first spatial conception for exterior space, by definition open and uncovered, can be due to the huge technical difficulty that resisting the weight of the material to cover the space entails. The exterior space typical to this first conception is organised as a space of projected shadows on a background of solar light.

The second spatial conception begins in the Roman times and extends to the XVIII century. The Romans not only discover the notion of gravity as a physical reality, but they also sense its eminently curved nature. They realise then the convenience of incorporating this curvature to the spatial covering elements so as to guide –instead of resisting- the effects of gravity. The lintel and the sloped roof give way

tecnológico y a la comprensión conceptual del fenómeno gravitatorio en tanto que fenómeno físico de cada momento. La estructura arquitectónica trasciende así su ineludible función estático-resistente y su condición físico-material, para devenir el vínculo común a la forma y la materia que, haciendo interactuar a la gravedad con la luz, hace posible la construcción del espacio.

En aras de una mayor claridad expositiva, el estudio de la relación estructural entre la gravedad y la luz que caracteriza a cada una de las cuatro concepciones espaciales identificadas se ha acotado y vehiculado a través del análisis de una obra maestra de la arquitectura que, más allá de sus particularidades concretas, se constituye en ejemplo paradigmático de una determinada manera de manipular arquitectónicamente la interacción física entre la gravedad y la luz a través de la estructura con fines espaciales.

Por último, la percatación de que todos los autores analizados en la primera parte de la presente investigación han mostrado de algún modo un cierto interés por la condición física de la gravedad y de la luz, evidencia la conveniencia de fundamentar el estudio sobre la importancia espacio-estructural de ambos fenómenos en el análisis realizado en la segunda parte de la presente tesis doctoral en torno a la evolución del conocimiento científico sobre ambas realidades físicas.

La primera concepción espacial se desarrolla desde la prehistoria hasta la Grecia clásica. Durante esta primera etapa, básicamente pre-científica, no se tiene la noción de “gravedad” como ley natural, sino que dicha noción se identifica con la manifestación de sus fenómenos más evidentes: el peso y la caída. La arquitectura contrapone a la inherente verticalidad de la gravedad la necesaria horizontalidad de la cubrición espacial. La preferencia de esta primera concepción espacial por el espacio exterior, por definición abierto y descubierto, puede deberse a la enorme dificultad técnica que supone resistir al peso de la materia que cubre el espacio. El espacio exterior propio de esta primera concepción se configura como un espacio de sombras proyectadas sobre un fondo de luz solar.

to the arch, the vaulted ceiling and the dome, in which the weight becomes part of the solution that makes the spatial covering possible. With their weight, these structural forms support, close and cover an introverted and isolated space from its adjoining context, and by means of their opacity, the structure constructs a shadow in which, conveniently manipulated, daylight is revealed. The space of this second spatial conception is organised as an interior space where light is revealed in the previously built shadow.

The third spatial conception is developed during the XIX century. The invalidation of the theoretical foundations of Newton's Universal Gravitational Law –the ultimate mathematical expression of the scientific representation of gravity as a synonym of weight and curvature- was accompanied by an unprecedented enthusiasm for the study of the physical nature of light. In an analogous fashion, architecture is flooded with light while simultaneously questioning the classic attributes of weight and support, through the erection of big metal structures in which the replacement of the mass for the line allows for the building of more space with less gravity. Combining the transparency of light and the weight of gravity, glazing allows the opening of space towards the exterior and flooding it with light, without having to give up the protection from exterior agents. The space of this third spatial conception becomes an interior that is luminously exterior.

The fourth spatial conception is developed throughout the XX century, when the European avant-garde movements consciously incorporate into architecture the postulates on gravity and light of the Relativistic physics. Architecture integrates the inherent levity of Einstein's gravity to a structural form that, through abstraction, is stripped of any formal or tectonic element that could refer to the idea of heaviness. The horizontal plain that forms the cover withdraws the solar light from its natural vertical direction and its capacity to generate a shadow, transforming it in an abstract interior clarity. The

La segunda concepción espacial se inaugura en época romana y se prolonga hasta el siglo XVIII. Los romanos no sólo descubren la noción de gravedad como realidad física, sino que intuyen su naturaleza eminentemente curva. Se advierte entonces la conveniencia de incorporar esta curvatura a las formas de cubrición espacial a fin de encauzar -en vez de resistir- a los efectos de la gravedad. El dintel y la cubierta inclinada dejan paso al arco, la bóveda y la cúpula, en las que el peso deviene en parte de la solución que hace posible la cubrición espacial. Con su masa estas formas estructurales portan, cierran y cubren un espacio introvertido y aislado de su contexto inmediato, y por medio de su opacidad la estructura construye una sombra en la que, convenientemente manipulada, se manifiesta la luz solar. El espacio de esta segunda concepción espacial se configura como un espacio interior donde la luz se manifiesta en la sombra previamente construida.

La tercera concepción espacial se desarrolla durante el siglo XIX. La invalidación de los fundamentos teóricos de la Ley de Gravitación Universal de Newton -la máxima expresión matemática de la representación científica de la gravedad como sinónimo de pesantez y curvatura- viene acompañada de un entusiasmo sin precedentes por el estudio de la naturaleza física de la luz. De manera análoga, la arquitectura se inunda de luz al mismo tiempo que pone en crisis los clásicos atributos del peso y el apoyo por medio de la erección de grandes estructuras metálicas en las que la sustitución de la masa por la línea permite construir más espacio con menos gravedad. Aunando la transparencia de la luz y el peso de la gravedad, el cerramiento de cristal permite abrir el espacio al exterior e inundarlo de luz sin tener que renunciar a la protección contra los agentes exteriores: el espacio de esta tercera concepción espacial deviene así en un interior lumínicamente exterior.

La cuarta concepción espacial se desarrolla a lo largo del siglo XX, cuando las vanguardias artísticas europeas incorporan conscientemente a la forma arquitectónica los postulados de la física relativista sobre la gravedad y la luz. La arquitectura integra la inherente levedad de la gravitación einsteiniana a una forma estructural que,

transparency of vertical enclosure allows the opening up of the modern space into the exterior without it losing its interior character, combining the transitivity and the openings typical of the XIX century with the spatial dichotomy between the interior and exterior that characterises the previous stages. Interior and exterior aren't segregated or merged but, maintaining their own entity, they are linked together in a continuous way.

III. Conclusions. Both from the field of physics to the field of architecture, light and gravity have always been conceived as opposed realities: light relates to the igneous and ethereal, whereas gravity relates to the earthen and tellurian; light is associated with diaphaneity and transparency, gravity with opacity and darkness; light is linked to lightness and levity, gravity is linked to heaviness. From its beginnings, architecture has represented this contrast in different ways, sometimes emphasizing it, sometimes subverting it, highlighting or dimming the apparent action of gravity on the material through light or shade. But more importantly than the perceptive consequences of this architectural manipulation are the spatial consequences: the character of the architectural space depends, to a large degree, on the terms in which this physical-material interaction between gravity and light through the structural element occurs. In this sense, the evolution of architecture could be explained as the shifting of the importance from gravity to the supremacy of light, since throughout history architecture has always aspired to build more space with less gravity and more light.

III. Contributions. The exposition of the design strategies developed throughout history, destined to consciously manipulate the interaction of the phenomena of gravity and light on matter so as to define architectural space, becomes the main and most general contribution of this third part of the thesis.

In this sense, the theoretical reconstruction of the chronological and conceptual interrelationships between

por medio de la abstracción, se despoja de cualquier elemento formal o tectónico que pueda hacer referencia a la idea de pesantez. El plano horizontal que conforma la cubrición abstrae a la luz solar de su natural dirección vertical y su capacidad de generar sombra, a fin de transformarla en una abstracta claridad interior. La transparencia del cerramiento vertical permite abrir el espacio moderno al exterior sin que pierda su carácter interior, combinando la transividad y la apertura propias del siglo XIX con la dicotomía espacial entre interior y exterior que caracteriza a las etapas anteriores: interior y exterior ni se segregan ni se funden sino que, manteniendo su propia entidad, se vinculan entre sí de un modo continuo.

Tanto desde el ámbito de la física como de la arquitectura, la luz y la gravedad han sido siempre concebidas como realidades opuestas: la luz se relaciona con lo ígneo y lo etéreo, la gravedad con lo térreo y lo telúrico; la luz se asocia con la diafanidad y la transparencia, la gravedad con la opacidad y la oscuridad; la luz se vincula a la ligereza y la levedad, la gravedad está íntimamente vinculada a la pesantez. Desde sus inicios, la arquitectura ha representado esta contraposición de maneras muy distintas, unas veces enfatizándola, otras subvirtiéndola, subrayando o atenuando por medio de la luz o la sombra la acción aparente de la gravedad sobre la materia. Pero más importantes que las consecuencias perceptivas de esta manipulación arquitectónica son sus consecuencias espaciales: el carácter del espacio arquitectónico depende, en gran medida, de los términos en que se produce la interacción físico-material entre la gravedad y la luz a través del elemento estructural. En este sentido, la evolución de la arquitectura podría explicarse como el desplazamiento del protagonismo de la gravedad hacia la primacía de la luz, pues a lo largo de la historia la arquitectura ha aspirado siempre a construir más espacio con menos gravedad y más luz.

III. Conclusiones.

La exposición del conjunto de estrategias proyectuales desarrolladas a lo largo de la historia, destinadas a manipular conscientemente la interacción de los fenómenos de la gravedad y de la luz sobre la materia a fin de conformar el espacio arquitectónico, se constituye en la principal y más general aportación de esta tercera parte de la investigación.

III. Aportaciones.

the evolution of the physical representation of gravity and light and the evolution of the different spatial architectural conceptions becomes a matter of special interest. The exposition of the terms in which scientific knowledge has influenced the architectural manipulation of both physical phenomena becomes, undoubtedly, the most important and original contribution of this investigation, not so much for its strictly theoretical character, but for the possibility of using it as a design tool.

The interpretation of Sigfried Giedion's theory of spatial conceptions based on the characterization of space, interior or exterior, as its relation with light and shade should be noted as a specific theoretical contribution. Moreover, another specific contribution is the finding of the three necessary factors for the starting and subsequent development of a new architectural spatial conception: 1) the need to satisfy new demands of spatial order; 2) the development of new structural and constructive possibilities, and 3) the development of a new way of conceiving and describing the physical nature of the world.

The analytical scheme specifically developed in this research for the study of spatial conceptions in relation to space-structure interaction of gravity and light that represents the four selected works, also becomes an important contribution, as it enhances a methodology of general analysis applicable to the study of any work of architecture.

III. Continuity of the research.

Due to the impossibility of encompassing the studied subject matter in a single investigation, it would be advisable to delve deeper into the analysis of the historical, current and future design strategies, destined to consciously manipulate the structural interaction between gravity and light for spatial purposes. Apart from elaborating on the interrelationship between the physical knowledge of gravity and light and its architectural manipulation, it would also be interesting

En este sentido, la reconstrucción teórica de la correlación cronológica y conceptual existente entre la evolución de la representación física de la gravedad y de la luz y la evolución de las distintas concepciones espaciales arquitectónicas deviene una cuestión de especial interés. La exposición de los términos en que se ha producido la influencia de este conocimiento científico en la manipulación arquitectónica de ambos fenómenos físicos se constituye, sin lugar a dudas, en la más importante y original aportación de esta investigación, no tanto por su condición estrictamente teórica, sino por la posibilidad de ser empleada como herramienta proyectual.

Como aportación teórica específica debe señalarse la interpretación de la teoría de las concepciones espaciales de Sigfried Giedion en base a la caracterización del espacio, interior o exterior, según su relación con la luz y la sombra.

Por otra parte, debe señalarse también como aportación importante el hallazgo de los tres factores necesarios para el nacimiento y posterior desarrollo de una nueva concepción espacial arquitectónica: 1) la necesidad de satisfacer nuevas demandas de orden espacial; 2) el desarrollo de nuevas posibilidades estructurales y constructivas y 3) el desarrollo de una nueva manera de concebir y describir la naturaleza física del mundo.

El esquema analítico específicamente desarrollado en la presente investigación para el estudio de las concepciones espaciales en relación a la interacción espacio-estructural de la gravedad y la luz que caracteriza a las cuatro obras seleccionadas, se constituye también en una importante aportación, en tanto que deviene en una metodología de análisis genérica aplicable al estudio de cualquier obra de arquitectura.

Dada la imposibilidad de abarcar el tema objeto de estudio en una sola investigación, convendría seguir ahondando en el análisis de las estrategias proyectuales históricas, actuales y futuras, destinadas a manipular conscientemente la interacción estructural entre la gravedad y la luz con fines espaciales. Además de seguir

III. Continuidad de la investigación.

to analyse other important questions both for physics and architecture, as is the idea of space, the notion of matter or the concept of energy.

Moreover, any work destined to raise awareness in the architectural community of the importance of being attentive to new findings in the sphere of physics, or divulging the physical knowledge of questions that directly concern architecture, would also be an invaluable future contribution. Likewise, any technical or design research on the development of transparent or changeable structures would constitute a significant contribution to the development of a possible new architectural paradigm that could potentially end the inherent historical opacity of the supporting elements.

End **IV.4. Epilogue**

The verification that there isn't a single architectural construction in the world that while creating space has been able to elude the forces of terrestrial gravity, or do without the effects of solar light, demonstrates the importance and the opportunity of a doctoral investigation on the structuring of architectural space by gravity and light. Nevertheless, to delve into the foundations of architecture is like trying to describe a natural law: any attempt of contemplation will soon discover the impossibility of reaching the ultimate objective and will only be able to reach a simple theoretical approximation that, in the end, will be revealed as a false or incomplete intellectual construct: such is the temporary and perfectible nature of scientific knowledge. The corroboration of this circumstance shows that the importance of a research of this kind doesn't lie so much in the irrefutability of the assumed results that might derive from it, but in the coherence, the objectivity and the accuracy of the reflections posed.

Through the analysis of the historical origins and the

profundizando en la correlación que existe entre el conocimiento físico de la gravedad y la luz y su manipulación arquitectónica, sería muy enriquecedor analizar también otras cuestiones importantes tanto para la física como para la arquitectura, como podría ser la idea de espacio, la noción de materia o el concepto de energía. Por otra parte, cualquier trabajo destinado a concienciar a la comunidad arquitectónica de la importancia de permanecer atentos a los nuevos hallazgos realizados en el ámbito de la física, así como a divulgar el conocimiento físico sobre las cuestiones que atañen directamente al hecho arquitectónico, supondría también una inestimable aportación futura. Así mismo, cualquier investigación técnica o proyectual sobre el desarrollo de las estructuras transparentes o transparentables, constituiría también en una contribución significativa al desarrollo de un posible nuevo paradigma arquitectónico que podría dar fin a la inherente opacidad histórica de la materia portante.

IV.4. Epílogo

Final

La constatación de que no existe una obra de arquitectura en el mundo que, en su afán por delimitar el espacio, haya podido eludir los efectos de la gravedad y de la luz sobre la materia que la conforma, advierte de la importancia y la oportunidad de la presente investigación doctoral sobre *la estructuración del espacio arquitectónico por la gravedad y la luz*. Sin embargo, ahondar en los fundamentos de la arquitectura es como pretender describir una ley natural: cualquier intento de reflexión descubrirá pronto la imposibilidad de alcanzar su objetivo último y se verá limitado a una mera aproximación teórica que, finalmente, acabará demostrándose como un constructo intelectual falso o incompleto: tal es la naturaleza temporal y perfectible del conocimiento científico. De la constatación de esta circunstancia se descubre que la importancia de una investigación de este tipo no reside tanto en la incontestabilidad de los supuestos resultados que de ella pudieran derivarse, sino en la coherencia, la objetividad y el rigor de las reflexiones planteadas.

theoretical principles of the architectural reflections around gravity and light, the analysis of the evolution of the scientific comprehension of both physical realities, and the study of the design strategies destined to consciously manipulate the structural interaction between gravity and light for spatial purposes, this research has tried to contribute with its own theoretical and design reflections on both questions that some of the most prestigious Spanish architects have been developing in the last decades.

Nevertheless, due to the extent of the subject and the youth of the author, the current doctoral thesis must be understood to be the starting point for a professional and academic career yet to be built: space, gravity and light are fundamental topics in the theoretical reflections and the practical design methods that will always go hand in hand with the practice of architecture.

Por medio del análisis del origen histórico y los principios teóricos de la reflexión arquitectónica en torno a la gravedad y la luz, del análisis de la evolución de la comprensión científica de ambas realidades físicas, y del estudio de aquellas estrategias proyectuales destinadas a manipular conscientemente la interacción estructural de la gravedad y de la luz a fin de conformar el espacio arquitectónico, la presente investigación ha intentado realizar su propia aportación al conjunto de reflexiones teóricas y proyectuales sobre ambas cuestiones que algunos de los más prestigiosos arquitectos de nuestro país han venido desarrollando durante las últimas décadas.

Sin embargo, por la inabarcabilidad del tema y la juventud del autor, la presente tesis doctoral debe entenderse como el punto de partida de una trayectoria profesional y académica aún por construir: el espacio, la gravedad y la luz son temas fundamentales en la reflexión teórica y la práctica proyectual que acompañarán siempre al quehacer arquitectónico.

El presente anexo pretende dejar constancia de las principales ideas y referencias bibliográficas que han estimulado la presente investigación. Para ello, se han recopilado citas, aforismos y textos de muy diversos autores -la mayoría de ellos arquitectos- sobre la relación estructural entre la gravedad y la luz. El contenido se ha clasificado en distintos apartados temáticos con la finalidad de facilitar su consulta, organizando alfabéticamente el contenido de cada apartado por autores.

