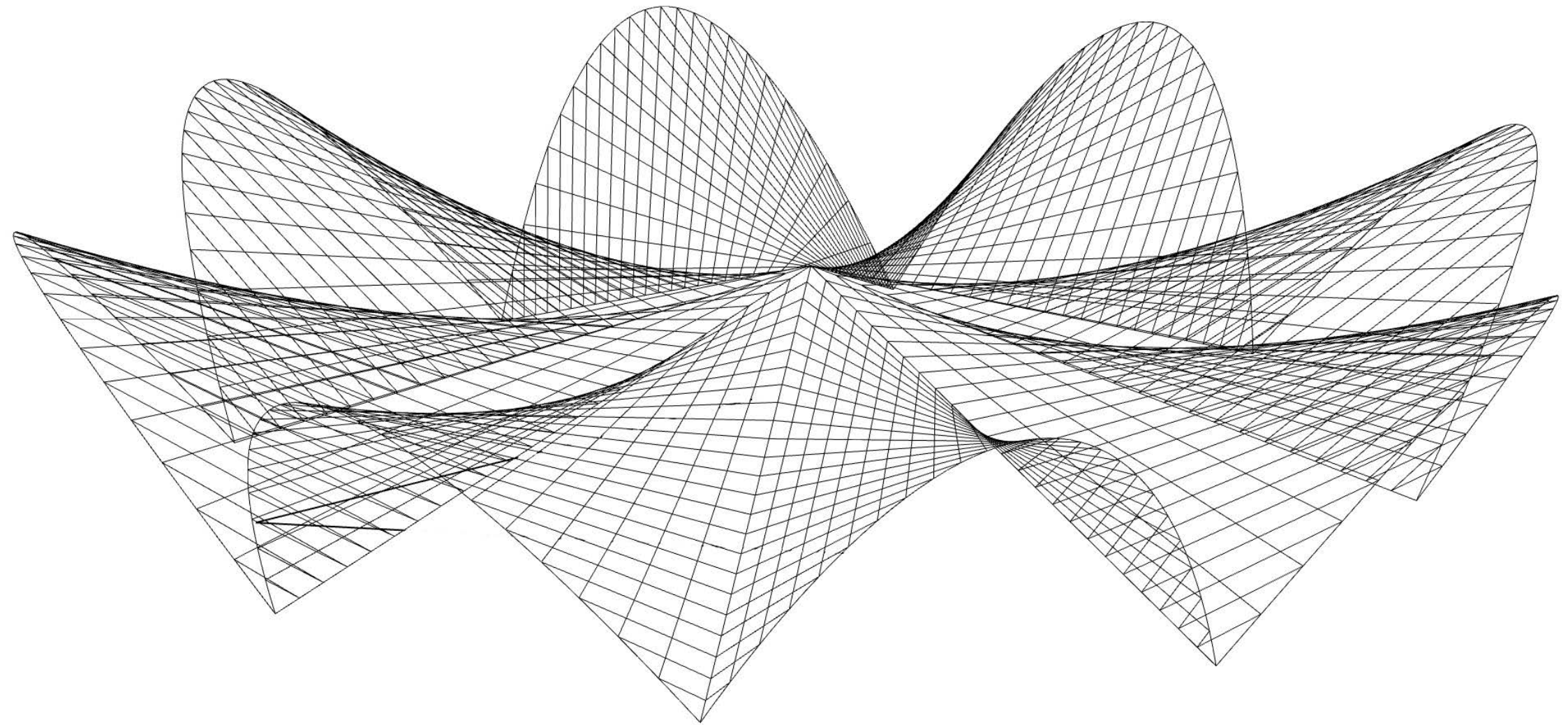
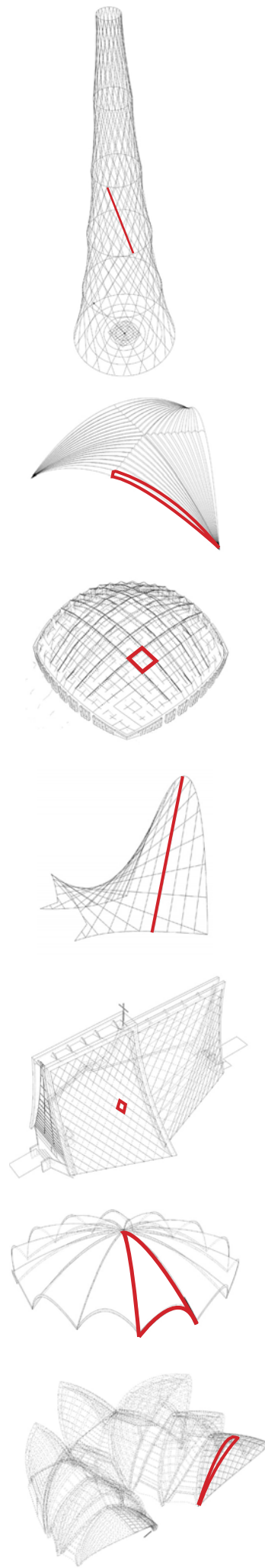


ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



LÓGICAS PARAMÉTRICAS EN LA ARQUITECTURA DEL SIGLO XX

MAITE BRAVO MARTÍNEZ

LÓGICAS PARAMÉTRICAS EN LA ARQUITECTURA DEL SIGLO XX

DEPARTAMENTO DE PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS | ETSAB | UPC

TESIS DOCTORAL REALIZADA POR :

MAITE BRAVO MARTÍNEZ

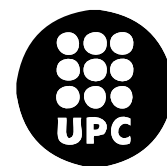
DIRECTOR:

ALFRED LINARES SOLER

CODIRECTOR:

AMADEO MONREAL PUJADAS

BARCELONA, NOVIEMBRE 2015.



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CATALUÑA

ABSTRACT

Architecture's progression into the digital age is fundamentally changing contemporary practice due to the rapid development of digital tools available to architects, which are deeply affecting how projects are conceived, formulated, developed and constructed. The emergence of Building Information Modeling (BIM) has reached unprecedented relevance at the beginning of the XXI century within some academic and practicing architectural sectors. BIM tools are usually based on parametric design, a method that allows the design of element behavior through powerful linkage methods with changeable dimensions. Parametric tools are enabling the use of complex geometries, and have produced a multitude of highly suggestive freeform projects. For many architects, these developments are viewed either as banal proposals, products of digital intelligence (Meredith 2009), representative a mature style (Schumacher 2008), or even changing the very basis of architecture. These positions coexist, gravitating between unconditional support, skepticism, and criticism, and share a generalized ambiguity with respect to their underpinning fundamentals and principles, which has created widespread concern amongst academia and practicing architects.

This research theorizes that parametric design is not only a powerful tool and a product of digital intelligence, but that it's also an important "logic" found persistently within the history of architecture. In particular, several architects and engineers started to formulate parametric concepts throughout the XX century, initially without the use of computation. These early experiments represent architectural production of significant quality, but despite their pivotal contribution to innovation, their legacy is currently absent within architectural practice and theoretical discourses, due to the lack of research about their guiding principles, historical references, and conceptual developments.

A genealogy of over 40 selected projects has been constructed, with each exhibiting parametric logics throughout their conception, design and construction, before the use of digital tools from 1890 to 1980. These projects are reconstructed digitally using current parametric platforms (Rhino with Grasshopper plug-in) to unveil their generative logics and study their underlying codification. Their basic parameters are revealed, which testify a close relationship between materiality, construction systems, geometrical bases, and structural limitations. Multiple genealogies between projects can be traced, allowing further relationships and sequences among innovative research agendas. Furthermore, important collaborations between the project's authors are revealed, within a body of knowledge that still remains unknown to a vast architectural community.

Proving that the use of parametric logic is historically deeply interwoven into the interdisciplinary nature of innovative architectural practice, this research identifies that current digital tools are continuing these logics, and are extrapolating them to unforeseen levels. By questioning some of the superficial and misinformed opinions that are currently abundant within the realm of architectural digital production, this thesis provides a series of theoretical and practical precedents, which were developed prior to the appearance of digital tools. This knowledge should be continued and expanded to help resolve current discrepancies between advanced architectural practice and some traditional theoretical discourses. If the practice of architecture must respond to the paradigms of its time, it is imperative to situate innovation within a coherent and rigorous architectural knowledge that is part of a permeable and always alive and changing architectural history (Giedion 1941).

Keywords: Parametric Design, Associative Design, Digital Tools, Digital Architecture.

La rápida diseminación de herramientas digitales ha generado un profundo cambio en la práctica arquitectónica contemporánea, afectando como los proyectos se conciben, diseñan y construyen. Uno de los aportes más significativos dentro de las herramientas digitales a principios del siglo XX es la aparición del modelamiento computacional en 3D o BIM, un sistema basado en diseño paramétrico, que permite diseñar relaciones entre elementos en lugar de producir objetos dimensionados.

La amplia difusión de diversas plataformas digitales paramétricas han alcanzado una importancia sin precedente dentro de sectores arquitectónicos vanguardistas, generando una proliferación de proyectos altamente sugerentes de “formas libres”. Estas propuestas provocan reacciones dispares dentro de la disciplina arquitectónica, y círculos académicos como profesionales gravitan entre reacias críticas, un acentuado escepticismo, llegando incluso hasta un desmedido entusiasmo. Pero en general, estas posturas develan una preocupante ambigüedad y confusión, debido a la falta de estudios con respecto a sus orígenes, relevancia y fundamentos teóricos.

Aunque gran parte de la disciplina arquitectónica asocia lo paramétrico con el desarrollo de técnicas computacionales, esta investigación plantea que lo paramétrico como lógica aparece persistentemente en la historia de la arquitectura desde antaño. Estas lógicas surgen inicialmente sin el uso de la computación, manifestándose con intensidades fluctuantes a lo largo de la historia, y apareciendo con un protagonismo inusitado durante el siglo XIX y XX. Este valioso legado arquitectónico reclama ser rescatado y revalorado, para construir un discurso de continuidad entre quizás viejos paradigmas, que hoy resurgen como preocupaciones contemporáneas, adquiriendo nuevas dimensiones y potencialidades.

Esta investigación identifica alrededor de 40 proyectos construidos durante el siglo XX que utilizan estas lógicas, analizándolos mediante una reconstitución utilizando sofisticadas herramientas paramétricas digitales. El análisis interrelacionado de proyectos permite situarlos dentro de una tradición de continuidad disciplinar, demostrando el impacto de los avances tecnológicos en varios ámbitos (técnicas constructivas, materialidad, diseño, etc.), y el carácter multidisciplinar de los proyectos. Esta aproximación metodológica permite analizar los parámetros base, sus sistemas de relaciones, enfatizando la serie de transformaciones necesarias para generar la forma, para finalmente develar argumentos, conceptos y principios para ser aplicados en la práctica arquitectónica contemporánea.

PALABRAS CLAVE: Lógicas Paramétricas, Diseño Asociativo, Herramientas Digitales, Componente, lógicas generativas.

INDICE

Previos	i- v
1. Los Nuevos Viejos Paradigmas	1 – 30
1.1 El Problema De La Innovacion	
1.2 Una Praxis Sin Teoria	
1.3 ¿Como Entender La Historia?	
1.4 ¿Que Es Lo Paramétrico?	
1.5 Desde La Praxis A La Teoría	
2. Lógicas Paramétricas	31– 62
2.1 Precedentes En Las Artes	
2.2 Precedentes En La Filosofía	
2.3 Precedentes En La Computación	
2.4 Plataformas Paramétricas En La Practica Arquitectónica	
2.5 Precedentes En La Arquitectura	
3. Las Formas Contruidas	63 – 74
3.1 Espacio Matemático	75 – 126
3.1.1 Geo-Metría	
3.1.2 Matemática Y Arquitectura	
3.1.3 Superficies Geométricas	
3.1.3 Referentes Matemáticos En La Arquitectura	
Las Familias Geométricas	
Parametrizaciones Y Reconstrucciones Computacionales	
3.1.4 Resultados	
3.1.5 El Diseño Matemático De Las Formas	
3.2 Modelos Experimentales.....	127 – 190
3.2.1 Resumen	
3.2.2 El Conocimiento De Los Modelos	
3.2.3 Modelos Y Proyectos	
3.2.4 Resultados	
3.2.5 Conclusiones	
3.3 Parametrización Constructiva	189 – 240
3.3.1 La Revolución Teórica De Lo Constructivo	

3.3.2	Avances En La Praxis Constructiva	
3.3.3	La Tradición De Ser Pionero	
3.3.3.1	Nuevos Materiales, ¿Nuevas Formas?	
3.3.3.2	Sistemas De Producción Aplicados A Escala Arquitectónica	
3.3.3.3	Métodos De Ensamblaje	
3.3.3.4	El Detalle Arquitectónico. De La Parte Y El Todo	
3.3.4	Materiales Y Metodología	
3.3.5	Resultados	
3.3.5.1	Sistemas Nervados	
3.3.5.2	Fuselajes Geodésicos	
3.3.5.3	Pieles Estructurales	
3.3.6	Contribuciones De La Praxis Constructiva	
3.3.6.1	La Relevancia De Los Materiales	
3.3.6.2	Métodos De Producción	
3.3.6.3	El Detalle Como La Semilla Del Sistema	
4.	Conclusiones	241 – 270
5.	Anexos:.....	271 - 290
	Bibliografía	273
	Ilustraciones	279
	Glosario.....	286
	Agradecimientos	291

CAPITULO 1

VIEJOS Y NUEVOS PARADIGMAS

“La historia no es simplemente la depositaria de unos hechos inmutables, sino un proceso, un patron de actitudes e interpretaciones vivas y cambiantes. Echar la vista atrás, a una época pasada, no es solo inspeccionarla (...); la mirada retrospectiva transforma su objeto: cada espectador, en cada periodo – en cada momento, de hecho-, transforma inevitablemente el pasado de acuerdo con su propia naturaleza.”

EL PROBLEMA DE LA INNOVACIÓN

El impacto que ejercen las herramientas digitales en todas las áreas del conocimiento humano resulta asombroso, a tal punto que su influencia ha llegado a redefinir las bases de nuestra sociedad contemporánea a principios del Siglo XXI. El académico Manuel Castells ha denominado este fenómeno "Sociedad Informacional", entendida como una sociedad inmersa en un periodo histórico caracterizado una revolución centrada en torno a las tecnologías de la información, la que está modificando la base material de la sociedad a un ritmo acelerado.¹

La práctica arquitectónica no se ha quedado ajena a estas extraordinarias transformaciones, encontrándose fuertemente afectada por el creciente uso de una variedad de herramientas digitales, desde finales del siglo XX. Al respecto léase la valiosa aportación de Daniel Davis (2013).² Su prolífica diseminación se ha presentado en diversas magnitudes e intensidades, afectando no solamente los sistemas de producción y de construcción de proyectos, sino que también invadiendo el ámbito de la creación y el diseño arquitectónico.

En particular, el uso de herramientas digitales en la arquitectura se han visto revolucionadas por la aparición de la tecnología BIM (Building Information Modelling), un sistema ampliamente diseminado en la práctica arquitectónica, que permite modelar en 3 dimensiones. Uno de los aspectos más decisivos del BIM es la utilización del diseño paramétrico que consiste en establecer un sistema de relaciones asociativas entre componentes, ensamblajes, o módulos, los que son definidos para generar un sistema interrelacionado capaz de aceptar cambios o modificaciones, y de propagarlas en un sistema categorizado mediante referencias cruzadas.³

Una de las consecuencias de la veloz incorporación de las herramientas digitales de diseño en la praxis arquitectónica, ha sido la aparición de proyectos de geometrías complejas o no-estándar altamente sugerentes, lo que ha provocado reacciones disímiles y fuertemente radicalizadas dentro de la disciplina arquitectónica.

En un extremo se sitúa la vanguardia arquitectónica que ha desarrollado

1 Castells, Manuel. *La Era de la Información: Economía, Sociedad y Cultura*. Vol. 1. México : Siglo XXI, 1996.

2 Davis, Daniel. *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. PhD dissertation, RMIT University. 2013.

3 Christenson, Mike. Testing the relevance of parameterization to architectural epistemology, *AIA Architectural Science Review*, 2009, vol. 52, no.2, p. 135-141.

propuestas altamente audaces, quienes afirman que los procesos digitales en la arquitectura constituyen un nuevo paradigma, adoptando a menudo una postura de quiebre frente a sectores conservadores o tradicionales. Este distanciamiento voluntario ha acentuado un aislamiento de comunidades altamente especializadas, permitiendo que arquitectos relativamente jóvenes generen sistemáticos esfuerzos de experimentación de una admirable habilidad, destreza y técnica. Si bien estas expresiones representan una contribución por su alto nivel de sofisticación, en su mayoría padecen de una cierta ingenuidad, resultando a menudo en proyectos de cierta banalidad y ligereza, y en su gran mayoría carentes de fundamentos disciplinares teóricos e históricos. En síntesis, la voluntad innovadora del discurso contemporáneo asociado al diseño digital se ha visto seriamente debilitado al distanciarse del conocimiento arquitectónico tradicional.

En el otro extremo se encuentran posturas más bien tradicionales, quienes afirman que las nuevas expresiones generadas por herramientas digitales producen proyectos banales, superfluos, y carentes de significado (Meredith, 2008).⁴

Estos sectores plantean una postura altamente crítica a las manifestaciones emergentes, argumentando que simplemente no tienen relevancia significativa para la arquitectura. Sin embargo, el refugiarse en la rápida y fácil descalificación, se mantienen al margen de los avances de su tiempo, y se impide una evolución en la disciplina. En este sentido, la academia se encuentra actualmente como testigo de estos grandes cambios desde una postura altamente crítica, incapaz de participar activamente en los nuevos desafíos que imponen una práctica vanguardista.

Otra postura más conciliadora que ha tomado cierta relevancia en la actualidad cuestiona la aparente autoridad del diseño paramétrico afirmando que todo diseño es paramétrico, o mejor dicho, pregunta ¿qué es exactamente el diseño no-paramétrico? (Burry, 2010).⁵

Sin embargo, un aspecto común a estas posturas, ya sea vanguardista, tradicionales, o conciliadoras, es la carencia de herramientas conceptuales y prácticas para abordar el fenómeno.

Desde una perspectiva teórica, se hace necesario revisar este fenómeno con un estudio en profundidad para esclarecer conceptos relevantes: ¿Qué es lo paramétrico?, ¿Cuáles son sus principios fundamentales?, ¿Cuál es su relevancia en la arquitectura?, ¿Es solamente un producto de la inteligencia digital? y ¿Cuál es su relación con la tecnología y, en particular, con las herramientas computacionales?.

Para subsanar esta problemática, esta tesis intentará abordar el estudio de la forma arquitectónica construida como una lógica, desde una perspec-

4 Meredith, Michael. *Never Enough : transform, repeat and nausea*. In: Sakamoto, Tomoko; Ferré, Albert. *From Control to Design : Parametric Algorithmic Architecture*. Barcelona, New York: Actar-D, 2008. Pp. 6-9.

5 Burry, Mark. *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*. Chichester, West Sussex : Wiley, 2011. P. 18.

tiva tanto teórica como práctica.

En cuanto a la praxis arquitectónica, este estudio intentará investigar la aparición de las formas no estándar en la arquitectura, antes y después de la aparición de herramientas computacionales, para intentar estudiar este fenómeno esclareciendo conceptos, estableciendo precedentes, y extrayendo lecciones.

1.2

PRAXIS SIN TEORIA

En el Primer Tratado de Arquitectura, Vitruvio declara que el arquitecto debe de estar equipado con conocimiento proveniente tanto de la teoría como de la praxis. La teoría se manifiesta como la habilidad de demostrar y explicar las producciones con los principios de proporción, mientras que la praxis se entiende como el continuo y regular ejercicio del trabajo basado en el diseño. Para lograr un conocimiento con autoridad, los arquitectos deben de cultivar el conocimiento proveniente de estas dos actividades, las que concibe como complementarias.⁶

En la actualidad, la relación entre teoría y práctica se encuentra confrontada a un paradigma de gran repercusión: el impacto de la sociedad de la información en todos los ámbitos. En la arquitectura, la innegable tensión entre posturas tradicionales (que presentan resistencia ante los cambios introducidos por las nuevas tecnologías), y las prácticas innovadoras (que se refugian en la ilusión de la novedad), dan testimonio de un profundo cambio disciplinar.

Se argumenta que la práctica arquitectónica asociada a las herramientas digitales se ha visto fuertemente impactada por el diseño paramétrico o asociativo, el que se encuentra imbuido en una gran parte de los programas computacionales actuales. El efecto de su aplicación ha sido avasallador: una producción arquitectónica de gran libertad formal y de alarmante frivolidad revela que carece de un marco más amplio de referentes, relatos, historia, y fuerzas (Meredith, 2008).⁷

En términos teóricos, la idea generalizada y predominante hoy en día, es que el diseño paramétrico es un producto de la inteligencia digital, originándose en la ingeniería mecánica y en el diseño automatizado. Sin embargo, se han podido identificar precedentes que indicarían que este tipo de lógica no es algo nuevo para la arquitectura, sino que por el contrario,

⁶ Vitruvius, Pollion. *The Ten Books on Architecture*. Cambridge : Harvard University Press, 2006. P. 5.

⁷ Meredith, op.cit., p. 4.

numerosos proyectos han surgido en la historia de la arquitectura que exhiben claramente formas con geometrías complejas, a pesar de haber sido formulados sin el uso de sofisticados programas computacionales. Si bien es ampliamente aceptado que estas lógicas aparecen antes del uso del ordenador, no existen estudios sistemáticos que intenten dilucidar las lógicas, principios, y metodologías de diseño que contienen.

En cuanto a la praxis arquitectónica, si aceptamos que parte del conocimiento se encuentra contenido o codificado en proyectos existentes a lo largo de la historia, se podría teorizar que algunos proyectos ejemplares podrían contribuir al conocimiento arquitectónico en esta temática, y por lo tanto, se hace necesario identificar sus referentes, aportes y conceptos. Si la práctica arquitectónica puede imbuir de conocimiento al mundo académico mediante el estudio de proyectos como vehículo para la construcción de conocimiento, a su vez la academia debe responder a fenómenos emergentes y situarse como acumulador/condensador de conocimiento, desde una perspectiva crítica basada en un conocimiento riguroso. También debe propagar y diseminar conocimiento al quehacer de la sociedad y la cultura de su tiempo. Basado en este postulado, se podría asumir que el quehacer arquitectónico se está transformando continuamente a lo largo la historia mediante una interacción constante entre estos dos ámbitos, como lo afirma Giedion.⁸

Las preguntas que sustentan este estudio son:

- ¿Que es el diseño paramétrico?
- ¿Es solo producto de la inteligencia digital? ¿Puede encontrarse en proyectos arquitectónicos antes de la computación?
- ¿Por qué se utilizaron estas lógicas? ¿Cómo puede influenciar la practica contemporánea?
- ¿Será posible generar referentes arquitectónicos para estas prácticas incipientes?
- ¿Se podrían agrupar estos referentes para detectar lógicas/estrategias de diseño similares? ¿Se pueden formular nuevas maneras de generar clasificaciones/ taxonomías de proyectos mediante el uso de herramientas computacionales? ¿Es preferible a los sistemas de diseño tradicional? ¿Pueden las herramientas digitales proporcionar métodos para el análisis y clasificación en la arquitectura?
- ¿Como puede la tecnología influenciar el saber arquitectónico para producir un avance en la disciplina?
- ¿La inteligencia digital impacta la relación entre arquitectura construida, y la complejidad/sofisticación del conocimiento arquitectónico? ¿Podrá la inteligencia digital reducir esta discrepancia existente hoy?
- ¿Qué potencial tienen estas estrategias para el Siglo XXI?

El objetivo de esta investigación es explorar si el diseño paramétrico puede

⁸ Giedion, Siegfried. *Espacio, Tiempo y Arquitectura: el futuro de una nueva tradición*. 5ª ed. Madrid : Dossat, 1978.

ser entendido como una lógica, para detectar y estudiar los fundamentos teóricos y prácticos de proyectos durante el Siglo XX generados mediante estas lógicas, los que a menudo representan casos ejemplares de innovación y experimentación. Sin embargo, constituyen casos paradigmáticos porque no han sido objeto de estudios rigurosos y coherentes, y su estudio podría desvelar métodos, conceptos, principios, protocolos, secuencias, que sirvan de ejemplos y referentes a la práctica arquitectónica actual.

Para intentar resolver este conflicto, se propone un recorrido disciplinar, que permita esclarecer algunas premisas teóricas y prácticas en las que se basan estas nuevas prácticas de diseño para facilitar su comprensión, con el objetivo de aclarar numerosas ambigüedades conceptuales, principalmente causados por una evidente falta de estudio y de reflexión acerca de las temáticas emergentes.

La abrumadora proliferación de proyectos de formas libres, y la alarmante inexistencia de estudios académicos en este ámbito, hace que sea difícil construir fundamentos teóricos y referentes arquitectónicos relevantes para que estos proyectos puedan ser posicionados en la práctica arquitectónica actual. A pesar de su amplia propagación, la falta de estudios en este ámbito genera una confusión generalizada en la disciplina arquitectónica por la ambigüedad en su significado, importancia y aporte disciplinar. Esto ha producido que se reduzcan a menudo a meras expresiones de cierto "estilo", "moda", "expresividad", o como un exclusivo producto de las herramientas digitales. La profunda transformación que la práctica arquitectónica está actualmente experimentando, sólo puede ser entendida como parte de un proceso más amplio, a través del estudio de soluciones de diseño y metodologías ejemplares, con el objetivo de situar la innovación en un conocimiento arquitectónico coherente y riguroso.

Esta investigación sostiene que el diseño paramétrico es una importante lógica de diseño que aparece persistentemente dentro de la historia de la arquitectura, con diversas intensidades y grados de profundidad. En particular, investigaciones preliminares a la tesis permiten afirmar que el Siglo XX ofrece un territorio fértil para explorar estas lógicas, ya que varios arquitectos e ingenieros comenzaron a formular conceptos paramétricos inicialmente sin el uso de la computación. A pesar de su contribución fundamental al conocimiento y la innovación, su legado es actualmente ausente de los discursos tanto teóricos como de la práctica arquitectónica, y por tanto se plantea estudiar su uso en diversos referentes arquitectónicos relevantes a través de la historia, así como su implementación en nuevas metodologías de diseño.

Las hipótesis que plantea esta investigación son:

- + Lo paramétrico consiste en una lógica/estrategia de diseño que opera con parámetros precisos, los cuales se pueden enunciar claramente.
- + Esta lógica ha estado presente en diversos proyectos construidos a lo largo de la historia, y es posible detectar precedentes arquitect-

tónicos durante el Siglo XX, que permiten afirmar que han estado presentes en la historia de la arquitectura antes de la aparición de herramientas computacionales.

+ Al seleccionar proyectos que presenten estos parámetros, es posible desglosar/codificar estas lógicas en cada proyecto, para establecer protocolos, procesos, y metodologías de diseño que permitan extraer claros principios de diseño.

+ El uso de estas lógicas obedece a búsquedas formales notables regidas por profundos procesos de experimentación y de innovación.

+ El conjunto de proyectos seleccionados permiten elaborar ciertas relaciones basadas en ciertos criterios que sirvan como referentes para futuros proyectos.

+ A partir de la elaboración de estas asociaciones, es posible generar definiciones, protocolos, metodologías, y estrategias de diseño emergentes relacionadas con estas prácticas.