<i>V.1. Arquitectura, gravedad y luz.....</i>	<i>591</i>
<i>V.2. La relación estructural entre la gravedad y la luz.....</i>	<i>598</i>
<i>V.3. Sobre la gravedad.....</i>	<i>601</i>
<i>V.4. La importancia de la gravedad en la forma estructural.....</i>	<i>605</i>
<i>V.5. Sobre la luz y el espacio arquitectónico.....</i>	<i>612</i>
<i>V.6. La luz y la forma de la estructura.....</i>	<i>622</i>
<i>V.7. Luz y sombra, percepción y espacialidad.....</i>	<i>631</i>
<i>V.8. La ambigüedad material de la luz.....</i>	<i>634</i>

El crecimiento de todo ser vivo es una lucha contra la gravedad, buscando la luz. Por tanto parece lógico que, como espacio para vivir que es, la arquitectura haya surgido contra la gravedad y buscando la luz, desde Stonehenge hasta la Ópera de Sydney.

APARICIO GUIADO, Jesús María: *Construir con la razón y los sentidos*. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 79

APARICIO GUIADO, Jesús M.

La gravedad, junto con el hombre y la luz, son los máximos exponentes de los invariantes de la Arquitectura en todos los lugares y todos los tiempos.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Aprendiendo a pensar*. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p.81. *Cuando el horizonte se mueve*.

¿No es la LUZ el único medio capaz de hacer ingravida la insoportable gravedad de la materia?

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 44. *Esencialidad: Más con menos, 1992*

CAMPO BAEZA, Alberto

La LUZ, como la GRAVEDAD, es algo inevitable. Afortunadamente inevitable, ya que en definitiva, la Arquitectura marcha a lo largo de la Historia gracias a esas dos realidades primigenias: LUZ y GRAVEDAD. Los arquitectos deberían llevar siempre consigo la BRÚJULA (dirección e inclinación de la LUZ), y el FOTÓMETRO (cantidad de LUZ), como siempre llevan el metro, y el nivel, y la plomada. Y si la lucha por vencer, por convencer a la GRAVEDAD, sigue siendo un diálogo con ella del que nace la Arquitectura, la búsqueda de la LUZ, su diálogo con ella, es la que pone ese diálogo en sus niveles más sublimes.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 57.

Architectura sine luce nulla architectura est: Sobre la luz, 1992

Son la GRAVEDAD, que construye el Espacio, que hace relación al Espacio, y la Luz, que construye el Tiempo, que da razón del Tiempo, cuestiones centrales de la Arquitectura. El control de la Gravedad, y el diálogo con la Luz. El futuro de la Arquitectura dependerá de una posible nueva comprensión de esos dos fenómenos. O mejor que nueva, de un más claro y más profundo entendimiento. (...) La revolución que han supuesto en los últimos tiempos los nuevos materiales, el vidrio y el acero, ha sido una revolución relativa a una diversa comprensión y resolución de los temas de Luz y de Gravedad. Ambas afortunadamente ineludibles para la arquitectura. La lucha con la Gravedad, su dominio y con él el del Espacio, seguirá siendo tema claro del futuro de la Arquitectura. Afortunadamente ineludible, todo consistirá en cómo seguir controlándola. (...) Se tratará en todo caso ¡qué sencillo! de encauzar esa G que estudiábamos de pequeños en la Física. Esa G que es real como la tierra misma a la que todo lo material tiende a volver, y siempre vuelve. El diálogo con la Luz será el otro gran tema. Cuando el dominio de la Luz ha sido el argumento de toda la Historia de la Arquitectura, ahora que ya tenemos medios para controlarla, parece que la mayoría de los arquitectos se hubieran olvidado de ella. (...) El futuro de la Arquitectura será tanto mejor cuanto los arquitectos reflexionen con más rigor sobre ello y obren en consecuencia.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a*

la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 32. *Un minuto antes de la última explosión: Sobre el futuro de la Arquitectura, 1993*

La LUZ y la GRAVEDAD como temas centrales de la ARQUITECTURA.

La LUZ que construye el TIEMPO.

La GRAVEDAD que construye el ESPACIO.

La LUZ con su capacidad inefable de vencer a la GRAVEDAD.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 25. *Pensar o no pensar, ésta es la cuestión: Sobre el Arte de Proyectar y la manera de transmitirlo, 1994*

La Luz, material pero siempre en movimiento, es precisamente la única capaz de hacer que los espacios conformados por las formas construidas con material grávido floten, leviten. Hace volar, desaparecer la Gravedad. La vence. La insoportable pesantez de la materia inevitable e imprescindible sólo puede ser vencida por la Luz. La imponente masa del Panteón, cuya forma esférica ideal hace patente la potencia aplastante de ese espacio, al conjuro del sol que atraviesa el óculo magnífico, se levanta en inefable movimiento como si de una levitación se tratara. La Luz venciendo a la Gravedad convoca a la Belleza sublime.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 79. *Idea, luz y gravedad, bien temperadas: Sobre las bases de la Arquitectura, 1995*

GRAVEDAD. La G, la fuerza de la Gravedad. LA LUZ. La fuerza de la levedad.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires, Nobuko, 2009, pp. 33-34. *De la cueva a la cavaña. Sobre lo estereotómico y lo tectónico en arquitectura, 2003*

Entiendo que la Luz en la arquitectura desempeña un claro papel sobre la perfección conseguida con la sola Gravedad.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires, Nobuko, 2009, p. 36. *De la cueva a la cavaña. Sobre lo estereotómico y lo tectónico en arquitectura, 2003*

El privilegio que la arquitectura tiene frente a las otras artes, construya casas, iglesias o naves industriales, no es el de, dado un determinado

FOCILLON, Henry

vacío, dotarlo de ciertas condiciones, sino el de construir un mundo interno que mida el espacio y la luz según las leyes de una geometría, una mecánica y de una óptica, pero sobre el que la naturaleza no tiene ya influencia.

FOCILLON Henry: *La vie des formes*. París, 1934. Citado en ZEVI, Bruno: *Architettura in nuce: una definizione de architettura*. Madrid: Aguilar, 1969, p. 45

FRAMPTON, Kenneth

La interacción de la naturaleza con la cultura en la arquitectura se manifiesta, ante todo, a través de los efectos de la gravedad y la luz.

FRAMPTON, Kenneth: *Reflexiones sobre la autonomía de la arquitectura: una crítica a la producción contemporánea*. Criterios, La Habana, nº 31, enero-junio 1994, pp. 259-267

Tendemos a ignorar las consecuencias ontológicas de estas distinciones, es decir, del modo en que el entramado de la estructura tiende hacia lo aéreo, a la desmaterialización de la masa, mientras que cuando la forma de la masa es telúrica se asienta siempre en lo más profundo, dentro de la tierra. La primera tiende a la luz, mientras que la otra lo hace hacia la oscuridad. Estos opuestos gravitatorios, la inmaterialidad de la trama y la materialidad de la masa, pueden servir bien para simbolizar los dos opuestos cosmológicos a los que ellos aspiran: el cielo y la tierra. (...) El primero [lo pesado-estereotómico] implica muros de carga y tiende a la tierra y la opacidad. La segunda [ligero-tectónico] implica la desmaterialización de la trama y tiende al cielo y la translucidez. (...) De este modo la arquitectura relacionada con la tierra se extiende hacia arriba para convertirse en arco o bóveda.

FRAMPTON, Kenneth: *Labour, work and architecture: collected essays on architecture and design*. London, Phaidon, 2002, pp. 95 y 102

MARTÍ, Carlos

Vacchini nos habla de excavaciones, zócalos y plataformas para referirse a las transformaciones de la corteza terrestre; de muros, columnas y arcos para aludir a la construcción que se eleva sobre el suelo; de arquitrabes, cúpulas y tímpanos para describir su remate y su recorte contra el cielo. Sobre esta base material actúan una serie de sustancias sutiles como la luz, la distancia o el ritmo. Ellas son las que, en realidad, modelan la arquitectura, las que insuflan

esa tensión capaz de contrarrestar tanto la gravitación de la materia como su opacidad y su carácter inerte.

VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, pp. 8-9

Aunque construyan con luz y con peso, los arquitectos son constructores de sombras.

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís: *Intersecciones*. Alcorcón (Madrid): Rueda, 2004, p. 68

Te reirás, pero la obra es como una polea. En una cazoleta bajan el material y la luz, en la otra suben el significado y la sombra. Un hombre desde abajo, sin creerse del todo que él pueda ser el causante, tira de la sogá.

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís: *El libro de los cuartos*. Madrid: Lampreave, 2011, p. 213

Díganle a ese arquitecto que la luz no admite soborno. Que es más fácil engañar a la gravedad que a la luz.

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís: *El libro de los cuartos*. Madrid: Lampreave, 2011, p. 223

Mi interés radica en lo que hay entre las cosas y en lo que hay entre ellas y nosotros. El ámbito de operación de la arquitectura o de la pintura es el mundo físico, la materia, las energías, el cuerpo. Nos dedicamos a fabricar cosas, pero a mí me llama más la atención el espacio complementario: lo que las circunscribe, las rodea, las sostiene o las funda. Las cosas se vinculan entre sí (y nosotros a ellas) por algo tan difícilmente abarcable como la gravedad o la luz. (...) Así, a un escultor le interesaría más el bloque de piedra que la figura misma, o bien la luz movilizada en virtud de ésta, o la gravedad activada por su peso. Un techo o las figuras estructurales concretas canalizan el flujo energético de la gravedad, y hasta los mismos propioceptores del cuerpo resuenan y se estremecen durante la contemplación. (...) La arquitectura es el lugar de acogida de estas líneas que atraviesan en diagonal y horadan las producciones materiales, hasta involucrarnos.

NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante*, (2a Ed). Pre-textos de arquitectura, Girona, 2001, p. 37. *La geometría complementaria*, 1992

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís

NAVARRO BALDEWEG, Juan

Con respecto a la arquitectura y las demás artes, me gusta usar la expresión “naturaleza omnipresente” y considerar los modos en que el cuerpo y la mente perciben, asimilan y transmiten la experiencia. (...) No creo que seamos suficientemente conscientes de esta relación entre el cuerpo y el mundo, en la que el aire, la luz, la gravedad e incluso el campo magnético son una parte esencial de nuestra experiencia.

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006*. Madrid: El Croquis, nº133, 2006, p. 7

William J.R. Curtis: Entonces, para usted, una de las ‘funciones’ de una obra de arte es realzar la experiencia y revelar esas fuerzas de la naturaleza (la gravedad, la luz, etcétera) de manera que puedan conmovernos.

Juan Navarro Baldeweg: Sí. Yo creo que eso es de lo que trata siempre el arte.

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006*. Madrid: El Croquis, nº133, 2006, p.8

El espacio carece de cualidades. Sus propiedades se explican por lo que sucede en él: la luz, la gravedad...

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Constelaciones. Transcripción de las conferencias impartidas por Juan Navarro Baldeweg dentro del ciclo “Perspectivas transversales” de la Cátedra Jorge Oteiza*.

Navarra: Universidad Pública de Navarra, Cátedra Jorge Oteiza, 2011, p. 16

PERRET, Auguste

Permanentes son las condiciones que impone la Naturaleza. Pasajeras las que impone el hombre. El clima, los materiales y sus propiedades, la estática y sus leyes, la óptica, sus deformaciones, el sentido eterno y universal de las líneas y de las formas imponen condicionantes que son permanentes. La función, los usos de los hombres, la moda impone condiciones que son pasajeras.

YÁÑEZ PARAREDA, Guillermo: *Arquitectura solar e iluminación natural: conceptos, métodos y ejemplos*. Madrid: Munilla-Lería, 2008, p. 5

SCHOPENHAUER, Arthur

Si consideramos ahora la arquitectura como arte bello (...) no podremos ver en ella otro fin que el de hacer intuitivas algunas de aquellas Ideas (...), a saber: la pesantez, la cohesión, la solidez,

la dureza, (...) y junto a ellas la luz, que en muchas partes es lo contrario a aquéllas. (...) Lo que en ella [la arquitectura] nos habla no es sólo la forma (...), sino antes bien aquellas fuerzas elementales de la Naturaleza, aquellas primeras Ideas. (...) Las obras de arquitectura presentan al mismo tiempo una cierta relación con la luz; adquieren doble belleza a la plena luz del sol, con el cielo azul como fondo. (...) Yo soy de la opinión de que la arquitectura está destinada a expresar, junto con la solidez y la gravedad, la esencia de la luz, completamente contraria a éstas. En efecto, como la luz está como aprisionada, cohibida, rechazada por las impenetrables masas variantemente configuradas, desarrolla su naturaleza y sus cualidades de la manera más pura y distinta con gran placer del espectador, puesto que la luz es la más deliciosa de las cosas.

SCHOPENHAUER, Arthur: *El mundo como voluntad y representación* (4a Ed). México: Porrúa, 1997, pp. 173-174. Libro Tercero, XLIII

La Belleza, la Firmeza y la Utilidad son los Principios; las dos primeras dependen de las Razones geométricas de la Óptica y la Estática; la tercera sólo da la Variedad.

WREN, Stephen: *Parentalia: or, Memoirs of the family of the Wrens* (1750), folio 351, Tratado I.

Ver SOO, Lydia M: *Wren's "tracts" on architecture and other writings*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, p. 154

WREN, Christopher

V.2. LA RELACIÓN ESTRUCTURAL ENTRE LA GRAVEDAD Y LA LUZ

CAMPO BAEZA, Alberto

Se descubre entonces, precisa y preciosa coincidencia, que la Luz es la única que de verdad es capaz de vencer, de convencer a la Gravedad. Y así, cuando el arquitecto le pone las trampas adecuadas al Sol, a la Luz, ésta, perforando el espacio conformado por estructuras que, más o menos pesantes, necesitan estar ligadas al suelo para transmitir la primitiva Fuerza de la Gravedad, rompe el hechizo y hace flotar, levitar, volar a ese espacio. Santa Sofía, el Panteón o Ronchamp, son pruebas tangibles de esta portentosa realidad.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 57.
Architectura sine luce nulla architectura est: Sobre la luz, 1992

Se entiende por arquitectura estereotómica aquélla en que la fuerza de la gravedad se transmite de una manera continua, en un sistema estructural continuo y donde la continuidad constructiva es completa. Es la arquitectura masiva, pétreo, pesante. La que se asienta sobre la tierra como si de ella naciera. Es la arquitectura que busca la luz, que perfora sus muros para que la luz entre en ella. (...) Se entiende por tectónica aquélla en que la fuerza de la gravedad se transmite

de una manera sincopada, en un sistema estructural con nudos, con juntas, y donde la construcción es articulada. Es la arquitectura ósea, leñosa, ligera. La que posa sobre la tierra como alzándose de puntillas. Es la arquitectura que se defiende de la luz, que tiene que ir velando sus huecos para poder controlar la luz que la inunda. (...) Es evidente que esta distinción se hace en base a una consideración “estructural” de la arquitectura.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires, Nobuko, 2009, p. 31. *De la cueva a la cavaña. Sobre lo estereotómico y lo tectónico en arquitectura, 2003*

Creo que el futuro está en una arquitectura (...) soportada en estructuras capaces de construir el espacio arquitectónico. Alumbrada por la luz capaz de construir el tiempo. Una arquitectura que domine la gravedad y la luz.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires, Nobuko, 2009, p. 39. *El soplo de un aura suave. Sobre el descubrir las claves de la Arquitectura del futuro, 2003*

Y así no me canso de repetir que la ESTRUCTURA, la estructura portante, más que sólo transmitir las cargas del edificio a la tierra por causa de la ineludible gravedad, lo que verdaderamente transmite es el orden del espacio, ESTABLECE EL ORDEN DEL ESPACIO, construye el espacio. La estructura no sólo SOPORTA, no sólo AGUANTA, sino que bien resuelta, afinada, está esperando el ser atravesada por la LUZ y por el AIRE para, como un buen instrumento musical SONAR, y sonar bien. Y así será falsa la libertad del arquitecto que, olvidado de la estructura, concite sólo formas a las que, una vez definidas, añadiera o mandara añadir una estructura capaz de soportarlas.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires, Nobuko, 2009, p. 63. *La estructura de la estructura: Sobre la estructura que establece el orden del espacio, 2008*

La estructura resiste y, a la vez, revela el impacto de la gravedad en su forma, mientras que la luz revela, por así decir, la naturaleza intrínseca de la estructura.

FRAMPTON, Kenneth: *Reflexiones sobre la autonomía de la arquitectura: una crítica a la producción contemporánea*. Criterios, La Habana, nº 31, enero-junio 1994, pp. 259-267

FRAMPTON, Kenneth

NAVARRO BALDEWEG, Juan

En muchos proyectos se han trabajado las estructuras como piezas de gravedad al unísono con la luz para sugerir esas experiencias de peso e ingravidez.

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 16. *La Caja de resonancia*

Ninguna fuerza de la naturaleza se presenta a la humanidad de una forma más directa que la gravedad, ninguna ha atraído hacia su estudio durante siglos a pensadores más grandes y ninguna ha abierto -y continúa abriendo- mayores perspectivas.

WHEELER, John Archibald: *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza Editorial, 1994, p. 3

ARCHIBALD WHEELER, John

Este trabajo trata de la gravedad en la arquitectura. De la gravedad entendida más como elemento específico con el que adjetivar la arquitectura que como fenómeno físico; como una condición que, además de explicar muchas cuestiones sobre la forma arquitectónica, puede subrayarse, negarse, o, sencillamente, ignorarse. La gravedad, no sólo como contingencia sino como realidad compositiva, ha estado siempre presente en el léxico arquitectónico -la basa de una columna alude en su forma al peso que soporta-, pero esta condición puede ser manipulada en una u otra dirección con fines específicamente arquitectónicos, alcanzando en este sentido la acepción más profunda de la

ARNUNCIO PASTOR, Juan C.

palabra arquitectura. De hecho, cabría formular una historia de la arquitectura desde esta consideración: desde la cualidad del espacio arquitectónico en cuanto a cómo éste explica su condición de pesar.

ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: *Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum*.

Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 11

Tal vez la máxima sensación de opresión que podamos percibir en un sentido espacial sea la derivada de tener conciencia de que sobre nosotros gravita un gran peso.

ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: *Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum*.

Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 82

La sensación de peso o liviandad que emana de la forma y disposición del techo es, seguramente, una de las características más recurrentemente utilizadas en la arquitectura, quizá por la evidencia de que, de entre los límites de un espacio, el que gravita sobre nosotros es el más proclive a incidir en las características perceptivas de ese espacio. De cuantos “acontecimientos” pueden surgirnos en suelos, paredes o techos, en un espacio que ocupásemos eventualmente, es de estos últimos de los que más difícilmente podríamos escapar. Tal vez por ello, la cualidad de lo que gravita sobre nuestras cabezas es la que mayor incidencia emocional llega a tener en un sentido perceptivo.

ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: *Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum*.

Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 83-84

CAMPO BAEZA, Alberto

La Gravedad de la que afortunadamente no nos podemos escapar. Aquella G que estudiábamos de pequeños en las fórmulas de la física. Sin la Gravedad, la Arquitectura, cuya Historia es una lucha por dirigirla, por dominarla, por vencerla, desaparecería. Se atomizaría. Sin la Gravedad no hay Arquitectura posible, pues su necesaria materialidad desaparecería.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 78. *Idea, luz*

y gravedad, bien temperadas: Sobre las bases de la Arquitectura, 1995

La ley de la gravedad, que rige los fenómenos físicos, convierte el peso en uno de los principales atributos de toda operación constructiva. De manera que construcción es sinónimo de peso: todo cuanto se erige sobre la superficie terrestre soporta un peso que hay que disponer de un modo equilibrado ya que en esa correcta disposición reside la garantía de estabilidad y durabilidad de cualquier construcción. Ahora bien, *la arquitectura*, en cuanto que *representación de la construcción*, no tiene por qué traducir la manifestación del peso de un modo directo e inmediato. La sensación de peso puede acentuarse o, por el contrario, virar hacia una sensación de levedad, usando para ello los propios recursos expresivos de la arquitectura, tal como ha venido ocurriendo desde la Antigüedad. De este modo, la búsqueda de la ingravidez se convierte en una constante aspiración estética de la arquitectura. Parece como si el dominio de la forma condujese de manera natural al arquitecto hacia una sublimación del peso que origina una fuerza ascendente capaz de contrarrestar visualmente el efecto gravitatorio. Un ejemplo lo tenemos en las grandes cúpulas de la Antigüedad como la del Panteón de Roma o la de Hagia Sofia en Estambul. El enorme esfuerzo constructivo que implica la erección de esas cúpulas se disimula y se compensa por medio de recursos arquitectónicos ligados al empleo de la luz, la textura y la geometría.

ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: *Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum*.

Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 9-10

La gravedad se siente cuando se crea la ilusión de la ingravidez y a la inversa.

Juan Navarro Baldeweg: "Entrevista a Juan Navarro", *Arquitecturas* (Madrid), núm. 247 (1988).

Citado en ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: *Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del*

Danteum. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 129

Los materiales con los que trabaja [la arquitectura] están desprovistos de espiritualidad; se trata de la pesada materia sometida a las leyes de la gravedad.

HEGEL, Georg Wilhelm Friedrich: *La Arquitectura* (3a Ed), Barcelona, Kairós, 2001, p. 21

MARTÍ ARÍS, Carlos

NAVARRO BALDEWEG, Juan

HEGEL, Georg Wilhelm Friedrich

ITO, Toyo Puede decirse que la arquitectura se evoca aquí por algo extremadamente transitorio: como una lámina transparente que envuelve el cuerpo humano, no tiene mucha materia ni implica un peso significativo.

ITO, Toyo: *Vórtice y corriente*, en A.D., vol. 62, 9/ 10, septiembre y octubre de 1992. Citado en SORIANO, Federico: *Sin-Peso*, en *Sin-Tesis*. Barcelona: Gustavo Gili, 2004, p. 64

KANDINSKY, Wasili El 'arriba' evoca la imagen de una mayor soltura, una sensación de ligereza, de liberación, finalmente la libertad misma. De estas tres propiedades relacionadas entre sí, tiene cada cual una experiencia propia. La 'soltura' niega la densidad. Cuanto más se acercan al límite superior del P(lano) B(ase), tanto más desligados aparecen los planos mínimos individuales. La 'ligereza' lleva a un aumento de tal propiedad interior: los planos mínimos individuales no sólo se van separando progresivamente, sino que cada cual pierde su peso y, en la misma medida, su poder de sustentación. Por el contrario, toda forma de cierta pesantez gana en peso al situarse en la parte inferior del PB. La nota de lo pesado adquiere un sonido más fuerte. La 'libertad' produce la impresión de 'movimiento' más liviano y la tensión juega más libremente. El 'ascenso' o la 'caída' gana en intensidad. La retención se reduce a un mínimo. El 'abajo' produce efectos totalmente contrarios: condensación, pesadez, ligazón. Cuanto más nos acercamos al límite inferior del PB, más espesa se vuelve la atmósfera, más cercanos se sitúan los pequeños planos mínimos, mientras que las formas mayores y más pesadas los soportan con menos esfuerzo. Dichas formas pierden peso, y la nota de la grave disminuye su sonido.

KANDINSKY, Wasili: *Punto y línea sobre el plano*. Barcelona: Labor, 1993. Citado en SORIANO, Federico: *Sin-Peso*, en *Sin-Tesis*. Barcelona: Gustavo Gili, 2004, p. 66

VACCHINI, Livio El destino de toda construcción es convertirse en túmulo.

VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 21. *Gizeh*

ZWEIG, Stefan Tan imposible nos resulta explicar el elemento prístino de la fuerza creadora, como en el fondo nos es imposible decir qué es (...) la fuerza de gravitación.

SWEIG, Stefan: *El misterio de la creación artística*. Madrid: Sequitur, 2010, p. 16

V.4. LA IMPORTANCIA DE LA GRAVEDAD EN LA FORMA ESTRUCTURAL

Se podría definir la arquitectura como una estructura que, equilibrando la fuerza de la gravedad, genera un espacio habitable para el hombre. La gravedad por tanto tiene una doble condición para el arquitecto: por un lado, es una fuerza contra la que luchan sus fábricas al erguirse sobre la tierra y desde este punto de vista es un obstáculo que impide la infinita posibilidad de la arquitectura; pero por otro, la gravedad es la fuerza que hace posible la realidad construida, de tal manera que sin gravedad muchas arquitecturas que son estables dejarían de serlo, se arruinarían sin necesidad del paso del tiempo. ¿Qué pasaría si la fuerza de la gravedad no existiera? Solamente funcionarían las estructuras anudadas o soldadas. Las estructuras a compresión no hubieran tenido sentido y el orden de la arquitectura, como el del hombre, no sería tal y como se conoce. A causa de la fuerza gravitatoria aparece el concepto de lo horizontal y lo vertical. (...) La arquitectura es la respuesta mecánica de una materia para contrarrestar su propio peso. Las distintas materias empleadas dan lugar a diferentes respuestas mecánicas, a las que también se denominan tipos estructurales. De este contrapeso de la materia, y los correspondientes tipos estructurales surge el equilibrio, la armonía.

APARICIO GUIADO, Jesús M.

(...) Se puede afirmar que mientras la gravedad da un carácter heterogéneo al espacio, al estar sometido a su fuerza, la levedad comporta la homogeneidad en el espacio. Si el espacio gravitatorio se ve polarizado por el arriba y por el abajo, por lo horizontal y lo vertical, un espacio sin gravedad, leve, es adireccional. (...) Dicho de otra manera, el espacio arquitectónico horizontal y el vertical es el resultado y la expresión de la gravedad.

APARICIO GUISSADO, Jesús María: *Construir con la razón y los sentidos*. Buenos Aires: Nobuko, 2008, pp. 76-79

ARNUNCIO PASTOR, Juan C.

El pilar constituye el primer elemento de la arquitectura. Su verticalidad señala el lugar, lo define, lo mide con su presencia. Su condición portante hace que su forma explicita el peso que soporta. Se trata del elemento que otorga verosimilitud a la arquitectura; que se refiere a su condición construida; que la sitúa en el terreno. El pilar, por su condición de soporte, no constituye únicamente un accidente en el espacio que nos ayudaría a medirlo, a pautarlo o a ritmarlo, sino que alude al papel que juega en un conjunto de otro orden. Un pilar de sección circular, bajo y ancho, plantea de un modo inmediato una lectura de las condiciones del espacio opuestas a las que daría lugar otro de gran esbeltez, por la diferente intuición de las condiciones de lo que soporta cada uno. Todo esto es obvio. Podríamos añadir la cualidad del techo que gravita sobre él y del suelo en el que se apoya, y entonces las posibilidades de establecer categorías espaciales se multiplicarían tanto como quisiéramos. Más aún si tomásemos en consideración el material, su cualidad, su forma o si reparásemos en cómo se apoya en el suelo.

ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: *Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, p. 70

La sensación de peso o liviandad que emana de la forma y disposición del techo es, seguramente, una de las características más recurrentemente utilizadas en la arquitectura, quizá por la evidencia de que, de entre los límites de un espacio, el que gravita sobre nosotros es el más proclive a incidir en las características perceptivas de ese espacio. De cuantos “acontecimientos” pueden surgirnos en suelos,

paredes o techos, en un espacio que ocupásemos eventualmente, es de estos últimos de los que más difícilmente podríamos escapar. Tal vez por ello, la cualidad de lo que gravita sobre nuestras cabezas es la que mayor incidencia emocional llega a tener en un sentido perceptivo.

ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: *Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum*.

Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007, pp. 83-84

La GRAVEDAD CONSTRUYE EL ESPACIO. Los ELEMENTOS materiales pesantes, que hacen reales las formas que conforman el espacio, tienen que acabar transmitiendo la Gravedad, el peso de su materialidad, a la tierra. El sistema gravitatorio sustentante, la estructura, es la que ordena el espacio, la que lo construye.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 78. *Idea, luz y gravedad, bien temperadas: Sobre las bases de la Arquitectura, 1995*

Es evidente que esta distinción [tectónico / estereotómico] se hace a base a una consideración “estructural” de la arquitectura. Veo cada día más claro la central importancia de la estructura, portante y transmisora de cargas y a la vez conformadora y ordenadora del espacio arquitectónico. La estructura es la respuesta material a la gravedad que, tantas veces he repetido, “construye el espacio”. (...) La G, la fuerza de la Gravedad, “construye el espacio”. La estructura portante no sólo transmite las cargas a la tierra sino que, sobre todo, establece el orden del espacio. La definición de la estructura portante, su establecimiento, supone un momento clave de la creación arquitectónica. Ya hemos visto antes como Frampton defiende este papel central de la estructura, de “la unidad estructural como la esencia irreductible de la forma”. Pues en ese sentido, en el gravitatorio, en el estructural, es en el que los conceptos de lo estereotómico y lo tectónico tienen su más claro entendimiento.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires, Nobuko, 2009, pp. 31-32. *De la cueva a la cavaña. Sobre lo estereotómico y lo tectónico en arquitectura, 2003*

La Gravedad es uno de los temas centrales de la Arquitectura. La g, el 9,8 que estudiara Isaac Newton con tanto ahínco, esa fuerza

CAMPO BAEZA, Alberto

imposible de evitar, es una de las cuestiones clave de la Arquitectura. (...) Cuando digo que la GRAVEDAD construye el ESPACIO, estoy hablando de la ESTRUCTURA, de la llamada estructura portante. De la estructura que a lo largo de la Historia ha generado el ESPACIO arquitectónico. Casi siempre la forma de la arquitectura ha sido, lógicamente, ligada a la estructura portante. Es más, estructura y forma y espacio, han sido siempre la misma cosa. Y de la misma manera que la mayor parte de los edificios que constituyen la Historia de la Arquitectura antigua se levantan con muros portantes donde es indesligable el portar, el soportar del formar, el conformar (el mismo material que soportaba conformaba), en la Arquitectura moderna, por mor del acero capaz de concentrar las cargas, las estructuras puntuales, los esqueletos, son también claramente la base y raíz del espacio: conforman ya el espacio, lo anuncian, lo “estructuran”.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires, Nobuko, 2009, p. 63. *La estructura de la estructura: Sobre la estructura que establece el orden del espacio*, 2008

HEGEL, Georg Wilhelm Friedrich

Para cerrar un espacio hacen falta muros; pero los muros (...) pueden ser independientes y no asegurar una clausura perfecta, pues ésta exige además una cobertura superior, y no sólo un entorno lateral. Y una cobertura debe siempre apoyarse sobre algo. El apoyo más simple es el que proporcionan las columnas, cuyo destino esencial y riguroso consiste, efectivamente, en servir de soporte. Por eso, si son solamente soporte, los muros son, hablando con propiedad, algo superfluo. Servir de apoyo o de soporte es una función mecánica que, en cuanto a tal, está sometida a las leyes de la gravedad. La gravedad se concentra en el soporte, el peso de un cuerpo en su centro de gravedad, y es ese soporte lo que lo mantiene tieso y le impide caer. La columna cumple exactamente esa función, y además con un mínimo de medios exteriores.

HEGEL, Georg Wilhelm Friedrich: *La Arquitectura* (3a Ed), Barcelona, Kairós, 2001, p. 75

Todo para dar a la construcción toda la solidez posible, para conformarla a las leyes de la gravedad, para asegurar la estabilidad de las partes verticales y proporcionar un soporte sólido a las horizontales. (...) En lo que se refiere a los principales elementos

de que se compone el tipo tanto de la casa como del templo, lo esencial que tenemos que decir al respecto se reduce a lo siguiente: Considerando la casa en sí misma, en su aspecto puramente mecánico, encontramos que se compone, por una parte, de masas que soportan y, por otra, de masas soportadas; tanto las unas como las otras se combinan de modo que den a la casa firmeza y estabilidad. (...) Desde este punto de vista, el hecho más importante es el de portar o soportar.

HEGEL, Georg Wilhelm Friedrich: *La Arquitectura* (3a Ed), Barcelona, Kairós, 2001, pp. 88, 90-91

La ciencia ha ofrecido a los arquitectos estudios sobre nuevas combinaciones de materiales capaces de alcanzar una alta resistencia a las fuerzas de la gravedad.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*.

Madrid: El Croquis, 2003, p. 23. *La Monumentalidad, 1944*

KAHN, Louis Isadore

La construcción tiene por misión sostener algo; la arquitectura se propone emocionar.

LE CORBUSIER: *Hacia una arquitectura*. Buenos Aires, 1964, p. 9

LE CORBUSIER

A imagen de la naturaleza, sometiéndose a las leyes de la naturaleza, a las leyes que rigen nuestra naturaleza, nuestro universo. Leyes de la gravedad, de la estática, de la dinámica, se imponen por reducción al absurdo: sostener o derrumbarse.

LE CORBUSIER: *Hacia una arquitectura*. Buenos Aires, 1964

En vez de seguir resistiendo una gravedad simple, los arquitectos deben reformular la cuestión del peso mediante la levedad entendida como un tema complejo e intrincado de relaciones entre superficies y terrenos múltiples, conectados flexiblemente. A través de una más general formulación de los nuevos paradigmas de la gravitación, los sistemas estructurales ligeros y los casi invisibles materiales de construcción pueden desarrollarse conjuntamente con organizaciones arquitectónicas y urbanas asentadas ligeramente.

LYNN, Greg

Con la levedad surgen formas de estabilidad dinámica y carga diferencial que son cualitativamente diferentes del estancamiento implícito en el asentamiento simple y perpendicular a la tierra. Sin recurrir al movimiento literal, se pueden concebir composiciones más ligeras donde el peso se transmite, a través de vectores muy diferentes que no están sujetos al empuje en ángulo recto de la gravedad terrestre.

LYNN, Greg: *Differential Gravities* [1994], en *Folds , Bodies & Blobs. Collected Essays*. Bruselas: La Lettre volée, 1998. Citado en SORIANO, Federico: *Sin-Peso*, en *Sin-Tesis*. Barcelona: Gustavo Gili, 2004, p. 64

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís

Observen la necesidad que tienen las cosas pesadas, para ser verdaderamente útiles al significado que se espera de ellas y contentar nuestra experiencia imaginaria, de no hacer explícito el medio que tienen de sustentarse.

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís: *Intersecciones*. Alcorcón (Madrid): Rueda, 2004, p. 81

NAVARRO BALDEWEG, Juan

La arquitectura favorece y estimula una consciencia de nuestra sujeción al campo gravitacional. Hay ocasiones que, en ella, la materia parecerá flotar y, otras, en las que se refuerzan signos de una materialidad opresiva y pesante. Señales de lo grávido o lo ingrávido aparecen en muy diversas modalidades y propósitos formales en cualquier arquitectura. Son señales que hacen referencia al peso de la materia de manera que, por un efecto empático, el sujeto percibe su inmersión en el mismo campo gravitacional. Reactivan en el usuario, en el espectador, una apreciación íntima de la necesaria tensión muscular que responde a la permanente sujeción inexorable de la gravedad.

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 15. *La Caja de resonancia*.

La estructura es (...) allí donde, en última instancia, se encarna para el hombre el problema de la gravedad.

NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante*, (2a Ed). Pretextos de arquitectura, Girona, 2001, p. 88. *El límite de los principios en la arquitectura de Mies van der Rohe, 1983*

Un techo o las figuras estructurales concretas canalizan el flujo energético de la gravedad, y hasta los mismos propioceptores del cuerpo resuenan y se estremecen durante la contemplación.

NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante*, (2a Ed). Pre-textos de arquitectura, Girona, 2001, p. 37. *La geometría complementaria*, 1992

Las articulaciones y la sintaxis de los elementos constructivos (en el capitel, en la columna), al formalizar las estructuras de obras de arquitectura, se han llenado de figuras más o menos gratuitas, que sólo pueden explicarse como signos demostrativos visuales de la inmersión de lo construido en el campo gravitacional. La arquitectura es, a través de esos signos, un espejo de esa emocionante inmersión. Nos advierte primero y luego nos conmueve física y psíquicamente al comprobar la obediencia y dependencia común de toda la materia a la ley natural.

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001, p. 16. *La Caja de resonancia*.

“La lucha entre la pesantez y la solidez es el único problema estético de la arquitectura como arte bello; su misión es hacer patente esa lucha de la manera más distinta. Este problema lo resuelve dando cauce a dichas fuerzas intangibles para que hallen su satisfacción por el camino más corto y conteniéndolas por medio de rodeos, alargando así su lucha y haciendo visible por varias maneras el impulso inagotable que las anima. Abandonada a su propia inclinación, toda la masa del edificio no representaría más que un mero amontonamiento, ligada tan fijamente como le fuera posible a la superficie de la tierra, a la cual la pesantez, que es como aquí aparece la voluntad, la sujeta incesantemente, mientras que resiste por la solidez, que es también objetivación de la voluntad. Pero precisamente la inmediata satisfacción de esta inclinación, de esta tendencia, es lo que impide el arte arquitectónico, permitiéndole sólo una satisfacción mediata por medio de rodeos. Así el entablamento sólo puede apoyarse en tierra por medio de columnas. La bóveda también tiene que ser sostenida y sólo por medio de pilares puede satisfacer su impulso a la gravedad, etc. Pero precisamente por estos rodeos obligados, por estas dificultades, se despliegan de la

SCHOPENHAUER, Arthur

manera más visible y variada las fuerzas ocultas en la materia (...); y los fines estéticos de la arquitectura no pueden ir más lejos. Por eso la belleza de un edificio estriba en la visible adecuación de sus partes, no en los fines exteriores del hombre (en este respecto la obra pertenecería a la arquitectura utilitaria), sino directamente a la estabilidad del conjunto, con el cual la posición, el tamaño y la forma deben guardar una proporción tan exacta en lo posible, que si una parte faltase el edificio se desplomaría. Pues sólo cuando cada parte soporta lo que es capaz de soportar y cada sostén está donde debe estar, se desarrolla aquel contrajuego, aquella lucha entre la solidez y la gravedad (...) y da expresión visible a estos grados inferiores de la objetividad de la voluntad. Asimismo la configuración de cada una de las partes debe estar determinada por su fin y por sus relaciones con el todo, no por el mero capricho. La columna es la forma más sencilla del sostén y está determinada por el fin que realiza. (...) Igualmente (...) el entablamento, los arcos, la cúpula, están condicionados por su inmediata función y se explican por sí mismos.

SCHOPENHAUER, Arthur: *El mundo como voluntad y representación* (4a Ed). México: Porrúa, 1997, p.173. *Libro Tercero, XLIII*

TORROJA MIRET, Eduardo

Nada hay tan congénito en la arquitectura de todos los tiempos como la horizontalidad de los pisos y la verticalidad de la gravedad.

TORROJA MIRET, Eduardo: *Razón y ser de los tipos estructurales* (3a Ed). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007, p. 275

VACCHINI, Livio

El arquitecto es un hombre que sostiene un techo.

AAVV: *Documents Projectes d'Arquitectura nº 23: Vacchini*. Barcelona: Departament de Projectes Arquitectònics de la Universitat Politècnica de Catalunya, 2007, p. 21

Mientras reflexiono, mi mirada se pasea desde los monolitos verticales a los arquitecinos: entre lo portante y lo portado se construye una relación plena. Esto es construir. La arquitectura es algo más inútil de lo que comúnmente se piensa. Su única e irrenunciable característica de orden práctico es la de soportar un techo.

VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 19. Stonehenge

El espacio y la luz se necesitan uno a otro, el espacio necesita de la luz para ser percibido y la luz necesita del espacio para transmitirse y que las cosas sean visibles. A la luz no se le ha dado la importancia que se le ha dado al espacio, no ha sido tan relevante para la arquitectura y para el pensamiento en la arquitectura, es como si la luz se considerara un atributo del espacio, no algo con la entidad, con el peso, con la consistencia que tiene el espacio. Pues bien, la luz es necesaria para que el espacio sea percibido, forma parte casi de él. (...) En el tema de la luz, una de las cuestiones que nos preocupan es conducirla al espacio, pero no nos preocupa conseguir un efecto. La luz como atributo que el espacio va a tener, y va a cualificar dicho espacio, pero sin papel protagonista. Luz, no como provocadora de efecto, sino como entidad cualificadora del espacio.

ALONSO VERA, Dolores: *2o Curso de Arquitectura: espacio y luz*. Valencia: Colegio Mayor Universitario Albalat, 2003, pp. 9-10. Citado en FERNÁNDEZ GÓMEZ, Margarita; MELGAREJO BELENGUER, María: *Opiniones sobre Arquitectura: la voz de los arquitectos*. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2008, p. 89.

ALONSO VERA, Dolores

La luz natural es un material intangible con el que el arquitecto

APARICIO GUIADO, Jesús M.

construye el espacio. Es un material verdaderamente importante; lo es tanto, que se puede decir que sin la luz el espacio pleno de arquitectura no existe.

APARICIO GUIASADO, Jesús María: *Construir con la razón y los sentidos*. Buenos Aires: Nobuko, 2008, p. 29

La luz es esencial a la arquitectura, de tal forma que no existe una arquitectura sin luz. El espacio sólo se comprende bajo la luz natural. La luz natural tiene unas cualidades únicas para la comprensión de la arquitectura, como el ser blanca, paralela, infinita y cambiante. Estas cualidades de color, geometría y tiempo nunca las tiene la luz artificial. Como vemos, la luz natural es arquitectónica en su concepción cromática, espacial y temporal.

APARICIO GUIASADO, Jesús María: *El muro: concepto esencial en el proyecto arquitectónico: la materialización de la idea y la idealización de la materia*. Buenos Aires: Universidad de Palermo, 2000, p. 22

BOULLEE, Etienne-Louis

El arte de conmovir por los efectos de la luz pertenece a la arquitectura. (...) El artista, que debe conocer los medios de hacerse su dueño, puede atreverse a decir: yo hago la luz.

BOULLEE, Etienne-Louis: *Arquitectura. Ensayo sobre el arte*. Gustavo Gili, Barcelona, 1985, p.30.

Citado en DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral.

Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, vol.1, p. 82

CAMPO BAEZA, Alberto

La LUZ es componente esencial para toda posible comprensión de la cualidad del ESPACIO. ¿No es la Historia de la Arquitectura una Historia del entendimiento diverso de la LUZ? ¡Adriano, Bernini, Le Corbusier! (...) La LUZ es el material básico, imprescindible, de la Arquitectura. Con la misteriosa pero real capacidad, mágica, de poner el ESPACIO en tensión para el hombre. Con la capacidad de dotar de tal CUALIDAD a ese espacio, que llegue a mover, a conmovir, a los hombres.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a*

la luz de las palabras (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 44.

Esencialidad: Más con menos, 1992

Cuando, por fin, un arquitecto descubre que la LUZ es el tema central

de la Arquitectura, entonces, empieza a entender algo, empieza a ser un verdadero arquitecto. (...) Cuando propongo este axiomático “Architectura sine Luce NULLA Architectura est”, estoy queriendo decir nada, ninguna arquitectura, es posible sin la LUZ. Sin ella sería sólo mera construcción. (...) En definitiva, ¿no es la LUZ la razón de ser de la Arquitectura? ¿No es la Historia de la Arquitectura la de la búsqueda, entendimiento y dominio de la LUZ?

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, pp. 57, 58 y 61. *Architectura sine luce nulla architectura est: Sobre la luz, 1992*

Sin Luz NO hay Arquitectura. Sólo tendríamos construcciones muertas. La Luz es la única capaz de tensar el espacio para el hombre. De poner en relación al hombre con ese espacio creado para él. Lo tensa, lo hace visible.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 78. *Idea, luz y gravedad, bien temperadas: Sobre las bases de la Arquitectura, 1995*

De naturaleza inmaterial y ubicua, la luz, no es sólo aquello que hace visibles las cosas, sino la sustancia que relaciona complejos aspectos implicados en la elaboración del espacio arquitectónico.

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo (ed): *El límite y la luz: seminario de proyectos arquitectónicos 2009*. Valencia: Cátedra Cerámica Valencia, 2011, p. 12

La materia lumínica, manipulada conscientemente o inconscientemente, es uno de esos componentes permanentes que acompañan en silencio al quehacer arquitectónico; aún ignorándola, buscará y encontrará la ocasión para manifestarse.

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, vol.1, p. 298

La segunda relación consciente se produce, por tanto, en el límite entre el interior y el exterior, en el preciso instante en el que la luz abandona su libertad y se introduce en el espacio. (...) Su elaboración arquitectónica (...) nos permite alterar conscientemente

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo

las condiciones de luz existentes en el exterior al seleccionar y modificar una porción de los infinitos rayos de luz y conducirlos al interior del espacio. Esta fracción de luz, transformada, de luz confinada como la llamó Leonardo, es la que configura y cualifica el espacio contenido. A través del control de esta luz, está en nuestras manos transformar la luz natural en sobrenatural, la luz local en universal y la luz instantánea en eterna, incluso diluir todas aquellas referencias que nos permiten ser conscientes del paso del tiempo, consiguiendo a su vez, atenuar su inexorable fluir inadvertido.

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, vol.1, p. 305

Porque en definitiva, no debemos olvidar que la auténtica finalidad de la luz es dignificar todos aquellos elementos en los que se apoya y descansa, dar vida a los objetos en los que muere. La arquitectura elabora con esa energía su cometido, ornamenta, aún inconscientemente, los últimos instantes de vida de la luz; construye soportes, límites al sol, y la luz adquiere toda su magnitud al reverenciarse en los elementos que toca. La arquitectura tiene el privilegio y la responsabilidad de acompañar a la luz en su último trayecto, le ayuda a morir dignamente. En ese preciso instante la luz se desvanece y surge la oscuridad.

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, vol.1, p. 321

FERRAZ FAYOS, Antonio

¿Qué es la luz en las cosas? El vínculo común a la forma y a la materia por medio del cual se produce el acuerdo entre éstas. Todo compuesto consta de materia y de forma. La materia es corpórea; la forma, incorpórea.

FERRAZ FAYOS, Antonio: *Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton*. Madrid: Dossat, S.A., 1974, p. 223

GALA VELASCO, Antonio

“Yo soy”, dice la luz. Sin predicado alguno. Es la pura existencia: el acto de existir en que todo se apoya.

GALA VELASCO, Antonio: *Monarquía de la luz*, en AAVV: *La Luz en la Pintura*. Barcelona: Carroggio, 1998

La vida gira alrededor de la luz y el espacio está condicionado por la luz: necesita del calor, del sol (...); los ciclos vitales son la luz, hasta llegar al extremo de que la luz casi es la vida en sus términos más metafóricos. Pero esa realidad funcional y física que es la luz, es capaz de crear la arquitectura del hueco que nos permite conectar el mundo de fuera con el mundo de dentro para que tu mirada vea el mundo de una forma diferente. Es maravilloso ver el hueco como una ruptura del muro que a la vez está conformando una arquitectura. Esto se hace por una necesidad; la luz como necesidad.

GALLEGO JORRET, Manuel: *2o Curso de Arquitectura: espacio y luz*. Valencia: Colegio Mayor Universitario Albalat, 2003, p. 29. Citado en FERNÁNDEZ GÓMEZ, Margarita; MELGAREJO BELENGUER, María: *Opiniones sobre Arquitectura: la voz de los arquitectos*. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2008, p. 89.

GALLEGO JORRETO, Manuel

La arquitectura es el primer arte plástico; la escultura y la pintura necesitan de la primera. Toda su excelencia viene de la luz. La arquitectura es la ordenación de la luz; la escultura es el juego de la luz; la pintura, la reproducción de la luz por el color, que es la descomposición de la luz.

PUIG BOADA, Isidre: *El pensament de Gaudí: compilació de textos i comentaris*. Barcelona: La Gaya-COAC, 1981, p. 98. (Referencia original: PUIG BOADA, Isidre; *El Temple Expiatori de la Sagrada Família*, p. 170)

GAUDÍ CORNET, Antoni

Es la luz la que produce la sensación de espacio. El espacio es aniquilado por la oscuridad. La luz y el espacio son inseparables. Si la luz es suprimida, el contenido emocional del espacio desaparece, haciéndose imposible de percibir.

GIEDION, Sigfried: *El Presente eterno: los comienzos de la arquitectura*. Madrid: Alianza, 1981, p. 467

GIEDION, Sigfried

El modo en que la luz es dirigida y modulada tiene consecuencias máximas para la concepción espacial, puesto que la luz y las formas que limitan el espacio son las que dan su carácter a un conjunto arquitectónico.

GIEDION, Sigfried: *El Presente eterno: los comienzos de la arquitectura*. Madrid: Alianza, 1981, p. 479

KAHN, Louis Isadore

Fuimos creados a partir de la luz y, por tanto, debemos vivir con la sensación de que la luz es importante. (...) Sin luz no hay arquitectura.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*.

Madrid, El Croquis, 2003, p. 341. 1973: *Brooklyn, Nueva York*.

El sol nunca supo cuán maravilloso era hasta que apareció un rayo de sol sobre la pared de un edificio.

Citado en TORRES TUR, Elías: *Luz cenital*. Barcelona: COAC, 2005, p. 30

LLORENTE DÍAZ, Marta

La luz arquitectónica pervive sólo en los edificios que procuran todavía la definición del interior: sin preservar este interior, el espacio arquitectónico se enfrenta de nuevo al desamparo del mundo solar. Los nuevos objetos más prodigiosos de la tecnología reciente consiguen controlar la luz del sol, administrarla, pero no agotan la belleza de que es capaz la luz arquitectónica.

Citado en VALERO RAMOS, Elisa: *La Materia intangible: reflexiones sobre la luz en el proyecto de arquitectura*. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004, p.98. (Original en:

LLORENTE, Marta: *Luz del cénit*. Diseño interior nº5, p. 47)

MALÉVICH, Kazimir

La revelación del espacio en una analogía de la revelación de la luz, del color, del material.

MALÉVICH, Kazimir: *La luz y el color*. Madrid: Lampreave, 2012, p. 41

MARTÍ ARÍS, Carlos

El arquitecto, intelectual que trabaja a partir de la incidencia de la luz sobre las cosas, para así poder recrear la materia.

MORETTI, Luigi; DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *Espacios-luz en la arquitectura religiosa, "La luz y su anverso 03"*. Madrid: Lampreave, 2012, p. 1

Puede parecer extraña la idea de basar la definición de arquitectura, una actividad intrínsecamente ligada a la materialidad, al peso y a la voluntad de permanencia, en algo tan intangible como la luz. Sin duda se corre un cierto riesgo al colocar un fenómeno tan cambiante y evanescente como la luz, en el centro mismo de la arquitectura que es siempre acción enérgica y visualización del persistente esfuerzo

del ser humano para encontrar su lugar en el mundo. Y, sin embargo, puede afirmarse que sólo cuando la luz ha sido domesticada y controlada mediante artefactos que regulan nuestra relación con ella o permiten canalizarla hacia ese objeto que queremos destacar, es decir, sólo cuando somos capaces de convertir la luz en instrumento que moldea el espacio y lo individualiza, a la vez que lo reintegra a la universalidad de las leyes cósmicas, y sólo entonces, cabe hablar con propiedad de la arquitectura como arte, como facultad del espíritu, y de aquellos que la ejercen como verdaderos arquitectos. (...) La luz es a la arquitectura lo que el viento a la navegación a vela, o lo que el toro bravo a la tauromaquia: una energía incontenible y desbocada que, a través del ingenio, el saber y la paciencia humanos, hay que reconducir y domesticar, convirtiéndola en nuestra aliada. Al toro le corresponde embestir y al torero lidiar, es decir, transformar la fuerza de la embestida en calculado desplazamiento, en detención tensa y concentrada, en movimiento y compás, en “figura” dinámica de una danza capaz de reunir en una sola cosa al toro, al torero y al engaño. Así opera el verdadero arquitecto con la luz, enredándola en sus artificios, convirtiéndola en obediente protagonista de un acto ritual cuyo guión sólo él conoce. (...) Hay, ciertamente, unos climas más propicios que otros para la práctica y el disfrute de la arquitectura. Pero, excluyendo los extremos, son muchas las regiones climáticamente hospitalarias del planeta. En todas ellas, el sol, la única fuente primigenia de luz para el humano, ejerce su soberanía indiscutida. Y al sol, como a todo soberano, hay que tratarle a la vez con respeto y con distancia: conviene que no nos desasista, pero también hay que procurar que no nos aplaste. Al conjunto articulado de protocolos que regulan las relaciones que se generan entre el sol como fuente de energía y de luz, y el lugar que el ser humano adopta como espacio habitable, le llamamos arquitectura.

MARTÍ ARÍS, Carlos: *Laboratorios de luz*, en VALERO RAMOS, Elisa: *Elisa Valero: arquitectura 1998-2008*. Valencia: Biblioteca TC (Ediciones Generales de la Construcción), 2008, pp. 5-7.