Se hace necesario construir fundamentos teóricos e históricos para comprender los acontecimientos producidos en el último tiempo con respecto al desarrollo de técnicas computacionales, porque el hacer se ha desarrollado a pasos agigantados con los avances tecnológicos, dejando de lado al pensar y sus fundamentos teóricos, creando gran confusión y ambigüedad dentro de la disciplina arquitectónica. Para ello, se propone:

- + Aclarar términos y definiciones;
- + Estudiar referentes arquitectónicos;
- + Estudiar procesos y metodologías de diseño singulares;
- + Construir asociaciones entre los proyectos;

La importancia de estudiar proyectos gestados dentro de estas lógicas radica en que, mediante el análisis y la aplicación de sus principios gestores, se permitirá situar lo paramétrico dentro de un discurso arquitectónico de coherencia y continuidad histórica.

Esta investigación tiene como objetivo reconstruir una serie de proyectos que utilizan lógicas paramétricas, con la exposición de soluciones que rescaten un cuerpo de conocimiento como referentes para la academia y la práctica arquitectónica. Este legado podría ofrecer oportunidades extraordinarias para explorar estrategias innovadoras de diseño de proyectos referenciales, y su análisis enlazado podría ayudar a resolver las incoherencias actuales, que son abundantes y confusas en la praxis arquitectónica contemporánea.

Se plantea comenzar con una aproximación de intensa búsqueda bibliográfica, mediante una exhaustiva revisión de definiciones existentes del tema, extraídas de los arquitectos estrechamente imbuidos en el tema.

Luego se procederá a identificar conflictos, ambigüedades, vacíos, e incompatibilidades en las definiciones existentes.

La estructura interna de esta investigación se formula entrecruzando dos aproximaciones: teoría y praxis.

El estudio se compone de 4 capítulos: un segmento de cuño teórico compuesto de dos capítulos titulados "Lógicas Paramétricas" que intenta formular definiciones, y "Viejos y Nuevos Paradigmas" para detectar precedentes. La aproximación práctica está basada en "Las Formas Contruidas" con la identificación y estudio de referentes, y su posterior desglose en 3 áreas: el espacio matemático, el modelo como experimentación, y la parametrización constructiva. El capítulo final intenta proporcionar los fundamentos teóricos y prácticos que sustentan o refutan los argumentos propuestos en esta tesis.

1.3

¿COMO ENTENDER LA HISTORIA?

Basado en el esquema del informe antes descrito, los capítulos de esta tesis exploran algunos aspectos relacionados tanto con la teoría como con la praxis arquitectónica.

Para afrontar la brecha entre praxis y teoría, se hace necesario construir nuevos referentes teóricos, metodológicos y prácticos, que permitan abordar este proceso desde un entendimiento de conceptos que emergen en el tiempo. Un enfoque teórico relevante en el campo del arte, es introducido por Foucault⁹, Kubler, y más tarde Baudrillard¹⁰, quienes reaccionan frente al enfoque lineal predominante de la historia en el análisis de las obras, y exploran relaciones como una cadena de manifestaciones interrelacionadas a lo largo del tiempo.

Estas posturas emergentes en el arte tienden a confrontar nociones tradicionales de concebir procesos en el tiempo, y han sido estudiadas extensamente por Henri Focillon, quien propone entender la historia del arte como una serie de conceptos que evolucionan encadenadas en secuencias y series a través del tiempo, más que como el desarrollo lineal, histórico, o cronológico de estilos y tendencias. Los postulados de Focillon proporcionan el marco teórico que luego será continuada por el historiador de arte norteamericano George Kubler en su libro "La Configuración del Tiempo"¹¹.

9 Focillon, Henri. *La Vida de las Formas y Elogio de la Mano*. Madrid: Xarait, 1983.

10 Baudrillard, Jean. *El Sistema de los Objetos*. Madrid: Siglo XXI, 2010.

11 Kubler, George. *La Configuración Del Tiempo*. Madrid: Alberto Corazón, 1975.

Kubler plantea que las obras de arte son respuestas a problemas, donde sus soluciones forma-tipo se manifiestan relacionadas entre si en una secuencia temporal, expresándose el cambio en una secuencia vinculada o una serie, el que obedece a ciertas normas y principios, aunque el proceso puede distorsionarse por la acción de interferencias procedentes de imágenes y significados. Dentro de cada secuencia pueden descubrirse objetos originales o primarios, y una enorme cantidad de replicas. Se podría argumentar que la contribución fundamental de Kubler es la profundización de principios, la revisión de conceptos, y el análisis de fines y medios que utiliza la disciplina del arte para entenderse a si misma, y sobretodo por su incansable curiosidad para confrontar conceptos asumidos como ciertos, y que son utilizados frecuentemente sin la menor precaución. Finalmente, Baudrillard propone una visión altamente critica, mediante una reconfiguración de objetos basados en criterios no convencionales.

Estas relevantes posturas proponen que la historia puede ser entendida como secuencias de lógicas y series, dentro de una continuidad de un discurso en el tiempo, expresada en constantes invenciones y mutaciones, y de intensificaciones acorde a los avances disciplinares. Se podría argumentar que cada proyecto arquitectónico forma parte también del desarrollo del arte, y como tal, podría ser entendido y ser desglosado en una serie de conceptos que pertenecen a lógicas en constante evolución, en un cruce de discursos. Pero esta evolución de ideas no se ciñe a una progresión lineal en el tiempo, sino que expresa conceptos latentes en diversos puntos, las cuales muchas veces aparecen sin una conexión aparente dentro de la historia, y requieren ser estudiadas y desveladas para construir capas múltiples de conocimiento.

Basados en estos postulados, se propone una aproximación teórica general at tema, mediante un intenso estudio bibliográfico, con el objetivo de identificar, compilar y revisar las definiciones existentes de diversos autores acerca del diseño paramétrico, las que se encuentran en su gran parte dispersas e inconexas. Se comienza por estudiar algunos precedentes teóricos, identificando algunas definiciones provenientes de diversos autores de una manera cronológica, porque las definiciones varían significativamente en su amplitud y grado de especificidad.

También se revisan precedentes mas generales en otras disciplinas, como la biología, el arte, la filosofía, la zoología, etc. A partir de la confrontación de algunas definiciones existentes, se extraen algunos principios básicos como una lógica de diseño, y se evalúa su relación con las herramientas digitales.

Luego se procede a la confrontación de las definiciones existentes para extraer algunos principios básicos como una lógica de diseño, y también evaluar su relación con las herramientas digitales.

A partir de los principios básicos, se procede a identificar los proyectos que exhiben estos conceptos, basados en el uso de lógicas asociativas o paramétricas desde su concepción, diseño y construcción. Una primera agrupación cronológica permitirá verificar si los proyectos surgen después de la

diseminación de herramientas digitales.

Se han identificado mas de 100 proyectos relevantes durante el Siglo XX, (desde 1890 hasta 2010), pero se decide restringir el estudio hasta antes de la aparición de la computación (1980), por la relevancia e interés arquitectónico demostrado por cerca de la mitad de los proyectos. Finalmente, se estudian aquellos proyectos cuya documentación permita implementar su análisis con la metodología propuesta en esta tesis.

La documentación de proyectos se realiza mediante la producción de fichas individuales, donde cada proyecto se representa a partir del material grafico (plantas, secciones, alzados y vistas 3d), así como también imágenes recopiladas durante el periodo de investigación, las que servirán de base para la reconstrucción digital de los proyectos. Estos documentos corresponden al anexo gráfico de la tesis.

A continuación, el capítulo sobre “Lógicas Paramétricas” desarrolla una aproximación considerando la relación entre la forma construida y los siguientes aspectos: el espacio matemático, modelos experimentales, y los sistemas constructivos.

Una vez definidas las lógicas paramétricas, se procede a la reconstrucción digital de modelos en 3D de cada proyecto utilizando programas de diseño paramétricos actuales (Rhino y Grasshopper), por la familiaridad de la autora con ellos. Este proceso facilita el entendimiento de los proyectos al utilizar los protocolos inherentes a los programas para deducir o derivar las formas, los cuales requieren de lógicas precisas en los mecanismos de generación de formas.

Esta etapa propone el modelo operacional y metodológico para deducir estos proyectos a partir de parámetros precisos, considerando que fueron derivados sin el uso de la computación, y por tanto revelando los protocolos que resultan críticos en su formulación. El objetivo es de documentar y extraer los principios generativos que podrían servir como referentes para el avance de la disciplina arquitectónica, así como sus diferencias sobre otros sistemas tradicionales de diseño.

Las técnicas de representación se generaran por la propia autora, de manera de que el enfoque grafico permitirá traducir la información a un modo de representación coherente, y así alejarse de la subjetividad de la representación de diversas fuentes de publicación.

Se definirán los proyectos en 3 ámbitos:

Descripción de la forma mediante Formulas Matemáticas: Se comienza por identificar la pertenecía de cada proyecto a las familias geométricas, estableciendo sus formulas matemáticas base, y definiendo sus parámetros en termino de dimensiones en ancho, largo y alto (definido como dominios);

Evaluación estructural de las forma arquitectónica mediante el uso de Modelos Físicos, intentando describir los objetivos, y manifestaciones asociadas a estas practicas;

Descripción Constructiva de los elementos: Se desglosaran los elementos constructivos para cada proyecto considerando su materialidad, sistemas de producción, ensamblaje, y determinación del detalle arquitectónico.

Una vez completada la etapa de reconstrucción digital, el capítulo de conclusiones procederá a su estudio interrelacionado, comenzando por asociaciones tradicionales, como por ejemplo: orden cronológico, ubicación geográfica, o autor (arquitecto y/o ingeniero), que permita posicionar ciertos fenómenos generales en su contexto más amplio. Posteriormente, se formulan sistemas de agrupaciones relacionando aspectos más específicos, que permitirá extraer criterios de análisis a partir de sus lógicas generativas detectando algunas conceptos, relacionando distintos proyectos mediante el establecimiento de interdependencias entre parámetros específicos, formulando algunas lógicas subyacentes que permitan identificar criterios de diseño. Por último, se generarán sistemas de secuencias y series, para generar ensamblajes y relaciones entre proyectos, desglosando lógicas dentro de secuencias formales, de manera de abordar el diseño como una serie de codificaciones y relaciones entre elementos, más que como el resultado formal del conjunto. Se espera que el establecimiento de parámetros entre lógicas recurrentes, permitirá identificar herramientas de diseño concretas y específicas, de manera de generar referentes arquitectónicos para futuras propuestas, y finalmente para sugerir un marco conceptual coherente para poder evaluar estos proyectos.

Una vez completada la etapa de definiciones teóricas; el análisis de proyectos a partir de sus definiciones paramétricas; se extraen algunas conclusiones fundamentales. Se comienza por la formulación de definición de diseño paramétrico, luego se enuncian sus principios y su particular metodología de diseño. Se revisan los referentes arquitectónicos relevantes para esta prácticas, y se entrecruzan para extraer asociaciones entre proyectos. Finalmente, se confirman o refutan las hipótesis de trabajo planteadas inicialmente, y se esbozan algunas directrices y recomendaciones para futuros trabajos o nuevas investigaciones que puedan expandir y profundizar este estudio. Se intenta detectar potencialidades de estos procesos en la práctica arquitectónica actual, proponiendo reducir la distancia hoy existente entre proyectos construidos y la complejidad del conocimiento arquitectónico.

Delimitaciones de la investigación

Esta tesis pretende enfocarse al estudio específico de la generación de formas arquitectónicas mediante el uso de lógicas paramétricas, en su dimensión conceptual y metodológica. Los criterios aquí esbozados representan solo algunos puntos a considerar dentro del análisis del proyecto arquitectónico, el cual debe responder a numerosos otros factores, como lo constituyen la importante relación histórica de cada proyecto, la vinculación a su sociedad y cultura, su inserción en el medio urbano y territorial, los fundamentos teóricos y filosóficos que lo sustentan, aspectos iconográficos, perceptivos o de significación en la arquitectura, entre numerosos otros aspectos, los cuales requieren de estudios específicos porque se relacionan

con otras áreas del saber arquitectónico. Mas importante aun, es necesario precisar que situar lo paramétrico como una lógica válida e instrumental a través de la historia de la arquitectura no implica un juicio de calidad ni de valor del proyecto arquitectónico. Tampoco se pretende vindicar su legitimidad, ni defender proyectos generados mediante estas lógicas, sino mas bien desarrollar un trabajo académico regido por una genuina curiosidad y rigurosidad respecto a un tema que aparece paradigmático en algunos círculos del quehacer arquitectónico actual. No se pretende emitir juicios acerca de los proyectos engendrados mediante estas lógicas, sino que solo se estudia este fenómeno desde el rigor académico.

Por otra parte, el estudio de referentes históricos no intenta sumirse en una actitud nostálgica, sino por el contrario, se pretende estudiar estos precedentes como una manera de vindicar la innovación como una constante histórica, que permite un avance en la disciplina, la que podría proporcionar valiosas claves para el futuro de la arquitectura.

Esta disertación se ocupa de los procesos de generación de la forma como una lógica consistente y se aleja de concepciones predeterminadas formalistas o de la formulación de un lenguaje arquitectónico, que podría acercarse a definiciones tradicionales de estilo. Se argumenta que el orden propuesto en los proyectos escogidos deriva de las propiedades y capacidades inherentes a la forma, y a su estrecha interdependencia con ciertos sistemas matemáticos, constructivos, estructurales y de materialidad.

De este modo, este trabajo constituye solo una restringida parte de una investigación de mayor dimensión, la que podría a futuro insertarse en un conjunto de estudios relacionados al tema. El presente estudio esta sujeto a estas y a otras limitaciones significativas, que servirán a apuntar un vacío en el conocimiento relacionados con los procesos de diseño en la actualidad.

Los sistemas basados en relaciones cambiante de asociatividad son un aspecto esencial dentro del diseño paramétrico.