Como la luz tenía que pertenecer a la sustancia de la habitación, a la aspiración de lo construido, había que truncar la relación de la luz con su fuente y con su camino de acceso y hacerla aparecer como

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís

algo sobrenatural en medio de un interior. La luz no ha llegado desde el cielo tras un largo viaje -parece decirnos el arquitecto de la camisa de cuadros- sino que se ha originado en este humilde recinto de la habitación. Vemos así que algunas de sus obras se distinguen por el gusto en acentuar la desproporción entre el insólito valor de la luz y el de las limitaciones y pequeñeces del cuarto que la origina.

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luis: *El libro de los cuartos*. Madrid: Lampreave, 2011, p. 229

Yo creo que en mis obras no hay una preocupación explícita por la luz. He pensado siempre que la luz se produciría, por añadidura, si la obra llegaba a constituir —lo que no siempre se consigue— un sensible y original acto de reflexión sobre el hombre, ese ser luminoso del que te hablaba antes. La luz sería el premio que la arquitectura recibiría. La luz brillaría sobre ella como brilla una medalla de oro sobre un vencedor. A la arquitectura le pertenece la luz porque la arquitectura ha vencido. Porque hacer de la construcción un arte es vencer. Por eso es imposible sobornar a la luz o llamarla a capítulo. La luz no es un sueldo, es un premio.

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luis: *La luz es el tema: la luz humana*, en *Revista Diagonal* nº 31, marzo 2012, p. 36

MORETTI, Luigi

Sin la luz, el hombre está solo; por eso la angustia de la noche nos invade a todos.

MORETTI, Luigi; DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *Espacios-luz en la arquitectura religiosa*, "La luz y su anverso 03". Madrid: Lampreave, 2012, p. 8

NAVARRO BALDEWEG, Juan

Por qué no pensar que ciertas variables que rodean la vida de los hombres (pongamos las que suponen a veces el deleite puro, o la emoción de la arquitectura de la luz, etcétera) son realmente funciones, necesidades que el hombre reclama i que hay que atender con una arquitectura adecuada.

ESPAÑOL, Joaquín (ed). *Invitación a la arquitectura: diálogos con Oriol Bohigas, Juan Navarro Baldeweg, Oscar Tusquets, Albert Viaplana y Peter G. Rowe. Cinco reflexiones sobre la arquitectura que nos rodea*. Barcelona: RBA, 2002, p. 57

La luz es uno de los aspectos clave de la arquitectura de todos los tiempos, sobre todo de la arquitectura más ambiciosa. Como creador de objetos traspasados por algunos de los atributos que me parece que están en la base de la arquitectura, pues sí, he hecho investigaciones para crear, para formalizar la luz como sustancia de la arquitectura. Pero creo que su interés radica en el hecho de que es un elemento vital, una energía necesaria en la vida de los hombres, tan necesaria como el aire. Y nuestra capacidad de manejar, manipular, controlar y ordenar la forma en que la luz penetra en el espacio, en la materia esponjosa que es la arquitectura, es esencial.

ESPAÑOL, Joaquín (ed). *Invitación a la arquitectura: diálogos con Oriol Bohigas, Juan Navarro Baldeweg, Oscar Tusquets, Albert Viaplana y Peter G. Rowe. Cinco reflexiones sobre la arquitectura que nos rodea*. Barcelona: RBA, 2002, p. 59

¿Qué es el espacio? No es otra cosa sino sutilísima luz.

Citado en VALERO RAMOS, Elisa: *La Materia intangible: reflexiones sobre la luz en el proyecto de arquitectura*. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004, p.9

PROCLO

A mi modo de ver, es la luz natural la que hace del espacio interior la cualidad específica de la arquitectura, aquello que definitivamente la distingue de las otras artes y le da un nombre propio: la arquitectura por excelencia.

TORRES TUR, Elías: *Luz cenital*. Barcelona: COAC, 2005, p. 30

TORRES TUR, Elías

Es con la luz que la arquitectura se hace presente.

TORRES TUR, Elías: *Luz cenital*. Barcelona: COAC, 2005, p. 96

La arquitectura nació hace cinco mil años en Stonehenge. Una vez ultimada la colocación del primer arquitrabe, nació una forma conocimiento humano cuya verdadera naturaleza consistirá en la construcción de la luz.

VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 17. *Stonehenge*

VACCHINI, Livio

ZUMTHOR, Peter

Cuanto más viejo me hago, más me interesan las distintas formas de aparición de la luz en la naturaleza. No dejo de admirarme y aprender y soy plenamente consciente de que es la luz del Sol la que ilumina los edificios que concibo. Sumerjo en la luz solar los espacios, los materiales, las texturas, los colores, las superficies, las formas, atrapo esa luz, la reflejo, la filtro, la atenúo y la rebajo para que luzca en el lugar justo. La luz como sustancia activa me es del todo familiar; no obstante, si recapacito verdaderamente qué es lo que esto significa, apenas entiendo algo.

ZUMTHOR, Peter: *Pensar la arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 2004, p. 91

LA LUZ. La fuerza de la levedad. He escrito multitud de veces sobre la luz. Y siempre he propuesto que la luz en arquitectura “construye el tiempo”, y que es el material capaz de poner al hombre en relación con la arquitectura. De ahí mi insistencia en el “Architectura sine luce nulla architectura est”. Pues es en ese sentido, en su relación con la luz, en el que los conceptos de lo tectónico y lo estereotómico adquieren su más clara lectura. La arquitectura estereotómica busca la luz. Perfora sus muros para que, atravesada por los rayos del sol, poder atrapar la luz en su interior. (...) Por el contrario, una arquitectura tectónica, puro hueso, necesitará protegerse de la luz que la inunda. (...) Es ésta, la tectónica, una arquitectura que se defiende de la luz, que para poder controlarla debe velar sus huecos.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires, Nobuko, 2009, pp. 33-34. *De la cueva a la cavaña. Sobre lo estereotómico y lo tectónico en arquitectura*, 2003

CAMPO BAEZA, Alberto

Decidir la cantidad y calidad de la luz natural que debe proporcionarse al interior constituye una de las primeras decisiones del arquitecto al

CASAL, José María

proyectar su obra.

CASAL, José María: *El ambiente luminoso en el espacio arquitectónico*. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1978, p. 34

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo

La perforación del muro convierte en factor determinante a la luz como modeladora el espacio, confirma la existencia de un límite entre el exterior y el interior, entre la luz y su ausencia. Actúa como un diafragma regulando la cantidad de luz que pasa y la elaboración arquitectónica de este límite determina su cualificación.

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo. *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, vol.1, p. 305

KAHN, Louis Isadore

Si tratamos de pensar en cómo podemos encontrar puntos de partida en la arquitectura, vemos que es muy fácil afirmar que un espacio en arquitectura es aquél en el que queda patente cómo está hecho; y que la introducción de un pilar o cualquier otro recurso para hacer una cubierta se piensa ya desde el punto de vista de la luz, y ningún espacio es realmente un espacio arquitectónico mientras no tenga luz natural. (...) Debe haber luz. Si pensamos en estas cosas sólo después de haber hecho una gran forma –supongamos que contamos con el ingeniero adecuado, por ejemplo Candela o Nervi, para hacer el edificio con nosotros-, entonces decimos “ahora, ¿cómo lo iluminamos?”, es que vamos por mal camino.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid: El Croquis, 2003, pp. 99 y 101. *Las nuevas fronteras de la arquitectura: C.I.A.M. de Otterlo, 1959*

Una columna o una bóveda, escogidas para crear un espacio, constituyen una especie de religión en la creación de esos espacios. Una columna libera luz; y además de dar luz, nos ofrece el punto desde el que podemos alcanzar la gravedad. Una columna es completamente distinta de un muro, porque éste no libera luz a menos que lo perforemos, mientras que una columna dice que está entre una cosa y otra, es una gran fuente de luz o un sitio por donde se puede pasar. Eso es lo que nos dice. Y una bóveda nos dice lo mismo: es un modo de llevar luz al espacio, y deberíamos ser

capaces de ver en una planta que se trata de algo que proporciona luz. Deberíamos notar que la luz entra en los espacios.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*.

Madrid: El Croquis, 2003, p. 119. *Sobre la forma y el diseño, 1960*

Cada espacio debe estar definido por su estructura y por el carácter de su luz natural. Por supuesto, no estoy hablando de los locales menores que sirven a los espacios principales. Un espacio arquitectónico debe revelar la evidencia de su creación mediante el propio espacio; no puede ser un espacio cuando está excavado en una estructura más grande pensada para un espacio más grande, porque elegir una estructura es sinónimo de luz y eso es lo que confiere imagen a ese espacio.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*.

Madrid, El Croquis, 2003, p. 131. *La forma y el diseño, 1962*

Pienso que la luz natural debería estar presente en los espacios que se pueden llamar 'espacio'. Y lo que es bastante interesante: creo que el modo en que se crea un espacio casi siempre supone tener conciencia de las posibilidades de la luz, porque cuando tenemos una columna y la vemos, estamos diciendo que la columna está ahí porque la luz es posible. Un muro no dice que la luz sea posible, pero cuando tenemos una columna, una bóveda o un arco, estamos diciendo que la luz sí es posible. Por tanto, la manera de crear un espacio ya implica que la luz está entrando, y la propia elección que hacemos del elemento de la estructura también debería tener relación con el carácter de la luz que queremos; y pienso que ésta es una exigencia verdaderamente arquitectónica.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*.

Madrid: El Croquis, 2003, p. 148. *Louis I. Kahn, 1961*

El espacio arquitectónico es un espacio dentro del cual se lee cómo está hecho el propio espacio; dentro de ese espacio, las columnas, las vigas y las piedras están en el espacio propiamente dicho. Un gran vano no debe tener nada dentro, sólo lo que abarque el propio vano. Y la decisión sobre la estructura de los vanos es también una decisión sobre la luz. Una columna cercana a otra es una expresión

de apertura y luz. Una bóveda es una decisión sobre el carácter de la luz. No deberíamos abrir una habitación a otra para descubrir cómo está hecho el espacio. Dentro del propio espacio está su estructura. Esto hace que la arquitectura sea distinta de la construcción, de la mera construcción. No toda la construcción es arquitectura.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid: El Croquis, 2003, p. 170. *Una declaración, 1962*

Estoy convencido de que la estructura es el comienzo de la vida, y de que la estructura es ya una decisión sobre la vida. Cuando los muros eran gruesos y por primera vez se perforó uno con una abertura, el muro gritó diciendo: “¿Qué me estáis haciendo? Soy un muro y os estoy protegiendo. ¿Por qué estáis haciendo una abertura?” El hombre, titubeante, se quejó de esta protesta y dijo: “Debo mirar hacia fuera. Creo que tengo suficiente protección.” Y el muro se quedó muy descontento, hasta que las aberturas se hicieron con más criterio para distinguirse y llegaron a formar parte del orden del muro. Las piedras se hicieron con más criterio, y las ventanas se colocaron encima. El muro se puso muy contento de poder tener algo distinto de sí mismo formando parte de sus poderes. Y luego llegó la columna. En mi opinión, la columna fue realmente el comienzo de la arquitectura, porque creó una imagen muy distinta de lo que es luz y lo que no es luz. Y así, el ritmo de la luz y la no luz ofrecido por la columna también dio origen al arco, a la bóveda y a otros recursos que surgieron de la constatación de que podemos tener un soporte que sea algo distintivo, en vez algo que robamos o que sencillamente modificamos mediante alguna idea estética del momento. También por eso creo que no podemos hacer un espacio grande y luego dividirlo en piezas pequeñas. Hacemos un espacio grande cuando tenemos un espacio grande, y esto exige un gran esfuerzo. Y un espacio pequeño sólo exige un pequeño esfuerzo.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid: El Croquis, 2003, p. 225. *Discurso, 1966*

Para mí la estructura es la creadora de la luz. Cuando escojo un orden estructural que exige una columna tras otra, aparece un ritmo así: no luz, luz, no luz, luz, no luz, luz. Una bóveda o una cúpula son

también decisiones sobre el carácter de la luz. Hacer una habitación cuadrada significa proporcionarle la luz que revele ese cuadrado en sus infinitos ambientes. Dar luz no es simplemente hacer un agujero en un muro; ni tampoco escoger una viga aquí y allá para enmarcar la cubierta. La arquitectura crea la sensación de estar en un mundo dentro de otro mundo, y la ofrece a la habitación.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid: El Croquis, 2003, p. 235. *El espacio y las inspiraciones, 1967*

La luz es muy importante; en realidad, la estructura es la creadora de la luz. Cuando tomamos una decisión sobre la estructura, estamos decidiendo la luz. En los edificios antiguos, las columnas eran expresión de la secuencia luz: no luz, luz, no luz, luz, ¿entendéis? El módulo también es luz, no luz. La bóveda deriva de esto. La cúpula deriva de esto, al igual que la propia constatación de que estamos liberando la luz.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid, El Croquis, 2003, p. 255. *El silencio y la luz, 1969*

La estructura es la creadora de la luz. Una columna y otra ofrecen la luz entre ellas. Es una secuencia oscuridad-luz, oscuridad-luz, oscuridad-luz. En la columna nos percatamos de una belleza rítmica, sencilla y hermosa desarrollada a partir del muro original y sus huecos. Al principio, los muros eran gruesos; protegían hombre. Éste sintió el deseo de libertad y la promesa del mundo exterior; primero hizo una abertura tosca; luego le explicó al desdichado muro que, al aceptar esa abertura, debía seguir un orden superior, con arcos y pilares como elementos nuevos y valiosos. Éstas son las constataciones en la arquitectura de la Luz y la Estructura. (...) Incluso una sala que haya de ser oscura necesita una rendija de luz para saber lo oscura que es. Pero hoy en día, los arquitectos, al proyectar las salas, han olvidado su fe en la luz. Dependiendo del toque de un dedo en un interruptor, se conforman con esa luz estática y olvidan las cualidades infinitamente variables de la luz natural, con la cual una sala es distinta cada segundo del día.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid, El Croquis, 2003, pp. 262-23. *Arquitectura: el silencio y la luz, 1970*

La estructura es la que proporciona la luz. La estructura es un diseño de luz. La bóveda, la cúpula, el arco y la columna son estructuras relacionadas con el carácter de la luz. La luz natural crea ambiente en el espacio gracias a los matices luminosos de las horas del día y las estaciones del año, puesto que penetra en el espacio y lo modifica.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*.

Madrid: El Croquis, 2003, p. 329. *Pensamientos, 1973*

Puede decirse que un proyecto es la 'estructura de los espacios en su propia luz'. Y es que la estructura es la creadora de la luz, porque libera los espacios intermedios y eso es lo que proporciona la luz.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*.

Madrid: El Croquis, 2003, p. 303. *Me encantan los comienzos, 1972*

Es la estructura la que otorga la luz. Pensemos en el ritmo de las columnas del Partenón, en la luz y en la sombra: las columnas son la sombra, entre las columnas está la luz.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*.

Madrid: El Croquis, 2003, p. 360. *La armonía entre el hombre y la arquitectura, 1974*

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís

El pilar será siempre un ser valioso por lo que salva, por el lugar o luz que trae.

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís: *Intersecciones*. Madrid: Rueda, 2004, p. 67

MASIERO, Roberto

Así como los grandes matemáticos se ven obligados a preguntarse sobre el número 1, o como los genios de la geometría observan un triángulo con estupor, Livio Vacchini se preguntaba qué era un muro, una viga, una cubierta o una estructura y cómo la luz puede hacer que cada elemento cobre vida.

VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 14

MORETTI, Luigi

El hecho de que en las obras de arquitectura antigua, especialmente en las religiosas, esta calidad esencial de vida de los espacios

y de la materia resulte tan fundamental como para atenuar o anular cualquier otra, me quedó aún más claro cuando reconocí que algunos de aquellos esenciales cambios estilísticos, de aquellas decisivas revoluciones de la historia de la arquitectura que percibimos claramente y que solemos relacionar tan sólo con cuestiones estructurales, plásticas o formales, en muchos casos no eran sino consecuencia de un cambio en el modo de pensar la luz. El modo de pensar la luz naturalmente provocaba que se produjeran modificaciones estructurales y formales y, a la vez, era consecuencia de ellas, y por tanto, las sintetizaba. Porque, considerándolo bien, es precisamente la cualidad y densidad de la luz la que sintetiza tanto la estructura de los espacios puros como la estructura de la matriz que los encierra, entendida ésta como estructura de la constructividad y de las materias implicadas en ésta o evocadas en la representación arquitectónica.

MORETTI, Luigi; DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *Espacios-luz en la arquitectura religiosa*, "La luz y su anverso 03". Madrid: Lampreave, 2012, pp. 8-9

Nuestro trabajo de arquitecto es en verdad de extraordinaria belleza y podemos decir que hemos sido benévolamente elegidos entre los mortales. (...) Nosotros podemos, lo acabamos de ver, trabajar con la sustancia más insólita y universal que se conoce: la luz. ¿Qué supondría para nosotros hoy en día tener que expresar un claro sentimiento de lo invisible con suma esencialidad, casi sólo con la luz?

MORETTI, Luigi; DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *Espacios-luz en la arquitectura religiosa*, "La luz y su anverso 03". Madrid: Lampreave, 2012, p. 47

Se trata de investigar estructuras que, además de resistentes, canalicen la luz, otorgándole valor y protagonismo, en detrimento de otros factores. (...) Estos modelos y estos proyectos en los que la estructura y la iluminación se trabajan al unísono, con su carácter envolvente determinan la atmósfera de los interiores, ilustrando la idea de que la arquitectura se constituye por abstracción a partir de la naturaleza.

NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante*, (2a Ed). Pre-textos de arquitectura, Girona, 2001, p. 64 y 69. *Figuras de luz en la luz*, 1998

NAVARRO BALDEWEG, Juan

VACCHINI, Livio

Pensar es construir, y construir es dar estructura, porque la estructura es forma, luz, espacio, evidencia.

VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 46.

Mezquita de Selimiye.

La arquitectura es luz, una luz que lleva. Incluso cuando se esconde la estructura, la arquitectura es una luz que se convierte en estructura.

VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 52.

Capilla De Notre-Dame-Du-Haut.

La luz es geometría y la estructura debe medirse pues en relación con ella.

VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009, p. 58

WRIGHT, Frank Lloyd

La creciente demanda de luz solar y visibilidad hace que las paredes, y aun las columnas, sean algo de lo que hay que deshacerse a cualquier costo.

Citado en CASAL, José María: *El ambiente luminoso en el espacio arquitectónico*. Madrid: Colegio

Oficial de Arquitectos de Madrid, 1978, pp. 17-18

Para hacer presente la luz, para hacerla sólida, es necesaria la sombra. La adecuada combinación de luz y sombra suele despertar en la arquitectura la capacidad de conmovernos en lo más profundo, suele arrancarnos las lágrimas y convocar a la belleza y al silencio.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 69. *Light is much more: Sobre la luz*, 2008

CAMPO BAEZA, Alberto

Gracias a luz somos capaces de ver todos aquellos cuerpos donde se refleja, y el espacio que los contiene. (...) La luz, (...) no es sólo la que nos hace visibles las cosas, sino la sustancia misma que relaciona los complejos aspectos que intervienen en la elaboración del espacio arquitectónico, es algo más que un medio para ver.

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo. *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, vol.1, p. 9

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo

Si no existiesen las sombras, viviríamos en la insoportable aridez de la superficie devorada por la luz. Para contrarrestar este efecto cegador debemos construir sombras, arrojar sombras sobre la

superficie completamente iluminada y absolutamente uniforme, y, de esta forma, paradójicamente, sacar de la luz todos aquellos objetos contenidos bajo su manto homogeneizador. Por tanto, de la interacción entre la luz y los elementos creados para generar sombra depende, en gran medida, la configuración del espacio.

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo. *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, vol.1, p. 82

MORETTI, Luigi

La luz es una cualidad fundamental del espacio y, por tanto, de la materia que, como matriz, lo determina. Ella es arquitectura, igual que cualquier cosa en el mundo.

MORETTI, Luigi; DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *Espacios-luz en la arquitectura religiosa*, "La luz y su anverso 03". Madrid: Lampreave, 2012, p. 8

RUSKIN, John

Así, entre los primeros hábitos que un joven arquitecto ha de aprender está el de pensar en la sombra; no estudiar un proyecto en su miserable esqueleto lineal, sino concebirlo tal como será cuando el alba lo ilumine y el crepúsculo lo abandone; cuando las piedras estén calientes y las grietas frías; cuando los lagartos se asoleen en unas y los pájaros aniden en las otras. Que proyecte con la sensación de frío y calor sobre él; que abra sombras igual que los seres humanos cavan pozos en las llanuras secas; que se guíe por las luces como el fundidor por el metal caliente; que mantenga pleno dominio sobre ambos y sepa cómo caen y dónde se desvanecen. Las líneas y las proporciones en el papel no tienen ningún valor: todo lo que ha de hacer tiene que ser hecho con espacios de luz y de oscuridad; su tarea es ver que una sea lo bastante amplia y audaz para que no se la trague el crepúsculo y, la otra, lo bastante profunda para que no se seque como un estanque somero con el sol de mediodía.

RUSKIN, John: *Las siete lámparas de la arquitectura*. Stylos, Barcelona, 1987, p.91. Citado en

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo. *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, vol.1, p. 83

El placer experimentado por la sensación luminosa no es otra cosa que el que nos produce la posibilidad del conocimiento objetivo en su forma más pura y perfecta.

SCHOPENHAUER, Arthur: *El mundo como voluntad y representación* (4a ED). México: Porrúa, 1997, p.163. *Libro Tercero, XXXVIII*

SCHOPENHAUER, Arthur

Nosotros no vemos el mundo de una forma directa, sino a través del patrón de luz bidimensional que incide en la retina del ojo. Así, para obtener algún conocimiento del mundo tridimensional (...) debemos interpretar las discontinuidades de luminancia. Es decir, la sombra a través de nuestra experiencia variable y compleja, nos permite reconocer una esfera cuando lo que llega a nuestra matriz retiniana es un círculo plano con sombra y luz mezcladas de una determinada manera. Se puede decir, por tanto, que no calamos directamente la esencia del objeto, sino que la abstraemos de una información que según nuestra situación, percibimos de forma diferente.

VALERO RAMOS, Elisa: *La Materia intangible: reflexiones sobre la luz en el proyecto de arquitectura*.

Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004, p.13

VALERO RAMOS, Elisa

Hablar de luz es también hablar de sombras. La arquitectura mediterránea podría definirse como la creación de la sombra adecuada. La luz es dada, el sol sale por el este y sigue un recorrido cambiante cada día que no podemos interferir. El control de la luz pasa por la construcción de sombras, que en definitiva es lo que nosotros podemos modificar.

VALERO RAMOS, Elisa: *Si Copérnico levantara la cabeza*, en *Revista Diagonal* nº 24,

primavera 2010, p. 24 CAMPO BAEZA, Alberto

V.8. LA AMBIGÜEDAD MATERIAL DE LA LUZ

CAMPO BAEZA, Alberto

Propongo (...) una Arquitectura que tiene (...) en la LUZ su primer material.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, p. 43.
Esencialidad: Más con menos, 1992

LA LUZ ES MATERIA Y MATERIAL (De la materialidad de la LUZ).
(...) No es la LUZ algo vago, difuso, que se da por supuesto porque siempre está presente. No en vano el sol sale para todos, todos los días. Sí es la LUZ, con o sin teoría corpuscular, algo concreto, preciso, continuo, matérico. Materia medible y cuantificable donde las haya, como muy bien saben los físicos y parecen ignorar los arquitectos. (...) ¿Podríamos entonces considerar ahora que la clave está en el entendimiento profundo de la LUZ como materia, como material, como material moderno? ¿No podríamos entender que ha llegado el momento de la Historia de la Arquitectura, tremendo y emocionante momento, en que debemos enfrentarnos a la LUZ? ¡Hágase la LUZ! Y la LUZ fue hecha. El primer material creado, el más eterno y universal de los materiales, se erige así en el material

central con el que construir, CREAR el espacio. El espacio en su más moderno entendimiento. El arquitecto vuelve así, a reconocerse una vez más como CREADOR. Como dominador del mundo de la LUZ. (...) La LUZ, cuantificable y cualificable como toda materia que se precie, puede ser controlada científicamente. (...) Y es que la LUZ es algo más que un sentimiento. Aunque sea capaz de remover los sentimientos de los hombres y nos haga temblar en nuestro más íntimo interior.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, pp. 57-59.
Architectura sine luce nulla architectura est: Sobre la luz, 1992

La Luz es componente esencial, imprescindible para la construcción de la Arquitectura. La Luz es MATERIA y MATERIAL. Como la piedra. Cuantificable y cualificable. Controlable y capaz de ser medida.

CAMPO BAEZA, Alberto; AGUIRRE LÓPEZ, Ignacio (ed): *La idea construida: La arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1998, pp. 57-78. *Idea, luz y gravedad, bien temperadas: sobre las bases de la Arquitectura, 1995*

MATERIAL LUJOSO. La luz es el material más hermoso, el más rico y el más lujoso utilizado por los arquitectos. El único problema es que se nos da gratuitamente, que está al alcance de todos y que entonces no se valora suficientemente.

CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires: Nobuko, 2009, p. 69. *Light is much more: Sobre la luz, 2008*

La luz, esa materia inmaterial que deja su libertad a los objetos alumbrándolos e iluminándolos pero sin consumirlos.

HEGEL, Georg Wilhelm Friedrich: *La Arquitectura* (3a Ed). Barcelona: Kairós, 2001, p. 17

HEGEL, Georg Wilhelm Friedrich

Cuando, hace ya muchos años, intenté estudiar las secuencias espaciales de la arquitectura, y especialmente de la arquitectura religiosa, me centré en los efectos, y por tanto en las posibilidades expresivas, que la mayor o menor presencia o presión de la materia nos produce, por aquel sentido ancestral de liberación que provoca en nosotros el

MORETTI, Luigi

espacio libre y de opresión que nos transmite la materia. De ahí que considerara las secuencias espaciales como secuencias de espacios abstractos, es decir, de relaciones puras entre la no-materia y la materia. Sin embargo, en seguida me quedó claro que tanto la no-materia, es decir el espacio, como la materia dependían, en el mundo real, de una sustancia que alteraba las relaciones abstractas entre ambas. Una sustancia de la que las dos se alimentaban: la luz. Y en algunos casos pude advertir cómo esta impalpable sustancia trastocaba, según su modulación, las relaciones geométricas entre unos espacios y otros, entre los espacios y la materia, entre los distintos tipos de materia entre sí, llegando a convertirse, en virtud de su calidad y de la modulación de su densidad, en el principal protagonista de la obra. (...) En el mundo de lo sensible los espacios están entretejidos por la luz y, en cierto sentido, tanto éstos como las cosas del mundo tiene como sustancia la luz.

MORETTI, Luigi; DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *Espacios-luz en la arquitectura religiosa*, "La luz y su anverso 03". Madrid: Lampreave, 2012, pp. 7-8

KAHN, Louis Isadore

La luz, la otorgadora de todas las presencias, es la creadora de un material, y el material se creó para proyectar sombra, y la sombra pertenece a la luz. (...) La evidencia de la creación, material de la luz ya ofrece un sentimiento de inspiración.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid: El Croquis, 2003, p. 245. *El silencio y la luz, 1969*

¿Qué son los materiales? He llegado a la conclusión de que los materiales son luz utilizada (es mejor llamarla así que decir luz agotada, porque esto evoca la idea de que es hora de irse a la cama); quiero decir que la luz se ha consumido con el fin de convertirse en un material. Si tenemos esto en mente, comprenderemos que todo es luz utilizada: las montañas, el aire, el agua, incluso nosotros mismos, que formamos parte de la naturaleza. Pero el deseo de ser, de expresar, debe haber surgido de unos impulsos maravillosos que eran ingrátidos y que influyeron en el mundo natural para hacer posible la creación de un ser vivo.

KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid: El Croquis, 2003, p. 356. *La armonía entre el hombre y la arquitectura, 1974*

La arquitectura es luz y sombra, pero me gusta separar ambos fenómenos y pensar en la luz de un modo positivo, como una sustancia que se conduce y se canaliza: como una sustancia que, en definitiva, llega a experimentarse igual que cualquier otro material constructivo.

NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante* (2a Ed).

Girona: Pre-textos de arquitectura, 2001, p. 47. *Gran interior amarillo*, 1993

La luz es uno de mis materiales básicos como arquitecto.

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006*. Madrid: El Croquis, nº133,

2006, p. 18

Hay ciertos materiales, que se denominan de construcción, cuyas cantidades y calidades se especifican y precisan antes de que hayan comenzado a levantar los cimientos. Pero además la arquitectura cuenta con otro que construye el espacio y nos viene dado. La luz. La luz es un material muy especial en el trabajo arquitectónico. Es el único que no está sometido a la fuerza de la gravedad.

VALERO RAMOS, Elisa: *La Materia intangible: reflexiones sobre la luz en el proyecto de arquitectura*.

Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004, p. 47

NAVARRO BALDEWEG, Juan

VALERO RAMOS, Elisa

IV.1. LA GRAVEDAD Y LA LUZ EN LA TEORÍA DE LA ARQUITECTURA.....	645
IV.1.1. Juan Navarro Baldeweg.....	645
IV.1.2. Alberto Campo Baeza.....	646
IV.1.3. Bibliografía española destacable sobre la gravedad y la luz en la arquitectura.....	648
IV.1.4. Orígenes del interés arquitectónico por la gravedad y la luz.....	650
IV.1.5. Conocimiento científico e intuición artística.....	651
IV.2. LA GRAVEDAD Y LA LUZ COMO FENÓMENOS FÍSICOS.....	652
IV.2.1. Obras generales.....	652
IV.2.2. Los primeros postulados de la antigüedad clásica.....	653
IV.2.3. La revolución científica del siglo XVII.....	653
IV.2.4. La física moderna de los siglos XIX-XX.....	656
IV.3. LA GRAVEDAD Y LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO.....	657
IV.3.1. Bibliografía genérica.....	657
IV.3.2. La resistencia a la gravedad y la oposición a la luz en la estructuración del espacio exterior.....	659
IV.3.3. El encauzamiento de la gravedad y la interiorización de la luz en la estructuración del espacio interior.....	660
IV.3.4. La victoria de la luz sobre la gravedad en la estructuración del espacio interior exteriorizado.....	662
IV.3.5. La abstracción de la gravedad y de la luz en la estructuración del espacio interior en continuidad con el exterior.....	663

La bibliografía aquí expuesta expresa la naturaleza poliédrica y panorámica de la presente investigación.

En relación a la primera parte de la tesis, se ofrece una visión general de las publicaciones destacables sobre la gravedad y la luz editadas durante las últimas décadas en nuestro país, haciendo especial mención a la obra de Juan Navarro Baldeweg y Alberto Campo Baeza. También se expone la bibliografía consultada para el análisis del origen histórico y conceptual del interés arquitectónico por ambos fenómenos, destacando a tal efecto los escritos de Vitrubio, Wren y Schopenhauer.

Para la segunda parte se muestra, en primer lugar, aquella bibliografía de carácter general que ha servido para construir el hilo conductor de la evolución histórica del conocimiento físico sobre la gravedad y la luz. Luego se han especificado aquellas obras relativas a los tres periodos analizados: los primeros postulados de la antigüedad clásica, la revolución científica del siglo XVII y la física moderna de los siglos XIX-XX. La consulta de esta bibliografía ha supuesto una gran dificultad, tanto por su variedad idiomática (castellano, catalán, inglés, francés, italiano e, incluso, latín) como por el contenido expuesto. Se han consultado tanto textos de divulgación como obras más específicas; unas veces se ha recurrido a traducciones comentadas, en otras ocasiones ha sido posible la consulta de ediciones originales e, incluso, manuscritos.

El grueso de la bibliografía de la tercera parte lo componen las publicaciones sobre las cuatro obras arquitectónicas analizadas como paradigmas de las distintas concepciones espaciales. Sin embargo, también se exponen referencias bibliográficas de carácter más general necesarias para definir el marco teórico sobre el que se fundamenta el estudio.

ESPAÑOL, Joaquín (ed): *Invitación a la arquitectura: diálogos con Oriol Bohigas, Juan Navarro Baldeweg, Oscar Tusquets, Albert Viaplana y Peter G. Rowe. Cinco reflexiones sobre la arquitectura que nos rodea*. Barcelona: RBA, 2002

LAHUERTA, Juan José; GONZÁLEZ GARCÍA, Ángel: *Juan Navarro Baldeweg: obras y proyectos*. Madrid: Electa, 1993

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Constelaciones. Transcripción de las conferencias impartidas por Juan Navarro Baldeweg dentro del ciclo "Perspectivas transversales" de la Cátedra Jorge Oteiza*. Navarra: Universidad Pública de Navarra, Cátedra Jorge Oteiza, 2011

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *El horizonte en la mano: discurso del académico electo Excmo. Sr. D. Juan Navarro Baldeweg leído en el acto de su recepción pública el día 19 de octubre de 2003 y contestación del Excmo. Sr. D. Joaquín Vaquero Turcios*. Madrid: Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, 2003

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg. IVAM, Centre del Carme: 17 mayo - 18 julio 1999*. València: IVAM, Institut Valencià d'Art Modern, 1999

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1982-1992*. Madrid: El Croquis, nº 54, 1992

IV.1.1.