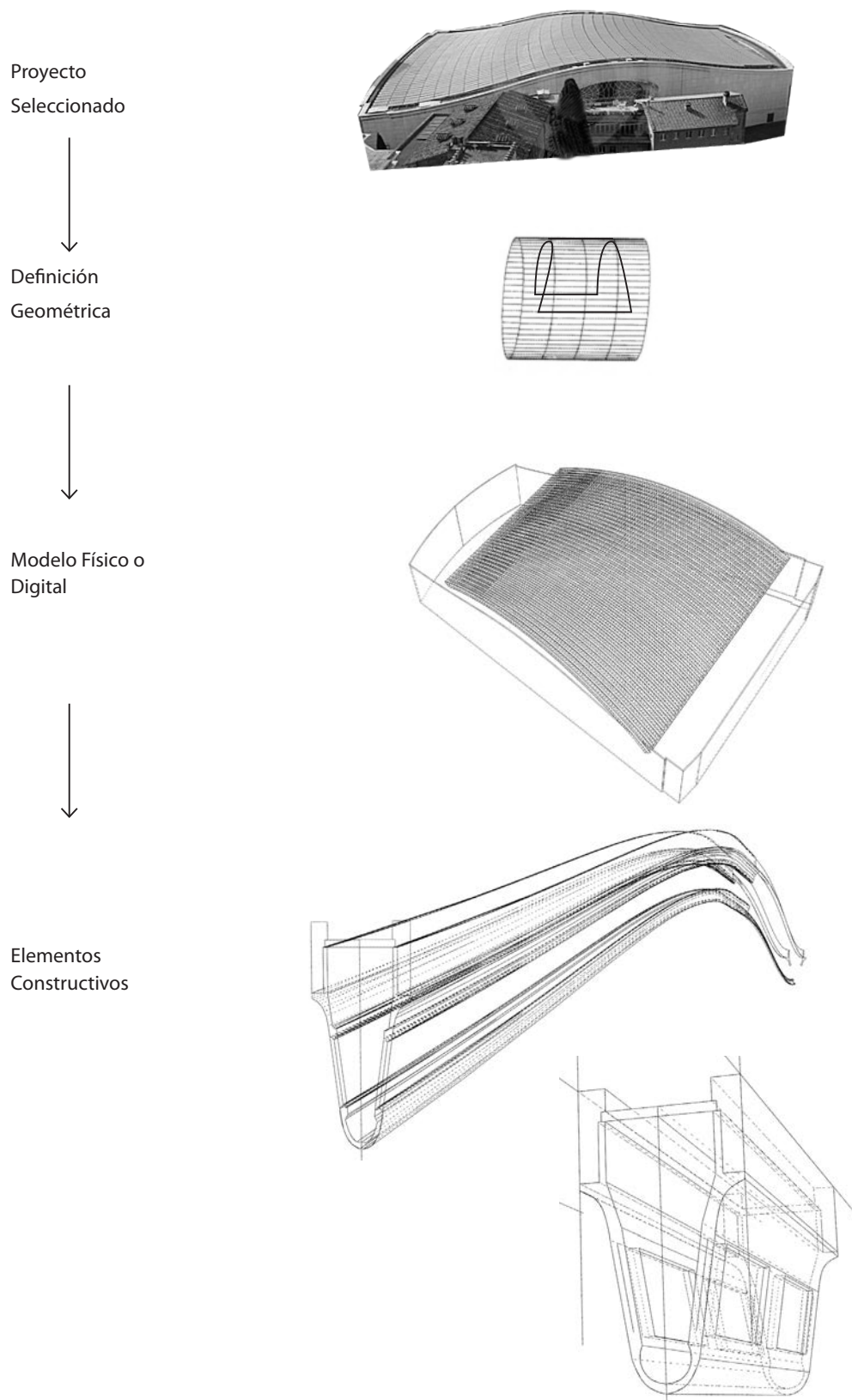


Fig. 1-1: Metodología de investigación propuesta aplicada en el proyecto. Audience Hall, Vatican City (1964-71), by Nervi.

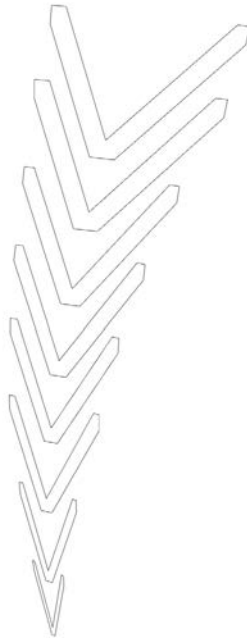
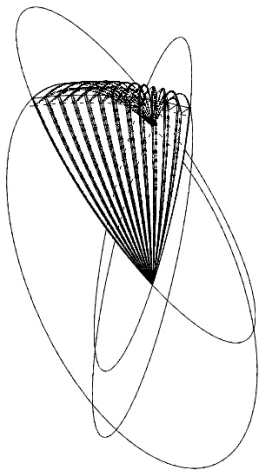
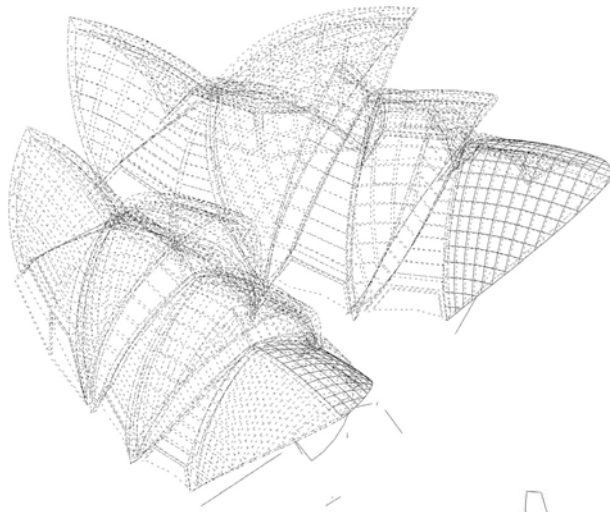
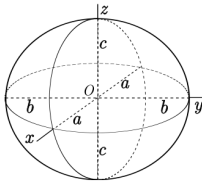
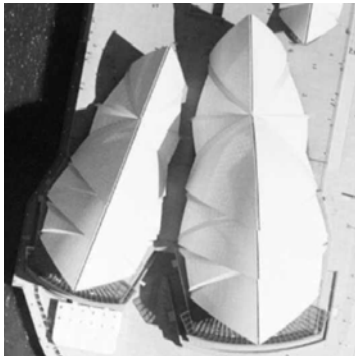


Fig. 1-2: Metodología de investigación propuesta del proyecto Sydney Opera House (1957-73), Utzon.

¿QUE ES LO PARAMÉTRICO?

Si bien es posible afirmar que todo diseño es paramétrico (Burry, 2004), la singularidad de estas estrategias se basan en la existencia de claros principios, como por ejemplo la relación entre parte y todo, la proliferación de un elemento adaptable a lo largo de un sistema, y las condiciones de variabilidad de sus partes. Sin embargo, estos principios no han sido definidos explícitamente, y por tanto existen múltiples y confusas definiciones. Este capítulo intenta identificar y exponer las definiciones existentes del tema en el ámbito de la arquitectura, las cuales gravitan en su grado de especificidad y detalle. Se propone una aproximación cronológica, dado que a menudo estas definiciones deben de considerar los adelantos técnicos y del conocimiento de su tiempo. Finalmente, se propone una evaluación de las definiciones, para establecer conceptos claves, y esbozar una definición de trabajo para ser aplicadas a un conjunto de proyectos.

Varios intentos han surgido de definir lo paramétrico en relación a la práctica arquitectónica, proveniente de diversos ámbitos académicos, teóricos, profesionales, o incluso de creadores de software o de usuarios expertos en herramientas digitales de diseño.

El primer intento se remonta a 1960, cuando el destacado arquitecto italiano Luigi Moretti introduce el término "Arquitectura Paramétrica" en la XII Trienal de Milán, en la muestra denominada "Exhibition of Parametric Architecture and of Mathematical and Operational Research in Town-Planning: 12th. Triennial Exhibition, Milan, Arts Palace, September-October 1960".¹²

El grupo de investigación responsable del contenido de la muestra era el "Institute for Operations Research and Applied Mathematics Urbanism" or "National Institute for the Mathematical and Applied Reserach for the Architectural design and Urban Planning" (IRMOU); fundado en 1957 aunque Moretti comienza a trabajar en esta temática entre 1940-42, pero solo es desarrollada durante la década posterior en cercana colaboración con alguno de los científicos mas importantes de su tiempo, como el matemático Bruno de Finetti, entre otros. El grupo se dedica al desarrollo de proyectos basados en la aplicación de principios de cuantificación numérica y parametrización en la arquitectura, hasta los intentos y las elecciones de diseño

¹² Moretti, Luigi; Bucci, Federico; Mulazzani, Marco; deConciliis, Marina. *Luigi Moretti: Works and Writings*. Princeton Architectural Press, 2002. P. 214.

(Converso y Bonatti, 2006).

Moretti desarrolla un debate arquitectónico como reacción a lo que denomina una “perturbadora simplicidad” que caracteriza a la arquitectura de su tiempo, incluso cuando es abordada a través de aspectos de “forma-función”. Como respuesta a esta controversia, Moretti intenta encontrar los fundamentos teóricos del proyecto al formular el concepto de “arquitectura paramétrica”, para referirse a “un nuevo lenguaje para el pensamiento arquitectónico” (Viati 2010). A su vez, propone un “metodo di progettazione secondo parametri logico-matematici, fisici, elettronici, biologici, psicologici, sociologici, economici”¹³, la que fundamenta derivada de formas y elementos espaciales inequívocos y decididos que deben de ser entregados mediante la identificación y cuantificación de los parámetros que interfieren en la tesis de una obra.

En el artículo “La forma como estructura» en la revista Spazio¹⁴, Moretti reconoce que la “inevitabilidad geométrica” encuentra un campo o una aplicación mas bien limitada en proyectos donde es necesario y eficaz un enfoque científico en su programación, como por ejemplo en los estadios, donde gran número de personas están involucradas. Como ejemplos de su aplicación, para la exposición de la Trienal de Milán, se presentaron fascinantes imágenes y modelos físicos de estadios y de otras estructuras relacionadas con el deporte y el espectáculo, en los que las curvaturas en forma de mariposa fueron determinadas basadas en estudios a base de ángulos de curvas de visibilidad.¹⁵ Todos los elementos del modelo se describen como un conjunto de instrucciones que conforman la “escena”, estructurada generalmente como un grupo de objetos, fuentes de luz y puntos de observación conectadas mediante ecuaciones paramétricas. Algunas de la geometría general es derivada de la variación numérica del código (Converso y Bonatti, 2006).¹⁶ La búsqueda de posibilidades en las formulaciones matemáticas a través de relaciones paramétricas dentro del proceso de diseño ha estado al centro de significativas investigaciones para definir los límites y explorar las potencialidades de este enfoque (Converso y Bonatti, 2006).

La aportación de la propuesta de Moretti, consiste en introducir, describir y explicar de manera explícita las lógicas matemáticas como una importante estrategia dentro de los procesos de diseño arquitectónico. La propuesta de Moretti introduce varios aspectos significativos:

_ Las formulaciones matemáticas y de la ciencia como parte integral del proceso de diseño arquitectónico;

_ La variación numérica del código capaz de producir múltiple versio-

13 Viati, Annalisa. *Un nuovo linguaggio per il pensiero architettonico: Ricerca operativa e architettura parametrica*. In: Moretti, Luigi; Reichlin, Bruno; and Tedeschi, Letizia. *Luigi Moretti: Razionalismo e Trasgressività tra Barocco e Informale*. Milano: Mondadori Electa, 2010. P. 409..

14 Moretti, Luigi; La Spina, Vicenzina (Trad.). La estructura como forma. *Spazio*, no. 6, 1952.

15 Moretti, Luigi; Bucci, Federico; Mulazzani, Marco; deConciliis, Marina. *Luigi Moretti: Works and Writings*. Princeton Architectural Press, 2002. P. 21.

16 Viati, loc. cit.

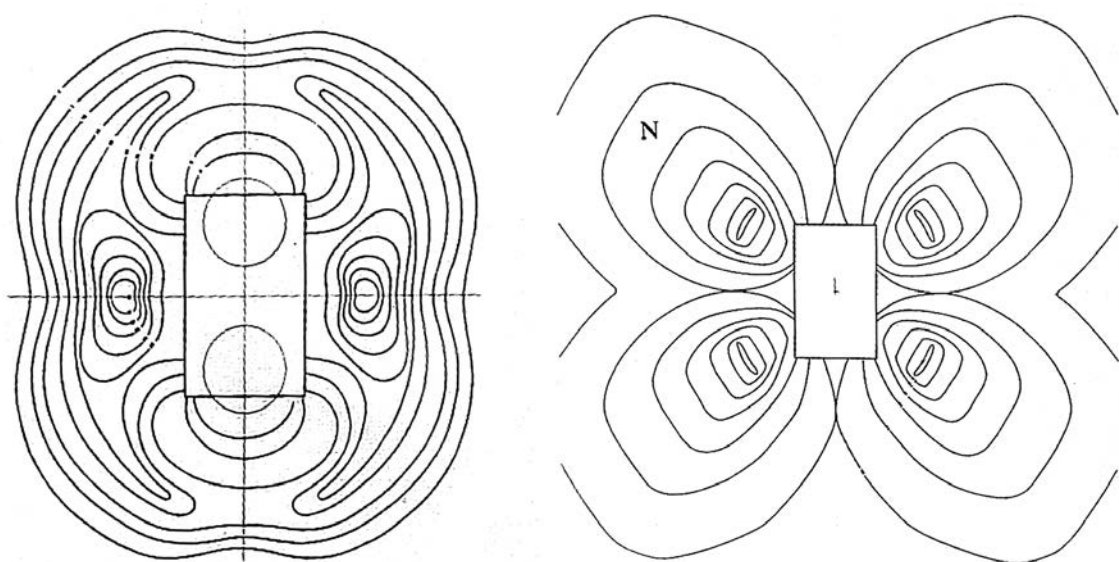


Fig. 1-3: Luigi Moretti , *Arquitectura Paramétrica*, XII Trienal de Milán, denominada “Exhibition of Parametric Architecture and of Mathematical and Operational Research in Town-Planning: 12th Triennial Exhibition, Milan, Arts’ Palace, September-October 1960”.