Juan Navarro Baldeweg

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1992-1995*. Madrid: El Croquis, nº 73 (II), 1995

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: 1996-2006. Intervención en un campo de energías*. Madrid: El Croquis, nº 133, 2006

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: arquitectura, piezas y pintura. Fundación Marcelino Botín, Santander, junio/julio 1997*. Santander: Fundación Marcelino Botín, 1997

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Juan Navarro Baldeweg: Museo Español de Arte contemporáneo: Madrid, 11 de abril - 31 de mayo de 1986*. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes, 1986

NAVARRO BALDEWEG, Juan: *Navarro Baldeweg*. Madrid: Tanais, 2001

NAVARRO BALDEWEG, Juan; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz es el tema* (entrevista); en *DIAGONAL 34*, marzo 2013. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2013

NAVARRO BALDEWEG, Juan; LUPANO, Mario (ed): *Juan Navarro Baldeweg: il ritorno della luce*. Milano: Motta Editore, 1996

NAVARRO BALDEWEG, Juan; MUÑOZ MILLANES, José (ed): *La habitación vacante*. Girona: Pre-textos. Demarcació de Girona. Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, 1999

NAVARRO BALDEWEG, Juan; NAVARRO BALDEWEG, Margarita (ed): *Una caja de resonancia*. Valencia: Pre-textos, 2007

NAVARRO BALDEWEG, Juan; ZUAZNABAR, Guillermo (ed): *Juan Navarro Baldeweg: conversaciones con estudiantes*. Barcelona: Gustavo Gili, 2011

RODRÍGUEZ MORENO, Ignacio; MERCÉ HOSPITAL, José María (dir.): *La "habitación vacante" de Juan Navarro de Juan Navarro Baldeweg: análisis, origen e influencia de las ideas, mitos y conceptos de su experiencia aplicados a su arquitectura. (Tesis doctoral)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2004

IV.1.2.
Alberto Campo Baeza

BLANCO, Manuel: *Campo Baeza: light is more*. Madrid: T.F., 2003

BLANCO; Manuel: *Nature 03. Campo Baeza. El árbol de la creación*. Roma: MAXXI, 2011

CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: idea, light and gravity*. Tokyo: Toto, 2009

- CAMPO BAEZA, Alberto: *Alberto Campo Baeza: works and projects / with an essay by Antonio Pizza*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999
- CAMPO BAEZA, Alberto: *Aprendiendo a pensar*. Buenos Aires: Nobuko, 2008
- CAMPO BAEZA, Alberto: *Campo Baeza*. Madrid: Munilla-Lería, 1999
- CAMPO BAEZA, Alberto: *Campo Baeza 2*. Madrid: Munilla-Lería, 2009
- CAMPO BAEZA, Alberto: *Estereotómico y tectónico: unidad docente Alberto Campo Baeza*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Departamento de Proyectos Arquitectónicos: Maireia Libros, 2001
- CAMPO BAEZA, Alberto: *La Estructura de la estructura*. Buenos Aires: Nobuko, 2010
- CAMPO BAEZA, Alberto: *La Idea construida: la arquitectura a la luz de las palabras* (2a Ed). Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1996
- CAMPO BAEZA, Alberto: *Pensar con las manos*. Buenos Aires: Nobuko, 2009
- CAMPO BAEZA, Alberto: *Principia Architectonica*. Madrid: Maireia-UPM, 2013
- CAMPO BAEZA, Alberto: *Quiero ser arquitecto*. Madrid: Maireia-UPM, 2013
- CAMPO BAEZA, Alberto: *Un arquitecto es una caja*. Buenos Aires: Nobuko, 2013
- CAMPO BAEZA, Alberto; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz es el tema* (entrevista; en *DIAGONAL* 23, enero 2010. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2010
- FRAMPTON, Kenneth: *Labour, work and architecture: collected essays on architecture and design*. London: Phaidon, 2002
- FRAMPTON, Kenneth; CAVA, John (ed): *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*. Cambridge: the MIT Press, 1995. (Edición consultada: FRAMPTON, Kenneth: *Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX*. Madrid: Akal, 1999)
- FRAMPTON, Kenneth; GHIRARDO, Diane (ed.): *Reflections on the Autonomy of Architecture: A Critique of Contemporary Production*. Out of Site: A Social Criticism of Architecture. Seattle: Bay Press, 1991, pp. 17-26. (Edición consultada: FRAMPTON, Kenneth: *Reflexiones sobre la autonomía de la arquitectura: una crítica a la producción contemporánea*, en *Criterios*, La Habana, nº 31, enero-junio 1994).

HERNÁNDEZ DE LEÓN, Juan Miguel: *La Casa de un solo muro*. Madrid: Nerea, 1990

SEMPER, Gottfried; BURELLI, A. R. (ed): *Lo Stile nelle arti tecniche e tettoniche o estetica pratica : manuale per tecnici, artisti e amatori*. Roma: Editori Laterza, 1992

SEMPER, Gottfried; MALLGRAVE, Harry Francis (trad); HERRMANN Wolfgang (trad): *The Four elements of architecture and other writings*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989

IV.1.3.
Bibliografía española destacable
sobre la gravedad y la luz
en la arquitectura

APARICIO GUIADO, Jesús María: *Construir con la razón y los sentidos*. Buenos Aires: Nobuko, 2008

APARICIO GUIADO, Jesús María: *El muro: concepto esencial en el proyecto arquitectónico: la materialización de la idea y la idealización de la materia*. Buenos Aires: Universidad de Palermo, 2000. Tesis doctoral: APARICIO GUIADO, Jesús María; CAMPO BAEZA, Alberto (dir.); FRAMPTON, Kenneth (dir.): *El muro: concepto esencial en el proyecto arquitectónico: la materialización de la idea y la idealización de la materia*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 1994

APARICIO GUIADO, Jesús; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz es el tema* (entrevista); en *DIAGONAL 33*, septiembre 2012. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2012

ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos: *Peso y levedad: notas sobre la gravedad a partir del Danteum*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2007

ARNUNCIO PASTOR, Juan Carlos; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz es el tema* (entrevista); en *DIAGONAL 30*, diciembre 2011. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2011

BOTTA, Mario; CAPELLATO, Gabrielle (ed). *Mario Botta: Light and gravity: architecture 1993-2003*. Munich: Prestel, 2003

CASAL, José María: *El ambiente luminoso en el espacio arquitectónico*. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1978

CASSINELLO, Pepa: *La construcción de la luz: rastro de reflexiones y reflejos*. Madrid: Maira, 2011

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz es el tema* (entrevista); en *DIAGONAL 26*, diciembre 2010. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2011

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo; NAVARRO BALDEWEG, Juan (dir.): *La luz en la configuración del espacio: aproximación al significado y uso consciente de la luz en el Pantheon de Roma: los dispositivos de transformación (Tesis doctoral)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2006

FERRATER LAMBARRI, Carlos; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz es el tema (entrevista)*; en DIAGONAL 25, septiembre 2010. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2010

MARTÍ ARÍS, Carles; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *Laboratorio de luz (entrevista)*; en DIAGONAL 37, abril 2014. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2014

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz humana*; en DIAGONAL 31, marzo 2011. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2011

MEDINA DEL RÍO, Juan Manuel; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz natural como generadora del espacio arquitectónico de la catedral gótica (tesis)*; en DIAGONAL 35, junio 2013. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2013

MUROS ALCOJOR, Adrià; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz: de herramienta a lenguaje (tesis)*; en DIAGONAL 32, junio 2012. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2012

NIETO ALCAIDE, Víctor: *La luz, símbolo y sistema visual*. Madrid: Cátedra, 1978

NIETO ALCAIDE, Víctor; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz es el tema (entrevista)*; en DIAGONAL 28, junio 2011. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2011

ORDEN, Verónica; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *Luz de norte (tesis)*; en DIAGONAL 29, septiembre 2011. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2011

ORDEN, Verónica; SOLAGUREN-BEASCOA, Félix (dir.): *Luz del norte (tesis doctoral)*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Superior de Arquitectura de Barcelona, 2010

TORRES TUR, Elías: *Luz cenital*. Barcelona: COAC, 2005. Publicación de la tesis doctoral TORRES TUR, Elías; FLORENSA SERRA, Rafael (dir.): *Luz cenital*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Superior de Arquitectura de Barcelona, 1993

VALERO RAMOS, Elisa: *Diccionario de la luz*. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004

VALERO RAMOS, Elisa: *La materia intangible: reflexiones sobre la luz en el proyecto de arquitectura*. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004. Publicación de la tesis doctoral VALERO RAMOS, Elisa; GALLEGO ROCA, Francisco Javier (dir); MINGO MACÍAS, Luís Alberto (dir): *Análisis de la luz en el proyecto de arquitectura*. Granada: Universidad de Granada, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Granada: 2000

VALERO RAMOS, Elisa; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz es el tema (entrevista)*; en *DIAGONAL 24*, mayo 2010. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2010

YÁÑEZ PARAREDA, Guillermo: *Arquitectura solar e iluminación natural: conceptos, métodos y ejemplos*. Madrid: Munilla-Lería, 2008

YÁÑEZ PARAREDA, Guillermo; LINARES DE LA TORRE, Oscar (ed): *La luz es el tema (entrevista)*; en *DIAGONAL 36*, enero 2014. Barcelona: Associació Revista Diagonal, 2014

IV.1.4.
**Orígenes del interés arquitectónico
por la gravedad y la luz**

BENNETT, J. A.: *The mathematical science of Christopher Wren*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982

CROWTHER, James Gerald: *Founders of British science: John Wilkins, Robert Boyle, John Ray, Christopher Wren, Robert Hooke, Isaac Newton*. London: The Cresset Press, 1960

DUTTON, Ralph: *The Age of Wren*. Londres: Batsford, 1951

HEGEL, Georg Wilhelm Friedrich: *La Arquitectura* (3a Ed). Barcelona, Kairós, 2001

HEGEL, Georg Wilhelm Friederich; GINER DE LOS RÍOS, Hermenegildo (trad): *Estética*, Vol. 1. Barcelona: Alta Fulla, 1988

JACQUETTE, Dale (ed): *Schopenhauer, philosophy, and the arts*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996

KANT, Immanuel: *Prolegómenos*. Madrid: Sarpe, 1984

KANT, Immanuel; DUQUE, Félix (ed): *Transición de los principios metafísicos de la ciencia natural a la física. Opus Postumum*. Barcelona: Anthropos; Madrid: Universidad Autónoma de Madrid, 1991

KANT, Immanuel; GARCÍA MORENTE, Manuel (ed): *Crítica del juicio*, 10ª ed. Madrid: Austral, 2004

SCHOPENHAUER, Arthur: *El Mundo como voluntad y representación* (4a Ed). México: Porrúa, 1997

SOO, Lydia M.: *Wren's "tracts" on architecture and other writings*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998

VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): *Los Diez Libros de Arquitectura*. Madrid: Akal, 1987. (Facsímil de la edición original en Madrid: Imprenta Real, 1787)

VITRUVIO POLIÓN, Marco; ROSE, Valentinus: *Vitruvii de Architectura, Libri Decem*. Lipsiae (Leipzig): in aedibus B.G. Teubner, 1867

WHINNEY, Margaret Dickens: *Wren*. London: Thames and Hudson, 1971

WREN, Christopher: *Parentalia; or, Memoirs of the family of the Wrens (...) chiefly of Sir Christopher Wren ... compiled by his son Christopher, now published by his grandson, Stephen Wren, with the care of Joseph Ames*. London: T. Osborn, 1750

WAGENSBERG, Jorge: *A más cómo menos por qué. 747 reflexiones con la intención de comprender lo fundamental, lo natural y lo cultural*. Barcelona: Tusquets, 2006

IV.1.5.
Conocimiento científico
e intuición artística

WAGENSBERG, Jorge: *Ideas para la imaginación impura. 53 reflexiones en su propia sustancia*. Barcelona: Tusquets, 1998

WAGENSBERG, Jorge: *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets, 2003

WAGENSBERG, Jorge: *La rebelión de las formas, o, cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta* (2a Ed). Barcelona: Tusquets, 2004

WAGENSBERG, Jorge: *Si la naturaleza es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?, y otros quinientos pensamientos sobre la incertidumbre* (5a Ed). Barcelona: Tusquets, 2003

IV.2. LA GRAVEDAD Y LA LUZ COMO FENÓMENOS FÍSICOS

IV.2.1. BOVA, Ben: *Historia de la luz*. Madrid: Espasa Calpe, 2004

Obras generales

COROMINAS, Joan: *Diccionario crítico etimológico de la lengua castellana*. Madrid: Gredos, 1954

LIGHTMAN, Alan: *Grandes ideas de la física: cómo los descubrimientos científicos han cambiado nuestra visión del mundo*. Madrid: McGraw Hill, 1995

KUHN, Thomas S.: *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de cultura económica, 2004

LOZANO LEYVA, Manuel: *De Arquímedes a Einstein. Los diez experimentos más bellos de la física* (3ª Ed). Barcelona: Debate, 2005

UDÍAS VALLINA, Agustín: *Historia de la física: De Arquímedes a Einstein*. Madrid: Síntesis, 2004

ZAJONC, Arthur: *Atrapando la luz. Historia de la luz y de la mente* (3ª Ed). Barcelona: Andrés Bello, 1996

ARISTÓTELES; ECHANDÍA, Guillermo R. (ed): *Física / Aristóteles*. Madrid: Gredos, 1995

ARISTÓTELES; LLANOS, Alfredo (ed): *Sobre el alma*. Buenos Aires: Juárez, 1969

ARQUÍMEDES; ORTIZ GARCÍA, Paloma (ed): *Tratados II*. Madrid: Gredos, 2009

EUCLIDES; VEGA, Luis (ed); PUERTAS CASTAÑOS, María Luisa (ed): *Elementos*. Madrid: Gredos, 1988

SAMBURSKY, Samuel: *El mundo físico de los griegos*. Madrid: Alianza, 1999

STRATHERN, Paul: *Arquímedes y la palanca*. Madrid: Siglo XXI, 1999

AAV: *Classified Papers*. London: Royal Society, 1660-1741. Recopilación de documentos manuscritos depositada en el Centre for History of Science de la Royal Society en Londres (Ref. No.: Cl.P/volume). Volúmenes consultados: Vol. 2: *Surveying, Optics, Perspective, Sculpture, Painting, Music, Mechanics*. Vol. 3: *Mechanics, Trades*. Vol. 6: *Staticks, Hydrostatics, Hydraulics, Hydrology*. Vol. 7: *Architecture, Ship-building, Geography, Navigation, Voyages, Travel*. Vol. 8: *Astronomy*.

DESAGULIERS, John Theophilus: *Account of some of Isaac Newton's experiments showing the properties of light and colour [13 figures showing angles and spectrum of colours. Read at the Royal Society in July 1714]*. Documento manuscrito depositado en el Centre for History of Science de la Royal Society en Londres (Ref. No.: Cl.P/18ii/7)

DESAGULIERS, John Theophilus: *Experiments of light and colour formerly made by Isaac Newton by J T Desaguliers [Experiments repeated before the Royal Society on 24 June 1714. Read to the Royal Society on 8 July 1714]*. Documento manuscrito depositado en el Centre for History of Science de la Royal Society en Londres (Ref. No.: Cl.P/18ii/6)

DESCARTES, René; QUINTÁS, Guillermo (ed): *Discurso del método. La dióptrica. Los meteoros. La geometría*. Barcelona: Círculo de lectores, 1996

DESCARTES, René; TURRÓ, Salvio (ed): *El Mundo. Tratado de la luz*. Barcelona: Anthropos; Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1989

FERRAZ FAYOS, Antonio: *Teorías sobre la naturaleza de la luz: de Pitágoras a Newton*. Madrid: Dossat, 1974

GALILEI, Galileo; AZCÁRATE, Carmen (ed): *La nueva ciencia del movimiento. Selección de los Discorsi*. Barcelona: Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 1988

IV.2.2.

Los primeros postulados de la antigüedad clásica

IV.2.3.

La revolución científica del siglo XVII

GALILEI, Galileo; BELTRÁN MARÍ, Antonio (ed): *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*. Madrid: Alianza, 1995

GÓMEZ, Susana: *Galileo y la naturaleza de la luz*. En MONTESINOS, José (ed): *Largo campo di filosofare*. Canarias: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 2001, pp. 403-419

HOOKE, Robert: *Lectiones Cutlerianae; or, A collection of lectures, physical, mechanical, geographical & astronomical, made before the Royal Society on several occasions at Gresham College; to which are added divers miscellaneous discourses*. London: John Martyn, 1679

HOOKE, Robert; WALLER, Richard (ed): *The posthumous works of Robert HOOKE... containing his Cutlerian lectures, and other discourses read at the meetings of the... Royal Society... to these discourses is prefixt the author's life*. London: Sam. Smith & Benj. Walford, 1705

HUYGENS, Christiaan: *Traite De La Lvmiere. Où sont expliquées: Les causes de ce qui luy arrive Dans la Reflexion, & dans la Refraction; Et particulièrement Dans l'etrange Refraction Dv Cristal D'Islande; Avec un Discours de la Cause De La Pesantevr / Par C. H. d. Z.* Leide: Chez Pierre Vander Aa, Marchand Libraire, 1690. Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel [en línea: consulta: 20 junio 2011]. Disponible en: <<http://diglib.hab.de/drucke/nc-534/start.htm>>

HUYGENS, Christiaan; BLACKWELL, Richard J. (ed): *Christiaan Huygen's the pendulum clock, or, Geometrical demonstrations concerning the motion of pendula as applied to clocks*. Ames: The Iowa State University Press, 1986

HUYGENS, Christiaan; THOMPSON, Silvanus P. (ed): *Treatise On Light*. London: Macmillan And Company, 1912

KEPLER, Johannes; MALET, Antoni (ed): *Paralipòmens a Vitel·lió: els orígens de l'òptica moderna*. Barcelona: Eumo, 2010

KOESTLER, Arthur: *Kepler*. Barcelona: Salvat, 1985

NEWTON, Isaac: *A discourse Of Mr Isaac Newton containing his New Theory about Light and Colours, sent by him from Cambridge February 6 1672*. Documento manuscrito depositado en el Centre for History of Science de la Royal Society en Londres (Ref. No.: RBO/4/44)

NEWTON, Isaac: *A treatise of the system of the world, translated into English*. London: F. Fayram, 1728

NEWTON, Isaac: *Mr Isaac Newton's Observations Mentioned in his foregoing Hypothesis, and conducing to further Discoveries for completing his Theory of Light and Colors [Details of 24 experiments and observations touching light and colours with analysis Read to the Royal Society on 20 January 1676]*. Documento manuscrito depositado en el Centre for History

of Science de la Royal Society en Londres (Ref. No.: RBO/5/4)

NEWTON, Isaac: *Opticks; or, A treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light; also, Two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures*. London: Sam. Smith and Benj. Walford, printers to the Royal Society, 1704

NEWTON, Isaac: *Opticks; or, A treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light (2ª ed)*. London: W. & J. Innys, printers to the Royal Society, 1718

NEWTON, Isaac: *Opticks; or, A treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light (3ª ed)*. London: W. & J. Innys, printers to the Royal Society, 1721

NEWTON, Isaac: *Opticks; or, A treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light (4ª ed)*. London: William Innys, 1730

NEWTON, Isaac: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica [1685: Manuscript from which the First Edition was printed. Written out by Humphrey Newton, Isaac Newton's assistant and amanuensis, and annotated by Newton and Halley]*. Documento manuscrito depositado en el Centre for History of Science de la Royal Society en Londres (Ref. No.: MS/69)