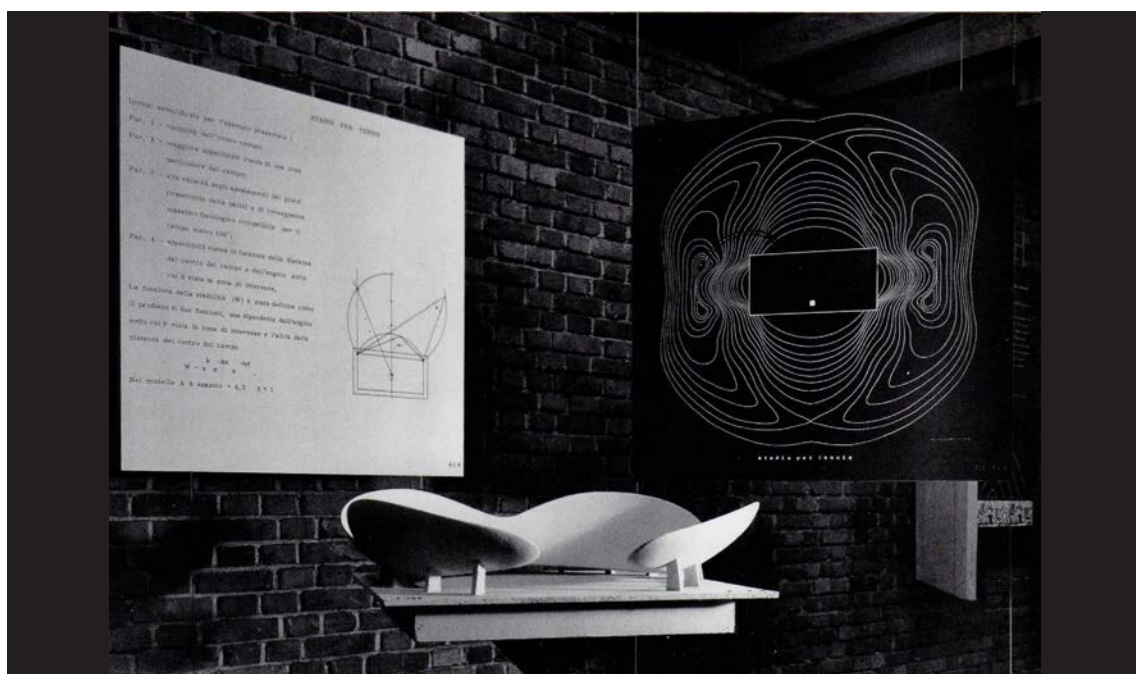


Fig. 1-4: Exposición sobre “Parametric Architecture and of Mathematical and Operational Research in Town-Planning: 12th. Triennial Exhibition, Milan, Arts’ Palace, September-October 1960”.

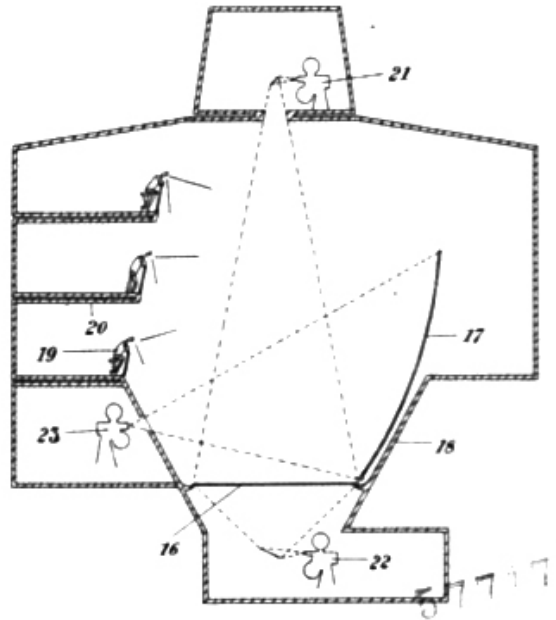


Fig. 1-5: Luigi Moretti , Diseño para un cine. Circa 1950.



Fig. 1-6: Luigi Moretti , Diseño para un estadio.

nes a partir de una formulación general, introduce un pensamiento asociativo en la arquitectura;

_ Establece el termino "Arquitectura Paramétrica" como nuevo lenguaje arquitectónico (Viati, 2010);

_ Se discute lo paramétrico como una disciplina interdisciplinar que tiende a introducir los fenómenos de la arquitectura y el urbanismo en la raíz de los estructuras de pensamiento contemporáneos, en particular de las estructuras científicas;

_ Define tipo de proyectos donde estas lógicas podrían ser aplicadas;

Sin embargo, la investigación no arroja los resultados esperados por Moretti, porque le resultaba difícil reducir ciertas funciones complejas a unos parámetros correctos.¹⁷

Al final de su carrera, Moretti declararía que se hacia evidente en proyectos de vivienda, o edificios de características particulares (iglesias, edificios institucionales, etc.) la formas dependen de muchos factores difíciles de cuantificar, los que resultan imprecisos y están latentes en la intuición y fantasía de los arquitectos. Para algunos, esto significa la negación de todos las bases teóricas de la arquitectura paramétrica que Moretti había intentado construir.¹⁸ Sin embargo, se argumenta que Moretti no intentaba proponer una postura global acerca de la arquitectura que pudiese ser aplicada a todos los proyectos, lo que se ve reflejado en su notable y variada obra arquitectónica. Su aportación reside en proponer un sólido marco teórico y práctico, reconociendo la especificidad de su aplicación, y enunciando las limitaciones de su formulación.

A partir de la década de 1980, la aparición del "Building Information Modeling" (BIM) ha revolucionado la práctica arquitectónica cuando algunos programas de modelamiento paramétrico irrumpen en la arquitectura, como CATIA (1977), ArchiCad (1982), 3D Max (1992), Revit (1995), Digital Project (2004), Paracloud (2005), Generative Components (2005), o Rhino (2000) with the plugin Grasshopper (2007), entre otros. El modelamiento en entornos BIM se gestiona a través de la relación de datos interrelacionados, y se formaliza mediante parámetros cambiantes, los cuales afectan la totalidad del modelo. Esta estrategia se funda en lógicas paramétricas específicas, la cuales están invadiendo el quehacer arquitectónico a pasos acelerados, y se especula que será utilizado extensamente a futuro por las ventajas que presenta frente a otras herramientas de diseño. Otros intentos de definir el termino volverían a aflorar tan solo a partir de la primera década del Siglo 21 en ciertos ámbitos arquitectónicos, principalmente para referirse al diseño derivado de programas de modelamiento computacional en 3D basado en parámetros (Leach, 2012)¹⁹, o para describir nuevos softwares basados en sistemas de diseño paramétricos.

17 Viati, Ibidem.

18 V.n.11.

19 Leach, Neil. On Parametricism - A Dialogue between Neil Leach and Patrik Schumacher. *Time + Architecture*, 2012, no. 5. p. 8.

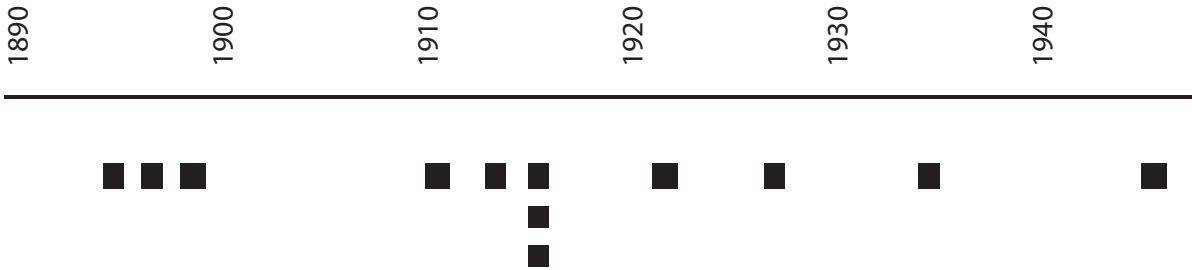
Dentro del contexto del diseño asistido por el ordenador, una definición temprana aparece en 2000, cuando el arquitecto y académico Javier Monedero afirma que: “lo paramétrico es, en un sentido, un termino restringido. Implica el uso de parámetros para definir una forma, cuando lo que realmente esta en juego es el uso de relaciones. Usare el termino en un sentido amplio que cubre lo que puede encontrarse en literatura bajo el titulo de modelamiento relacional, o diseño variacional, o diseño basado en restricciones, u otros títulos (...).”²⁰ Monedero aporta diversas nociones con respecto al diseño paramétrico, que comienzan por una definición minuciosa acerca de “un modelador paramétrico interactivo permite al usuario crear un modelo maestro que puede utilizarse como la base para introducir parámetros al sistema y solicitar al usuario la especificación de restricciones que fijaran el modelo a través de una descripción cerrada de sus componentes. (...) el mas usado en estos momentos es quizás lo que es denominado ‘diseño basado en historia’ o diseño paramétrico (opuesto a diseño variacional) o ‘diseño paramétrico constructivo’. Los parámetros operacionales pueden ser entidades geométricas como también expresiones. El modelo puede ser modificado sustituyendo los datos usados en una operación particular. Recalculando el modelo tendrá efectos de cambiar alguna de sus características y manteniendo las conexiones, las relaciones entre diferentes entidades.” Con respecto a la aparición de las nuevas herramientas por ordenador, Monedero declara que “no hay nada que afecte a la esencia de la relación entre geometría y arquitectura. Todo lo que ocurre es que ahora tenemos más métodos y mejores máquinas que hace 25 siglos. Esta es la “lógica paramétrica” fundamental. Y es una lógica que no dice nada sobre la arquitectura, sino sobre sus condiciones de posibilidad desde un punto de vista geométrico”.²¹

El aporte de Monedero consiste en identificar el modelo paramétrico, intentando definir y expandir su significado, al enfatizar las relaciones entre elementos, posicionando estas manifestaciones dentro de un contexto arquitectónico. Se podría argumentar que la postura de Monedero enfatiza aspectos geométricos en la arquitectura, pero esta tesis intentara demostrar la importancia de otras consideraciones, y de sus implicaciones teóricas y practicas.

Barnard Cache es un teórico que fue alumno del renombrado filosofo francés Gilles Deleuze, y sin duda es quizás uno de los pocos arquitectos practicantes que intenta relacionar teoría y praxis en el ámbito de las nuevas herramientas digitales. Vanguardista experimentador de tecnologías CAD/CAM, Cache ha trabajado estrechamente con el concepto de lo paramétrico y de la arquitectura no-estándar. De acuerdo a Cache, el diseño paramétrico no es reciente, sino que ha estado en la disciplina arquitectura desde sus comienzos. Cache reivindica el trabajo de Durer, Vitruvius y

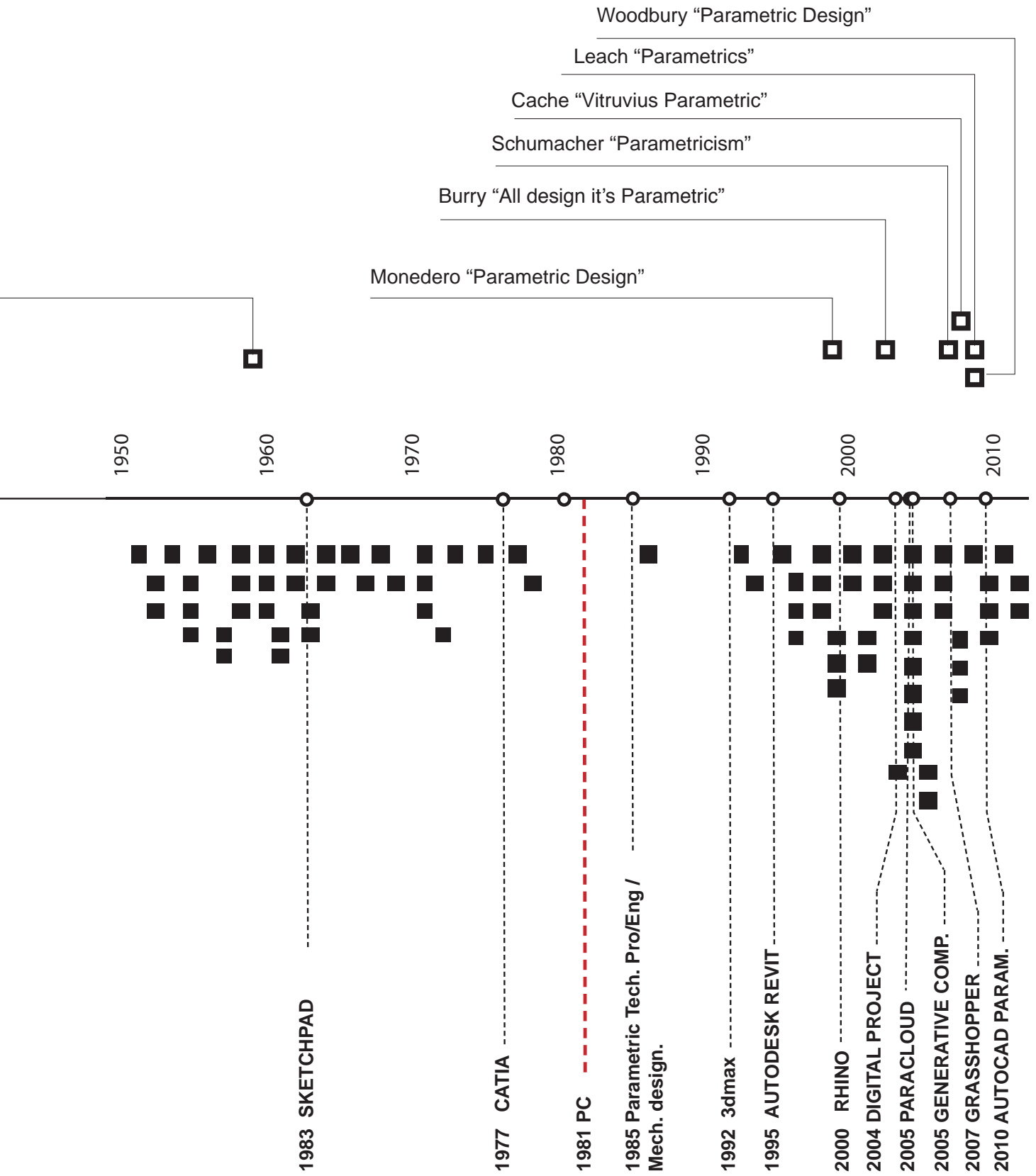
20 Monedero, Javier. Parametric Design: a Review and some Experiences. In: *Automation in Construction*, no. 9, 2000. P. 369-377.

21 Al respecto se destaca su postura al afirmar que las formas paramétricas han existido en la geometría desde antaño. Monedero, Javier. (Personal Communication, September 2010).



- 1) Proyectos Construidos
- 2) Definiciones Teóricas
- 3) Herramientas Digitales

Fig.1-7: Representación de tres fenomenos recurrentes en la praxis y teoria durante el Siglo XX. 1) Proyectos Construidos, 2) Definiciones Teóricas; 3) Herramientas Digitales.



Platón, intentando insertar la arquitectura contemporánea dentro de una sólida tradición histórica. De particular interés, es su investigación acerca de "Vitruvius Parametric" (Cache, 2010) ²², donde enfatiza que el primer tratado de arquitectura ya enfatizaba las relaciones paramétricas. Cache expone el uso de un aparato inventado para calcular las proporciones, "armonía" en griego, que facilitaba un gran número de operaciones al establecer relaciones paramétricas entre sus partes. Cache discute si es concebible construir una trayectoria de tradición entre las técnicas paramétricas utilizadas por el arquitecto de hoy, y algunos precedentes del tratado más antiguo de arquitectura. A pesar de advertir contra comparaciones excesivamente apresuradas, y de aclarar que los contextos de la antigüedad no pueden equipararse a las circunstancias de nuestro tiempo, Cache advierte que "Still, it would be an error to consider such historical contexts in strict isolation from one another, since that would eliminate at the outset all questions regarding the survival of related problematics."²³ De este modo, Cache establece una conexión en lo referente a contextos históricos y de las preocupaciones de las problemáticas propias de la arquitectura.

La postura de Cache en cuanto a la existencia de parámetros en la arquitectura desde antaño, ha sido compartida por numerosos otros autores.

Mark Burry, plantea que "todo diseño es paramétrico", y cuestiona el uso del término como redundante, dado que todo diseño actúa evaluando un rango de parámetros durante cualquier proceso.²⁴ Burry completa su definición al afirmar que: "el propósito de modelos paramétricos sirven para constreñir la geometría a los métodos de fabricación seleccionados para su construcción". "La geometría del diseño en modelos digitales se constriñe por los métodos de fabricación y se vinculan con el análisis de ingeniería (materialidad y carga estructural). Las iteraciones de la geometría del diseño son entonces optimizadas o 'resueltas' para producir variaciones de acuerdo a los parámetros de diseño específicos". Esta definición proporciona importantes conceptos acerca de las ventajas más notables de este sistema de diseño relacionadas con las ventajas dentro de los sistemas de fabricación y construcción.

Un intento significativo y altamente polémico ha surgido cuando Patrick Schumacher, socio de la destacada firma Hadid Architects, escribe el "Parametricism as Style, Parametricist Manifesto" ²⁵, que fue presentado en la Bienal de Arquitectura de Venecia en 2008. Schumacher declara que estamos frente a un "estilo maduro" denominado "Parametricismo", el cual en-

22 Dürer, Vitruvius, Plato: *Instruments of Thought*. Bernard Cache. Archinthemaking. 2013. [viewed date October 29, 2015]. Available from:

23 Cache, Bernard. De Architectura: On the Table of Content of the Ten Books on Architecture. *Candide. Journal for Architectural Knowledge*, Dec. 2009, no.1, p. 16. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=VxzdW4H4aww>

24 Burry, Mark. *Between Intuition and process: Parametric Design and Rapid Prototyping*. In: Kolarevic, Branko (ed.). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York : Taylor & Francis, 2004. P. 210.

25 Schumacher, Patrik. *Parametricism as Style : Parametricist Manifesto*. In: Darkside Club, 11th. Venice Architecture Biennale, 2008. Pp. 1-5.

cuentra sus raíces en los softwares de modelamiento digital. Sin embargo, define “estilo” como un “agenda de investigación”, para posteriormente intentar sentar sus fundamentos desarrollando una serie de principios que lo sustentan, los que se pueden resumir como:

1) La inter-articulación de sub-sistemas: La ambición es pasar de la única diferenciación del sistema - por ejemplo, un enjambre de componentes de fachada - a la asociación de múltiples subsistemas: envolvente, estructura, subdivisión interna, vacío de navegación. La diferenciación en los sistemas se correlaciona con diferenciaciones en los otros sistemas.

2) La acentuación: La ambición es mejorar el sentido de integración orgánica a través de correlaciones que favorecen la desviación amplificada más que adaptaciones compensatorias. El sistema asociado debe acentuar la diferenciación inicial. Así, una articulación mucho más rica se puede lograr y la información visual más que de orientación puede ponerse a disposición.

3) La figuración, proponen configuraciones complejas construidas como un modelo paramétrico con variables figurativas sensitivas, las que pueden generar “gestaltcatastrophes” o una cuantitativa modificación a los parámetros en la configuración percibida. Junto a los parámetros de los objetos, los parámetros ambientales, y del observador deben de ser integrados al sistema paramétrico.

4) La responsividad: Los entornos urbanos y arquitectónicos reciben una capacidad kinética que permite la reconfiguración y adaptación como respuesta a los patrones prevalentes de ocupación. El registro en tiempo real conduce la adaptación cinética en tiempo real. El espacio construido adquiere una agencia de respuesta a escalas de tiempo diferentes.

5) El urbanismo paramétrico – Profunda Racionalidad, cuyo propósito es integrar la morfología de los edificios, hasta los detalles de articulaciones tectónicas y las organizaciones internas.

La definición de Schumacher es quizás una de las más problemáticas porque ha generado amplias críticas, dado que una gran parte de la disciplina arquitectónica relaciona lo paramétrico como un nuevo estilo ²⁶, con fuertes referencias formales, y por tanto se le considera como la encarnación tardía del postmodernismo, obsesionado con la estética y la apariencia de las formas (Leach, 2010). Es necesario abordar sus contenidos con gran cautela y precaución. Este estudio permitirá establecer si esta noción de estilo ²⁷ sería aplicable o adecuada para un fenómeno que se extiende a través del tiempo y la historia, o si resulta pertinente posicionarlo de otra manera. Aunque resulta ser una grata invitación a mirar la arquitectura desde una perspectiva renovada, para desvelar un paradigma al inicio de un nuevo siglo, se lo considera como un aporte importante al conocimiento arquitectónico, que sin duda

26 Schumacher, Patrik. Patrik Schumacher on Parametricism : Let the Style Wars Begin. *Architects' Journal*, 2010, pp. 1–9.

27 Schumacher, Patrik; Leach, Neil. (ed.). Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design. *Architectural Design*, no. 79 (4), 2009, pp. 14-23.

abre las puertas a valiosos e inesperados conceptos, y que sugieren una nueva sensibilidad por parte del arquitecto, donde nuevos postulados se exponen de una manera altamente sugerente y con gran vigor. Dentro de este contexto, el Manifiesto Parametricista, en vez de aparecer como una instigación, podría también interpretarse como una sugerente invitación a indagar territorios inexplorados dentro de la arquitectura. Una invitación que este trabajo pretende explorar desde una perspectiva histórica y con una mirada altamente crítica, para recorrer un tema desconocido en términos teóricos, estéticos, funcionales, formales y espaciales.

En una línea argumental similar a la de Schumacher, otro intento notable por definir lo paramétrico aparece en el artículo "Parametrics Explained" de Neil Leach, quien afirma que "lo paramétrico es un término que se utiliza en una variedad de disciplinas desde las matemáticas al diseño. Literalmente significa trabajar dentro de los parámetros de un rango definido. Sin embargo, dentro del campo específico del diseño, se refiere en términos generales a la utilización de software de diseño paramétrico. En contraste con los paquetes de software estándar basados en objetos geométricos, los software paramétricos enlazan dimensiones y parámetros a la geometría, permitiendo así el ajuste gradual de una parte que a su vez afecta a todo el conjunto ... Las operaciones que facilita esta herramienta son la adaptación, la combinación y la fluidez. Por lo tanto, es útil no sólo en el modelado de las formas individuales, sino también en todo el campo de la planificación urbana asociativa."²⁸. Leach se aleja de las descripciones estilísticas y formales de Schumacher, e insiste que una nueva manera de enfrentar el diseño, donde las técnicas computacionales están imbuidas de sistemas evolutivos y emergentes, donde el diagrama toma más preponderancia y se vuelve más real. La forma aparece entonces irrelevante en estos nuevos horizontes, y debemos enfocarnos en procesos de diseño más inteligentes y más lógicos, donde "la lógica debería ser la nueva forma", afirma Leach citando a Nick Pisca.

Otras definiciones con respecto al tema se aproximan a aspectos técnicos y a su contexto operativo. En este sentido, la reciente publicación en 2010 de Woodbury "Elements of Parametric Design" constituye un aporte significativo en entender la estructura de los sistemas paramétricos. Woodbury define el "modelamiento paramétrico, también conocido como modelamiento constreñido, introduciendo un cambio fundamental: las partes de un diseño que se relacionan y cambian juntas de manera coordinada."²⁹ Los diseñadores deben ahora sumar, borrar, relacionar y reparar. Woodbury expone con precisión los elementos del modelamiento paramétrico, comenzando por definir las nuevas habilidades necesarias para abordar el diseño, desde la concepción del flujo de datos, o las estrategias de dividir para conquistar, nombrando, pensando con abstracción, un pensamiento matemático y algorítmico. El modelado paramétrico, que también es con-

28 Leach, Neil. *Parametrics Explained*, n.d. Texto sin publicar.

29 Woodbury, Robert. *Elements of Parametric Design*. London : Routledge, 2010.

ocido como modelado de las restricciones, se concibe como partes que se relacionan y cambian de forma coordinada. En la actualidad los diseñadores pueden añadir, borrar, relacionar y reparar. El acto de relación requiere una reflexión explícita sobre el tipo de relación relativa y la reparación de imponer cambios fundamentales en los sistemas y el trabajo que se hace con ellos". El aporte de Woodbury es definir un nuevo campo creativo para los diseñadores: los códigos.³⁰

Las definiciones antes expuestas fueron seleccionadas como las más relevantes, iniciándose a mediados del siglo pasado (Moretti, 1960), para reaparecer con más fuerza a principios de este siglo impulsado por la aparición de softwares de modelamiento digital con Monedero (2000), Cache (2009), Burry (2004), Schumacker (2008), Woodbury (2010), Leach (2010). Estas posturas representan las directrices más importantes en esta temática, gravitando en su énfasis desde posturas más teóricas (Cache, Leach, Schumacker), hasta planteamientos más prácticos y metodológicos (Monedero, Burry, Woodbury). A continuación, se exponen algunas reflexiones para ser confrontadas, y finalmente aclarar sus principios y contribuciones.

Es preciso establecer que las definiciones expuestas provienen de autores que han estado trabajando independientemente para establecer ciertos principios y criterios, con el simple intento de explicar estas incipientes prácticas en la disciplina. Por lo tanto, estas definiciones aparecen como esfuerzos aislados y no constituyen un trabajo disciplinar riguroso sustentado por una reflexión teórica e histórica, sino que afloran dispersas e inconexas, las que se podrían considerar carentes de un planteamiento coherente y significativo para la disciplina arquitectónica. Aun más preocupante, se presentan a menudo contradictorias, incompletas e incluso incompatibles entre sí, y por lo tanto, se hace necesario una revisión con el propósito de ser confrontadas, comparadas y precisadas.

Como se ha expuesto anteriormente, el término ha sido utilizado indiscriminadamente para referirse a las herramientas digitales emergentes, como al diseño generado por códigos denominado asociativo, generativo, algorítmico, algoritmos genéticos; o a proyectos de formas libres; o al uso indiscriminado de términos como "Arquitectura Digital", "Arquitectura Algorítmica", o incluso "Arquitectura Paramétrica", llegando incluso ha sido denominado un "estilo arquitectónico" denominado "Parametricismo". Aquí reside quizás la mayor confusión teórica que este estudio intenta refutar, la que se puede reducir dos aspectos: el referente a la noción de un "estilo maduro", y si su aparición es debidamente atribuida al surgimiento de las herramientas digitales.

Lo paramétrico definido como producto o consecuencia de las herramientas digitales, han sido respaldado por las definiciones de Schumaker,

30 Woodbury, R, Williamson, S, Beesley, P. *Parametric Modelling as a Design Representation in Architecture: A Process Account*. In: Canadian Design Engineering Network. Third CDEN/RCCI International Conference on Education, Innovation, and Practice in Engineering Design. Toronto, July 2006.