NEWTON, Isaac: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Londini: Societatis Regiae ac typis Josephi Streater; prostat apud plures bibliopolas, 1687

NEWTON, Isaac; COTES, Roger (Ed): *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (2ª ed)*. Cantabrigiae: 1713

NEWTON, Isaac; COTES, Roger (Ed); PEMBERTON, Henry (Ed): *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (3ª ed)*. Londini: Guil. & Joh. Innys, Regiae Societatis typographos, 1726

NEWTON, Isaac; ESCOHOTADO, Antonio (ed): *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid: Editora Nacional, 1982

NEWTON, Isaac; SOLÍS, Carlos (ed): *Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*. Madrid: Alfaguara, 1977

ROMO FEITO, José: *La Física de Galileo: la problemática en torno a la ley de caída de los cuerpos*. Bellaterra: Seminario e Historia de las ciencias, Universidad Autónoma de Barcelona, 1985

STRATHERN, Paul: *Arquímedes y la palanca*. Madrid: Siglo XXI, 1999

STRATHERN, Paul: *Galileo y el sistema solar*. Madrid: Siglo XXI, 1999

STRATHERN, Paul: *Newton y la gravedad*. Madrid: Siglo XXI, 1999

IV.2.4.
La física moderna
de los siglos XIX-XX

BAIERLEIN, Ralph: *Newton to Einstein, the trail of light*. Cambridge, Cambridge University Press, 1992

EINSTEIN, Albert: *La relatividad: memorias originales*. Buenos Aires: Emecé, 1950

EINSTEIN, Albert: *Mi visión del mundo* (6ª Ed). Barcelona: Tusquets, 2006

EINSTEIN, Albert: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza, 1984

EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold: *La evolución de la física*. Barcelona: Salvat, 1986

EINSTEIN, Albert; RUIZ DE ELVIRA (trad), Antonio: *Cien años de relatividad: los artículos de Albert Einstein de 1905 y 1906*. Madrid: Nivola, 2004

FRANCO GONZÁLEZ, Fidel: *El Campo unificado*. Departamento de Física Aplicada E.T.S.A.B. Universidad Politécnica de Cataluña, 1990

HAWKING, Sthephen (ed); WERNER, Israel (ed): *300 Years of Gravitation* (1st paperback edition, with corrections). Cambridge: Cambridge University Press, 1989

STRATHERN, Paul: *Einstein y la relatividad*. Madrid: Siglo XXI, 1999

WHEELER, John Archibald: *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza Editorial, 1994

IV.3. LA GRAVEDAD Y LA LUZ EN LA ESTRUCTURACIÓN DEL ESPACIO

BENVENUTO, Edoardo: *An Introduction to the history of structural mechanics*. New York: Springer-Verlag, 1991

BROWN, G. Z.; DEKAY, Mark: *Sun, wind, & light: architectural design strategies*. New York: John Willey & Sons, 2001

CORTÉS, Juan Antonio: *Lecciones de equilibrio*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2006

DA VINCI, Leonardo; GONZÁLEZ GARCÍA, Ángel (ed): *Tratado de pintura*. Madrid: Akal, 1986

ELWALL, Robert: *Building with light: the international history of architectural photography*. London: RIBA 2004

ENGEL, Heino: *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001

FUTAGAWA, Yukio; MIYAKE, Riichi; PORTOGHESI, Paolo: *Light and Space: modern architecture*. Tokyo: A.D.A. Edita 1994

GANNON, Todd (ed): *The light construction reader*. New York: The Monacelli Press, 2002

GIEDION, Sigfried: *El Presente eterno: una aportación al tema de la constancia y el cambio*. Madrid: Alianza, 1981

IV.3.1.

Bibliografía genérica

- GIEDION, Sigfried: *Espacio, tiempo y arquitectura: el futuro de una nueva tradición* (5a ed.). Madrid: Dossat, 1978
- GIEDION, Sigfried: *La Arquitectura, fenómeno de transición: las tres edades del espacio en arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 1975
- IÑIGUEZ, Manuel: *La Columna y el muro: fragmentos de un diálogo*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2001
- KAHN, Louis I.; LATOUR, Alessandra (Ed.): *Louis I. Kahn. Escritos, conferencias y entrevistas*. Madrid: El Croquis, 2003
- KALTHOF, Otto; NONAKA, Ikujiro; NUENO, Pedro; CORRONS PRIETO, Luis (trad): *La luz y la sombra*. Bilbao: Deusto, 1998
- KEPES, Gyorgy (ed): *Structure in art and in science*. London: Studio Vista, 1995
- LOU, Michel: *Light: the shape of space: designing with space and light*. New York: John Willey, 1995
- MAJOR, Mark; SPEIRS, Jonathan; TISCHHAUSER, Anthony: *Made of light: the art of light and architecture*. Basel: Birkhäuser, 2005
- MALÉVICH, Kazimir Severionovich; DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo (Ed): *La luz y el color*. Madrid: Lampreave, 2012
- MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luís: *Intersecciones*. Alcorcón (Madrid): Rueda, 2004
- MILLET, Marietta S.: *Light revealing architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1996
- MORETTI, Luigi; DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo (Ed): *Espacios-luz en la arquitectura religiosa*. Madrid: Lampreave, 2012
- NORBERG-SCHULZ, Christian: *Existencia, Espacio y Arquitectura*. Barcelona: Blume, 1975
- PARICIO Ansuategui, Ignacio: *La Construcción de la arquitectura. Los elementos* (3ª ed). Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, 1996
- PLUMMER, Henry: *La arquitectura de la luz natural*. Barcelona: Blume, 2009
- SEDLMAYR, Hans; DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo (Ed): *La luz en sus manifestaciones artísticas*. Madrid: Lampreave, 2012
- SORIANO, Federico: *Sin Tesis*. Barcelona: Gustavo Gili, 2004

TORROJA MIRET, Eduardo: *Razón y ser de los tipos estructurales* (3a Ed). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2007

VACCHINI, Livio; MASIERO, Roberto (ed): *Obras maestras*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009

ATKINSON, Richard John Copland: *Stonehenge*. London: Hamish Hamilton, 1956

ATKINSON, Richard John Copland: *Stonehenge*. Harmondsworth: Penguin, 1979

ATKINSON, Richard John Copland: *Stonehenge and Avebury and neighbouring monuments: an illustrated guide*. London: Her Majesty's Stationary Office, 1959

ATKINSON, Richard John Copland: *Stonehenge and neighbouring monuments*. London: H.M.S.O., 1978

ATKINSON, Richard John Copland: *What is Stonehenge?*. London: Her Majesty's Stationary Office, 1962

BENDER, Barbara: *Stonehenge: making space*. Oxford: Berg, 1998

BRADLEY, Richard: *The Significance of monuments: on the shaping of human experience in Neolithic and Bronze Age Europe*. London: Routledge, 1998

BURL, Aubrey: *The Stone circles of the British Isles*. New Haven: Yale University Press, 1976

CHIPPINDALE, Christopher: *Stonehenge complete*. London: Thames and Hudson, 1983

CHIPPINDALE, Christopher: *Stonehenge: en el umbral de la historia*. Barcelona: Destino, 1989

HAWKINGS, Gerald S.: *Stonehenge decoded*. Fontana: Collins, 1977

HEATH, Robin: *Stonehenge: temple of ancient Britain*. Glastonury: Wooden Books, 2009

HEGGIE, Douglas C.: *Megalithic science: ancient mathematics and astronomy in North-West Europe*. London: Thames and Hudson, 1981

HOYLE, Fred: *De Stonehenge a la cosmología contemporánea*. Madrid: Alianza, 1976

IV.3.2.

**La resistencia a la gravedad
y la oposición a la luz
en la estructuración del
espacio exterior**

HOYLE, Fred: *On Stonehenge*. London: Heinemann Educational Books, 1977

NORTH, John: *Stonehenge: a new interpretation of prehistoric man and the cosmos*. New York: The Free Press, 1996

RICHARDS, Julian: *Stonehenge (2ª ed)*. London: English Heritage Guidebooks, 2012

RICHARDS, Julian: *Stonehenge: The eternal mystery in pictures*. London: English Heritage Guidebooks, 2011

RICHARDS, Julian: *Stonehenge: The story so far*. Swindon: English Heritage, 2007

ROYAL COMMISSION ON HISTORICAL MONUMENTS, England: *Stonehenge and its environs: monuments and land use*. Edinburgh: University Press, 1979

STONE, Herbert: *The stones of Stonehenge: a full description of the structure and of its outworks*. London: Scott, 1924

STOVER, Leon.: *Stonehenge: and the origins of Western culture*. London: Heinemann, 1979

STOVER, Leon: *Stonehenge city: a reconstruction*. London: McFarland, 2003

THOM, Alexander: *Megalithic sites in Britain*. Oxford: Clarendon, 1967

TWIST, Richard Marsden: *Stonehenge: a classical interpretation*. Cornwall: R.M. Twist, 1971

VATCHER, Lance; BERGSTROM, Theo: *Stonehenge*. London: Bergstrom and Boyle Books, 1977

WAINWRIGHT, Geoffrey: *The Henge monuments: ceremony and society in prehistoric Britain*. London: Thames and Hudson, 1989

IV.3.3.

El encauzamiento de la gravedad y la interiorización de la luz en la estructuración del espacio interior

ADAM, Jean-Pierre: *La Construcción romana: materiales y técnicas*. León: Editorial de los oficios, 1996

BELARDI, Giovanni: *Il Pantheon: storia, tecnica e restauro*. Roma: Betagamma, 2006

CONFORTI, Claudia (ed): *Lo Specchio del cielo: forme significati tecniche e funzioni della cupola dal Pantheon al Novecento*. Milano: Electa, 1997

CHOISY, Auguste; HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago (ed); GIRÓN SIERRA, Francisco Javier (ed): *El Arte de construir en Roma*. Madrid: CEHOPU, 1999

DE MIGUEL ARBONÉS, Eduardo: *La Luz en la configuración del espacio*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006

ESCRIG, Félix: *Las Grandes estructuras de los edificios históricos: desde la antigüedad hasta el gótico*. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 1997

GAMBARDELLA, Alfonso (ed): *Dal Pantheon a Brunelleschi: architettura costruzione tecnica*. Napoli: Edizioni Scientifiche Italiane, 2002

LUCCHINI, Flaminio: *Pantheon*. Roma: NIS, 1996

LUGLI, Giuseppe: *Il Pantheon e i monumenti adiacenti*. Roma: Bardi, 1963

MACDONALD, W. L.; *The Pantheon: design, meaning and progeny*. Cambridge: Harvard University Press, 1976

MACGREGOR, Anne: *Domes*. Leeds: Pepper Press, 1981

MONTERO FERNÁNDEZ, Francisco Javier: *El Panteón: imagen, tiempo y espacio: proyecto y patrimonio*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2004

PALLADIO, Andrea; RIELLO, José (ed): *Las Antigüedades de Roma*. Tres Cantos (Madrid): Akal, 2008

ROBERTSON, D. S.: *Arquitectura griega y romana*. Madrid: Cátedra, 1981

RUGGIERI, Gianfranco: *Guía del Panteón*. Roma: Editoriale Museum, 1995

STAMPER, John W.: *The Architecture of Roman temples: the republic to the middle empire*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005

TAYLOR, Rabun: *Los Constructores romanos: un estudio sobre el proceso arquitectónico*. Tres Cantos: Akal, 2006

VITRUVIO POLIÓN, Marco; ORTIZ Y SANZ, José (ed.): *Los Diez Libros de Arquitectura*. Madrid: Akal, 1987. (Facsímil de la edición original en Madrid: Imprenta Real, 1787)

WADDELL, Gene: *Creating the Pantheon: design, materials and construction*. Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2008

IV.3.4.
La victoria de la luz
sobre la gravedad
en la estructuración del
espacio interior exteriorizado

Exposition Universelle de 1889. Plan Général des Divers Palais. Paris: Bernardin-Béchet et fils, 1889

ALPHAND, Adolphe; GEORGES BERGUER, M.; ALFRED PICARD, M.: *Exposition Univeselle Internationale de 1889 a Paris. Monographie. Palais, Jardins, Construccions Diverses, Installations Gènèrales.* Paris: J. Rothschild, 1892-1895

ANTIGÜEDAD, María Dolores; AZNAR, Sagrario: *El siglo XIX: el cauce de la memoria.* Madrid: Istmo, 1998

ARAUJO ARMERO, Ramón: *Construir en acero: forma y estructura en el espacio continuo*, en TECTÓNICA: monografías de arquitectura, tecnología y construcción. Nº 33: *Rehabilitación: la arquitectura moderna*, Junio 2010. Madrid: ATC Ediciones, 2010

CHARLTON, Thomas Malcolm: *A History of theory of structures in the nineteenth century.* Cambridge: Cambridge University Press, 1982

DURANT, Stuart: *Palais des Machines: Ferdinand Dutert.* London: Phaidon, 1994

GIEDION, Sigfried; GEORGIADIS, Sokratis: *Building in France, building in iron, building in ferro-concrete.* Santa Monica: Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995

MCKEAN, John: *Lost masterpieces.* London: Phaidon, 1999

MIDDLETON, Robin: *Architecture of the nineteenth century.* Milano: Electa, 2003

MIGNOT, Claude: *Architecture of the 19th century.* Fribourg: Evergreen, 1983

NORTH, John: *Mid-nineteenth-century scientists.* Oxford: Pergamon Press, 1969

PETERS, Tom F.: *Building the nineteenth century.* London: The MIT Press, 1996

RODRIGUEZ CHEDA, José Benito; RAYA DE BLAS, Antonio: *Arquitectura de vidrio*, en TECTÓNICA: monografías de arquitectura, tecnología y construcción. Nº 10: *Vidrio (I)*, 3ª Ed, Junio 2004. Madrid: ATC Ediciones, 2000

STAMPER, John, W. (Ed): *The Galerie des Machines of the 1889 Paris world's fair.* En THORNE, Robert (ed): *Structural Iron and steel, 1850-1900.* Aldershot: Ashgate, 2000

VIGREUX, Charles. *Revue technique de l'Exposition Universelle de 1889. Première Partie: l'Architecture.* Paris: E. Bernard et Cie (ed), 1893

AAVV. DPA 16. *Abstracción*. Barcelona: Edicions UPC, 2000

ALBINI, Franco; BUCCI, Federico (ed). *Zero Gravity: costruire le modernità*. Milano: Electa, 2006

ALMONACID CANSECO, Rodrigo: *Mies van der Rohe: el espacio de la ausencia*. Valladolid: Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial, 2006

ASENSIO, Paco (ed); CUITO, Aurora (ed): *Mies van der Rohe*. Madrid: Loft, 2002

BLASER, Werner: *Mies van der Rohe (6a Ed)*. Barcelona: Gustavo Gili, 1987

BLASER, Werner; HORNE, Matilde (trad): *Mies van der Rohe: el arte de la estructura*. México D.F.: Hermes, 1965

CARTER, Peter: *Mies van der Rohe trabajando*. London: Phaidon 2006

COHEN, Jean-Louis: *Mies van der Rohe*. Madrid: Akal, 2007

COHEN, Jean-Louis: *The future of architecture since 1889*. London: Phaidon, 2012

GUTIÉRREZ CALDERÓN, Pablo Jesús: *Después de Einstein: una arquitectura para una teoría*, Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013

JÄGER, Joachim: *Neue Nationalgalerie Berlin: Mies van der Rohe*. Ostfildern: Hatje Cantz, 2011

MONEO VALLÉS, Rafael: *La Llegada de una nueva técnica a la arquitectura: las estructuras reticulares de hormigón*. Barcelona: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona. Cátedra de Elementos de Composición, 1976

NEUMEYER, Fritz (ed): *Mies van der Rohe: la palabra sin artificio: reflexiones sobre la arquitectura 1922-1968*. Madrid: El Croquis Editorial, 1995

OVERY, Paul: *Light, air & openness: modern architecture between the wars*. London: Thames & Hudson, 2007

PUENTE, Moisés (ed): *Conversaciones con Mies van der Rohe: certezas americanas*. Barcelona: Gustavo Gili, 2006

RILEY, Terence; BERGDOLL, Barry: *Mies in Berlin*. New York: Museum of Modern Art, 2001

ROWE, Colin: *Manierismo y arquitectura moderna y otros ensayos*. Barcelona: Gustavo Gili, 1999

IV.3.5.

La abstracción de la gravedad y de la luz en la estructuración del espacio interior en continuidad con el exterior

SAFRAN, Yehuda; TRIGUEIROS, Luiz (ed); MARTIN BARATA, Paulo (ed): *Mies van der Rohe*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001

SCHULZE, Franz (ed): *Mies van Rohe: critical essays*. New York: The Museum of Modern Art, 1989

SCHULZE, Franz (ed); DANFORTH, George E.: *The Mies van der Rohe Archive: an illustrated catalogue of the Mies van der Rohe drawings in the Museum of Modern Art. Part II; volume XIX: New National Gallery, Martin Luther King Jr. Memorial Library, and other buildings and projects*. New York and London: Garland, 1992

SPAETH, David: *Mies van der Rohe*. Barcelona: Gustavo Gili 1986

VANDENBERG, Maritz: *New National Gallery, Berlin: Ludwig Mies van der Rohe*. London: Phaidon, 1998

WACHTER, Gabriela (ed); Peter Craven (trad): *Mies van der Rohe: Neue Nationalgalerie in Berlin*. Berlin: Vice Versa, 1995

ZIMMERMAN, Claire: *Mies van der Rohe: 1886-1969: la estructura del espacio*. Köln: Taschen, 2006