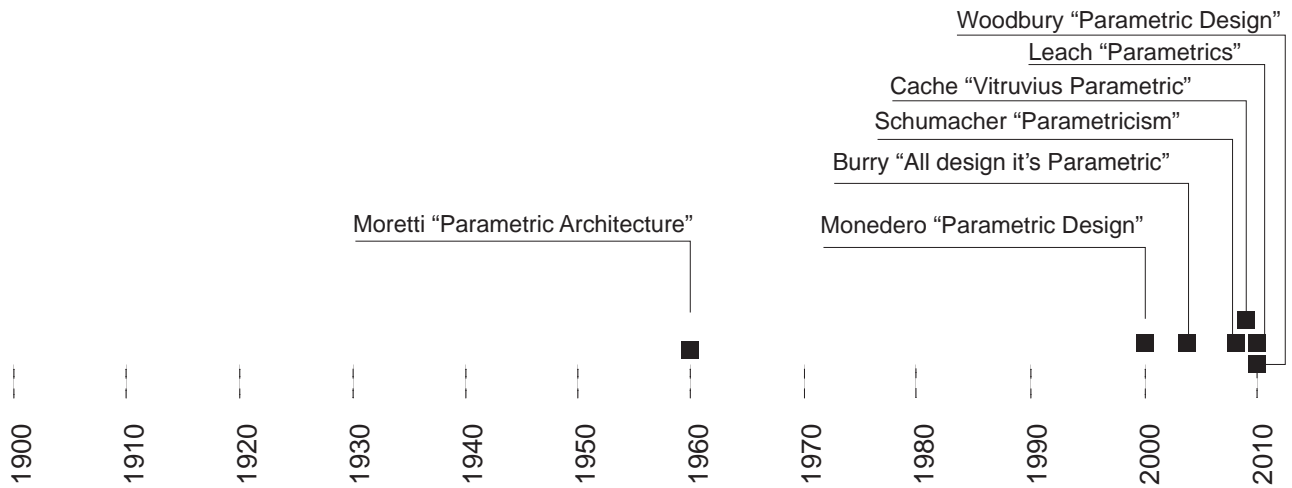


Fig. 1-8: Definiciones existentes en orden cronológico.

	Moretti	Monedero	Burry	Schumacher	Cache	Leach	Woodbury
Parámetros	■	■	■	■	■	■	■
Estilo				■			
Método	■						
Científico	■						
Algorítmico/Matemático	■	■	■	■	■	■	■
Variación	■	■	■	■	■	■	■
Digital				■		■	■
Escala Arquitectónica	■	■	■	■	■	■	
Escala Urbana				■		■	
Forma/ Estética	■	■	■		■		■
Función	■		■		■		
Estructura	■	■	■		■		
Construcción	■	■	■		■		

Fig. 1-9: Definiciones existentes por tópico y autor.

Leach, y Woodbury. Si bien estas afirmaciones son adecuadas en cuanto a describir las manifestaciones arquitectónicas recientes relacionadas a las técnicas de modelamiento digital, no establecen explícitamente que lo paramétrico ya se ha manifestado a lo largo de la historia, y pueden resultar confusas.

A partir de las definiciones existentes, se pretende sugerir una definición de trabajo, que permita una aproximación preliminar al tema. En el capítulo final, se intentara formular una definición acorde con los resultados que arroje esta investigación.

DESDE LA PRAXIS A LA TEORÍA

Basados en las definiciones existente sobre el tema a la fecha, se podría construir una definición como punto de inicio de esta investigación, basada en las siguientes premisas:

Método de proyectación interdisciplinar;

Sistema basado en parámetros base que se prolifera en un sistema a través de relaciones (matemáticas, constructivas, formales, estructurales); lo que se ha denominado también diseño asociativo;

Las variaciones de parámetros (elementos) mediante valores variables limitados por constreñimientos y tolerancias con capacidad de adaptación que permite rangos restringidos. Las soluciones dentro de un modelo definido a-priori, se refiere a variaciones dentro de "límite o frontera o restricciones o constreñimientos". Los constreñimientos otorgan gran libertad cuando están debidamente formulados de manera clara y precisa.

Basados en esta definición, la presencia de las lógicas paramétricas podrían existir en la arquitectura y en otras disciplinas. El próximo capítulo realiza una búsqueda de manifestaciones en diversas áreas del quehacer humano, para finalizar con algunos proyectos que exhiben estos principios a través de la historia, para finalizar con proyectos durante el Siglo XX, los que serán analizados en detalles para extraer principios y conceptos relevantes.

Basados en este modelo operacional como una manera de instrumentalizar el estudio de proyectos relevantes, se realiza un catalogo que podrían ser utilizados como referentes en futuras investigaciones. De esta manera, esta tesis puede considerarse como una reflexión teórica y crítica, en lugar de una obra historicista tradicional, que podría sumarse a una investigación académica mas vasta en el área, que facilitaría la aplicación de estas herramientas de diseño en la practica arquitectónica.

El presente estudio se posiciona como una reflexión critica que gravita entre postulados teóricos y ejemplos prácticos en una temática emergente, con el objetivo de trazar algunos bases que logren contribuir con un cuerpo de conocimiento para la arquitectura de este siglo, al explorar nuevos conceptos en el ámbito de la incorporación de herramientas digitales y nuevas metodologías de diseño en la arquitectura. Se pretenden aclarar algunos conceptos fundamentales relacionados al diseño paramétrico, al revelar la conexión de las TIC en la tecnología, y su relevancia para la práctica arquitectónica en la actualidad.

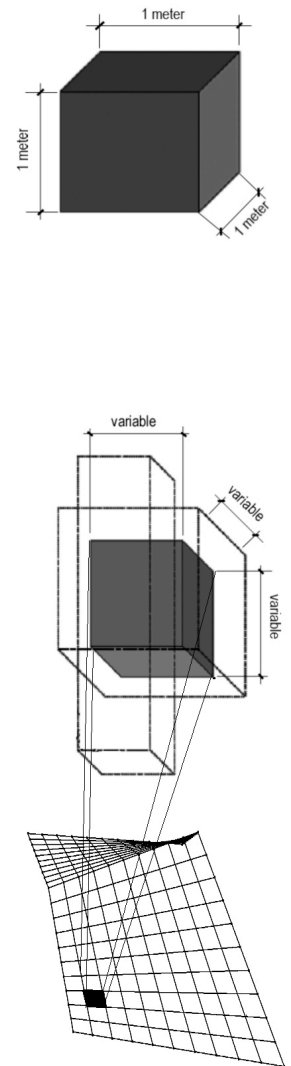


Fig. 1-10 : Objeto dimensionado (izquierda) y objeto paramétrico (derecha).

CAPITULO 2



PRECEDENTES



ALGUNOS PRECEDENTES

El diseño paramétrico ha estado al centro de la discusión en algunos círculos académicos y profesionales desde la década del 2000.

A pesar de su reciente y extenso uso en el campo de las herramientas computacionales en la arquitectura, este término ha sido ampliamente utilizado en varias otras disciplinas a través de la historia, destacando las matemáticas, la biología, las artes, las estadísticas, y muy especialmente en las ciencias de la computación. Sin embargo, existe cierta dificultad para detectar los precedentes relevantes, y el estudio, el análisis y la evaluación de las herramientas metodológicas y los conceptos teóricos que ellos proponen.

Basados en la definición descrita en el capítulo anterior, se intentará **identificar** algunos referentes relevantes en diversas disciplinas, así como también revisar las herramientas metodológicas utilizadas e implementadas por sus autores, para finalmente extraer algunos conceptos teóricos que sugieren a partir de estas prácticas. Su definición, por tanto, contiene una serie de matices y conceptos altamente específicos e inherentes a cada rama de conocimiento que esta investigación intenta profundizar. Se esboza entonces un contexto disciplinar desde donde se han explorado la utilización de estas herramientas, para finalmente estudiar algunas manifestaciones a escala arquitectónica.

A partir de la definición formulada en el capítulo anterior, donde lo paramétrico se entiende como una lógica caracterizada por la relación entre partes y todo, la proliferación de un componente o módulo a lo largo de un sistema; y la presencia de parámetros cambiantes y variados capaz de producir una transformación secuencial, se propone la siguiente metodología. Primero, se verifica la existencia de estos principios en diversas disciplinas en el campo del arte, la biología, la filosofía, como en ámbitos lógicamente más relacionados con este tema, como lo son las matemáticas, la geometría, y la computación. Se finalizará con el estudio de precedentes en la arquitectura a través de la historia, y en particular durante el siglo XX. Segundo, se revisan las herramientas metodológicas implementadas por sus autores. Tercero, se extraen los conceptos teóricos que sugieren a partir de estas prácticas.

Este capítulo verifica si estos principios han estado presente en algunos ámbitos del quehacer humano a lo largo de la historia, identificando algunos casos relevantes, para luego analizarlos como un fenómeno interrelacionado, y finalmente, estudiar el fenómeno a escala arquitectónica.

PRECEDENTES EN LAS ARTES

En el campo de las artes, uno de los precedentes más significativos surge en 1613, cuando Albrecht Durer escribe el tratado en proporción, "Les Quatres livres, tratado sobre las proporciones del cuerpo humano"¹, donde aborda el estudio de las proporciones humanas relacionados con la fisonomía lo que se denomina "Face Transformation"². Para implementar su estudio, Durer establece una metodología particular basada en un sistema de malla ortogonal, derivado de formulas matemáticas para simular formas cóncavas y convexas, las que aplica a varios rostros los que deforman esta malla de acuerdo a proporciones específicas. Durer estudia la variabilidad de las proporciones del rostro humano, donde observa y documenta variaciones y deformaciones de acuerdo a las particularidades de cada fisonomía, mediante un sistema de correlaciones variables entre el todo y sus partes. El conjunto de estudios genera una sucesión topológica dentro de la malla original.

Metodológicamente el trabajo de Durer se podría resumir en los siguientes principios:

- La existencia de un orden estructurado en una malla reticular basada en proporciones matemáticas, evidenciando la concepción de un orden general subyacente en todos los rostros y la existencia de reglas subyacentes en las proporciones de la belleza;
- Esta malla puede adaptarse basado en proporciones asociativas entre partes del rostro definidos por partes reflejadas en retícula base, y el todo reflejada en la malla ortogonal;
- Cada rostro enfatiza las características peculiares y singulares, pero al mismo tiempo forma parte del conjunto de versiones, lo que evidencia la existencia de transformaciones topológicas.

El trabajo de las "Face Transformations" de Durer (Fig. 2-1 y 2-2) resultara decisivo varios siglos más tarde, cuando el biólogo y matemático D'Arcy Thompson utiliza una aproximación similar. Su libro seminal "Sobre el Crecimiento y la Forma"³ es considerado por muchos teóricos como el punto

1 Dürer, Albrecht; Camerarius, Joachim. *Alberti Dureri Clarissimi Pictoris et Geometrae de Symmetria partium humanorum corporum Libri quatuor, è Germanica lingua, in Latinam versi* [online]. Parisii: in officina Caroli Perier, in vico Bellouaco, sub Bellerophonte, 1557 [viewed 28 October 2015]. Available from: <http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-9247>

2 Ibid. Pp 78-88.

3 Thompson, D'Arcy Wentworth. *Sobre el Crecimiento y la Forma*. Madrid : Akal, 2011. Pp. 257-308.

de gestación para entender procesos de morfogénesis, entendido como el origen de la forma en relación a aspectos biológicos con la física y las matemáticas, el que ha ejercido una innegable influencia en innumerable ámbitos, especialmente en el diseño y la arquitectura actual.

Thompson se oponía a los postulados de Darwin y sentía que la biología podía entenderse fuera de los límites de la selección natural y de la evolución. Para ello, estudia las formas orgánicas intentando entender la relación entre morfología y la teoría biológica, explicando que la evolución de la especie se basa en grandes cambios que afectan la totalidad de los organismos. Su premisa principal promulgaba que los problemas de la forma son en primera instancia, problemas matemáticos, y los problemas de crecimiento son esencialmente, problemas físicos. Thompson estudia la forma y sus variantes en organismos existentes en la naturaleza relacionando aspectos de morfología con diversas disciplinas como las matemáticas, la biología, la física y la geometría.

La "Teoría de las Transformaciones" (Thompson, 1917) estudia algunos organismos reflejados en estructuras matemáticas y su relación con las leyes de la física, elaborando algunas ideas de cómo los procesos físicos afectan el crecimiento biológico, y por lo tanto, definen las formas naturales. Thompson materializa estas descripciones matemáticas a partir de una trama ortogonal (Fig. 2-3), la que se deforma para absorber las particularidades de cada organismo, explicando ciertas formas como un cuerpo creado mediante la variación de ciertos rangos en diferentes puntos y direcciones, por ejemplo para crear la concha en espiral de un caracol, o para describir los cambios morfológicos de un pez. Para ello, se interpreta y analiza el crecimiento y la estructura de los organismos en términos matemáticos y físicos, mediante una malla rectangular que se adapta a diferentes especímenes, asignando variables complejas para relacionar formas significativas de aquellas aparentemente distintas.

Metodológicamente la "Teoría de las Transformaciones" se podría resumir en la existencia de un orden matemático basado en una malla reticular para establecer proporciones generales; la adaptación de la retícula base a la particularidad de cada organismo; y el desarrollo de una serie de variaciones dentro de esta malla, la que enfatiza las características peculiares y singulares de cada organismo. El conjunto de entidades similares pero singulares evidencia la existencia de una serie de transformaciones topológicas. Tal vez la debilidad de los postulados de Thompson podrían ser atribuidas a la falta de especificidad de las transformaciones, y de su enfoque bidimensional para el análisis de la forma, que obviamente se vieron limitadas por los avances tecnológicos de su tiempo. Sin embargo, su contribución ha sido ampliamente reconocida, al demostrar un determinado aspecto de la morfología relacionado con las matemáticas y la física, revelando algunos conceptos y principios sobre el origen de la forma.

En otro ámbito disciplinar, algunos estudios con respecto al movimiento y la transformación de las formas fueron desarrollados por el destacado científico, físico y cronofotógrafo Etienne-Jules Marey entre 1830-1904. Al

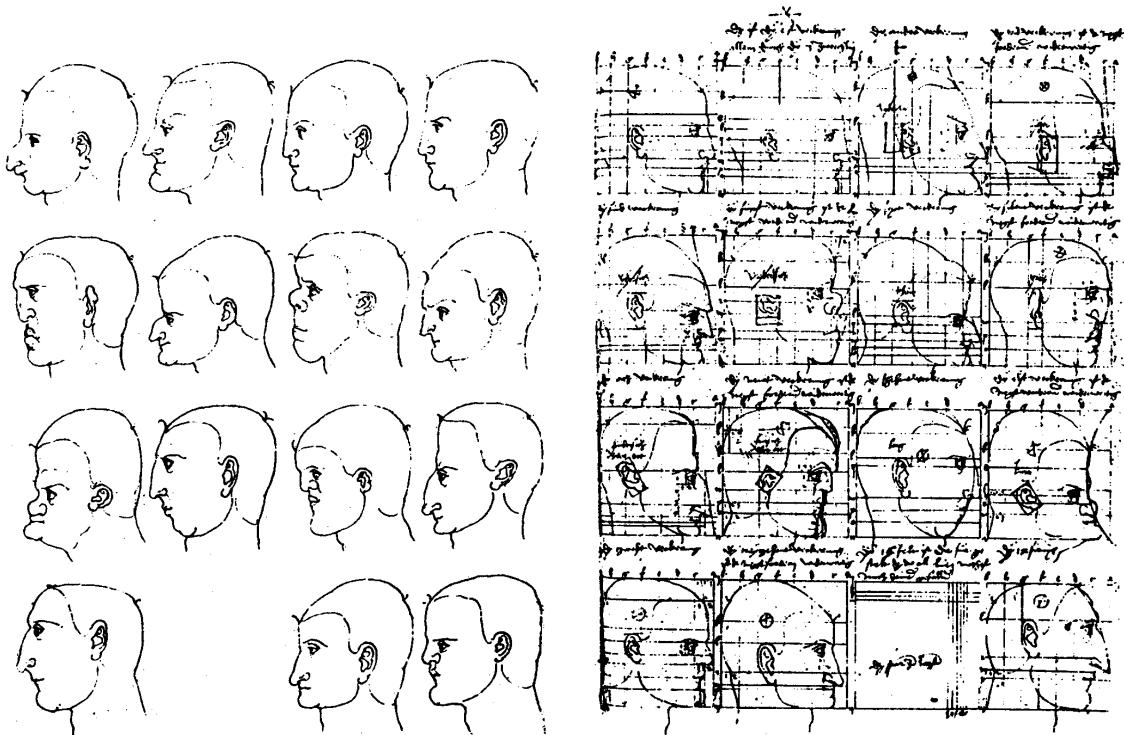
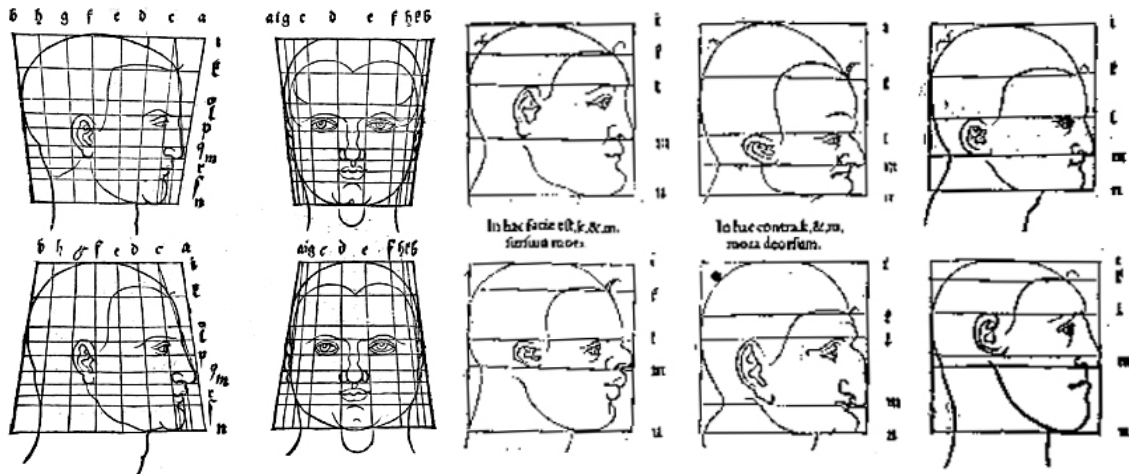


Fig. 2-1 & 2-2: Transformaciones en coordenadas de Albrecht Durer, circa 1524. Anverse (izquierda) y reverse (derecha) identificando las proporciones. Nótese las orejas en rotación en la fila 3.

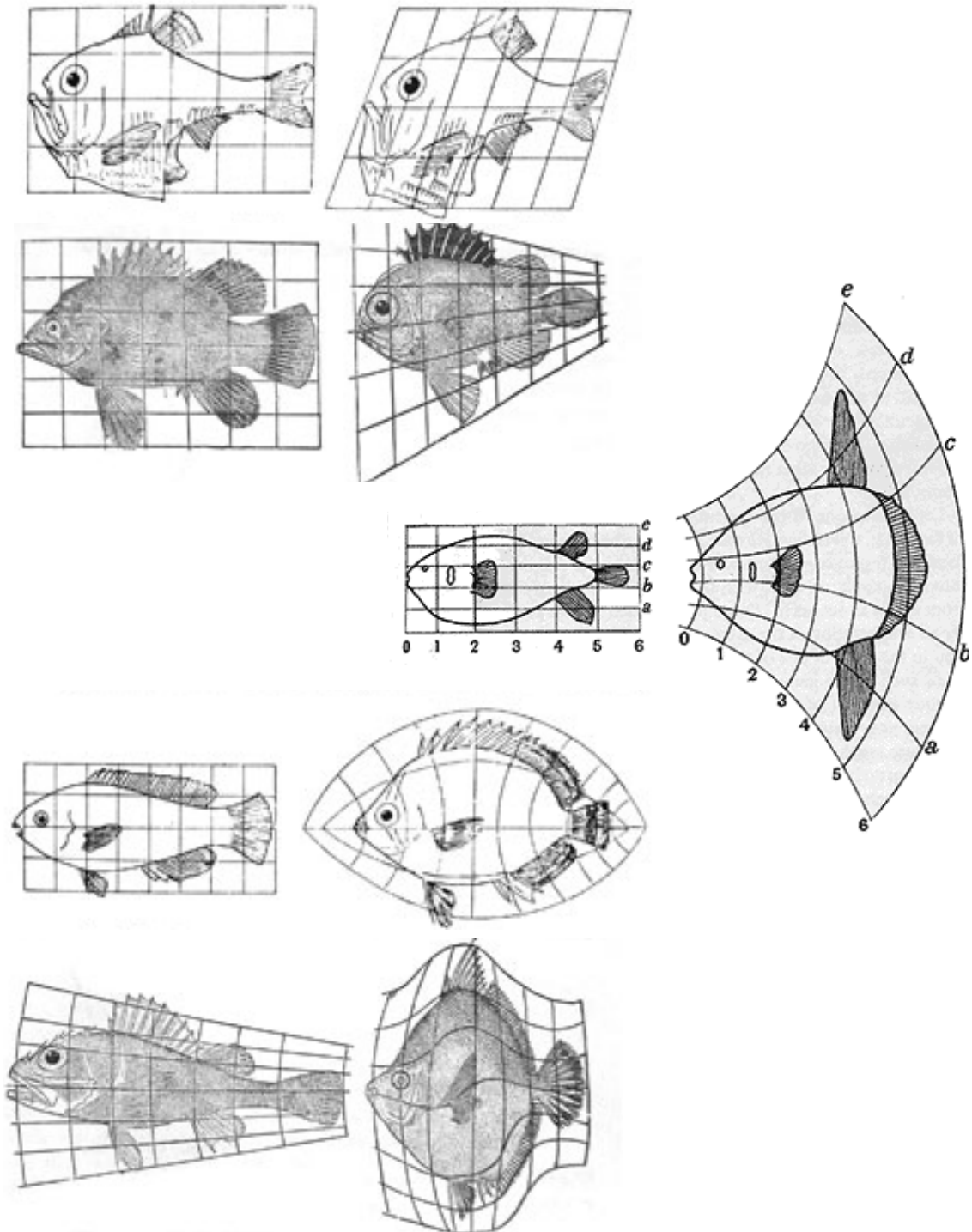


Fig. 2-3: La teoría de las transformaciones de D'Arcy Thompson aplicadas a peces con una variedad de deformaciones.

conocer el trabajo de Edward Muybridge en 1878 (Fig. 2-4), Marey expresa su admiración por las fotografías instantáneas, y declara que sueña con una escopeta fotográfica que le permita estudiar el vuelo de las aves como una serie de movimientos de alas desplegadas en ciclos de sucesivas fases. Para Marey, constituía una verdadera revolución si los artistas pudiesen analizar el verdadero movimiento de los cuerpos en tiempo real, lo que sienta las bases conceptuales, desarrolla las máquinas necesarias, y construye los fundamentos tecnológicos para la cinematografía.⁴

Para llevar a cabo sus experimentos, Marey diseña conjuntamente con sus colaboradores máquinas de registros del movimiento, comenzando por investigar varios procedimientos: el método gráfico con el "Sphygmograph", para luego explorar el método electro-gráfico con la denominada "escopeta fotográfica". Este instrumento creado en 1874 por el astrónomo Jules Janssen, y adaptado por Marey, era capaz de tomar doce exposiciones en un segundo para proporcionar una fluida expresión del tiempo y movimiento.

Marey desarrolla una metodología particular, utilizando la fotografía para estudiar el movimiento como un todo continuo, mediante un sistema de imágenes instantáneas captadas en intervalos precisos de tiempo (expresadas en exposiciones por segundo), ayudando a crear una composición mediante la superposición de imágenes combinadas, para construir una secuencia que intenta reflejar la totalidad del movimiento. Marey crea composiciones de registro del movimiento de gran belleza plástica, donde representa variados movimientos de pájaros en vuelo, caballos galopando, personas caminando o en ejercicio, entre otras.

Marey denomina su método de descomposición del movimiento "photochronographie", luego "chronographie" o fotografía del tiempo, mediante la cual buscaba una interpretación científica de "rango, velocidad, y secuencia de las fases del movimiento, no solo caminando, sino que corriendo o saltando". Para encontrar las condiciones externas que influyen los movimientos y medir la energía requerida en cada instante.

Pero Marey no se satisface solo con la representación gráfica del movimiento, y propone un invento revolucionario, un método para fotografiar el movimiento mediante la descomposición y el registro de segmentos en un plano, estableciendo un sistema de descomposición del cuerpo en líneas y puntos que genera un diagrama del movimiento, identificando partes con capacidad de adaptación dentro de un todo continuo. Para ello, transforma al sujeto de estudio en un "Graphic Notation" o "Anotación Gráfica", preparando escenas de fondo negro, y vistiendo a sus modelos con un traje también negro, con marca las articulaciones con puntos brillantes, conectadas con bandas metálicas para visualizar las extremidades, y a la vez aumentando el número de fotografías al modificar el número de exposiciones del disco (Fig. 2-5). Marey trabaja como un verdadero arqueólogo, porque cada línea que representa el movimiento pasa a ser un

⁴ Braun, Marta. *Picturing Time: The Work of Etienne-Jules Marey (1830-1904)*. Chicago: University of Chicago Press, 1992. Pp.150-151.

modelo de estudio mas o menos científico, donde las trayectorias generan complejos modelos geométricos. Las líneas que ondulaban ininterrumpidamente representaban la vida misma (Fig. 2-6), afirma Marey, porque cada línea proporcionaba una medida a partir de la cual se hace posible calcular la fuerza del movimiento, y el esfuerzo requerido para realizarlo.⁵ Pero la escopeta no proporcionaba la dimensión espacial, y se hacia imposible trazar la línea exacta de movimiento en un cierto periodo de tiempo, y por tanto se hacia imposible calcular su velocidad.⁶

La implementación de este método crea un lenguaje particular de visualización compuesto por formas lineares y angulares mediante la superposición de formas tridimensionales, que continua ejerciendo influencia hasta la actualidad. La falta de satisfacción de Marey se evidencia cuando afirma que el método de análisis fotográfico los dos elementos fundamentales (tiempo y espacio), no pueden ser estipulados de una manera perfecta⁷, haciendo un esfuerzo y realiza una transición desde describir el movimiento, hasta medir las fuerzas que lo determinan.⁸ Para ello, propone el uso de la "cámara estereoscópica" para reconstruir una visión binocular en 3 dimensiones denominado método de "Cronofotografía Geométrica", que permite derivar en un modelo de calculo científico preciso, posibilitando el calculo de velocidad de ciertas partes del cuerpo, al multiplicar la masa del cuerpo por la velocidad, y así medir la energía expedida en este acto, formulando un método para el análisis del movimiento humano.

Se podría argumentar que el trabajo de Marey constituye un notable estudio del movimiento mediante la descomposición de las formas en elementos precisos, a partir de **líneas y puntos en un sistema altamente parametrizado**. Este sistema dinámico de transformaciones permite entender un orden basado en secuencias, compuesto por elementos continuamente interrelacionados, adaptables, y variados. Marey establece un método de análisis, diseña las herramientas necesarias para aplicarlos de manera científica, ejecuta notables experimentos, y documenta los resultados.

La contribución de Jules Marey será rescatada mas tarde por Marcel Duchamp, uno de los artistas conceptuales mas influyente del siglo pasado, quien en su obra "Desnudo Bajando una Escalera" (Duchamp, 1912), aborda el tema de la transformación de la forma en movimiento utilizando la metodología de Marey antes descrita, alejándose de los efectos cinemáticos que intentaban desarrollar sus contemporáneos. El mismo Duchamp realiza años mas tarde, una explicación mediante una cuidadosa superposición de fotografías similar a la utilizada anteriormente por Jules Marey, mostrándose a el mismo bajando una escalera, revelando el alto grado de abstracción y sofisticación en sus postulados, una especie de "fotografía científica" dentro de una compleja especulación geométrica (Fig. 2-7). Una de sus contribuciones más significativas fue la búsqueda de un meticuloso reduccionismo, intentando abstraer el movimiento de los cuerpos medi-

5 Ibid. p. 61.

6 Ibid. p. 62.

7 Ibid. p. 83.

8 Ibid. p. 136.



Fig. 2-4: Primer intento de registrar el movimiento utilizando la fotografía. Eadweard Muybridge, Locomotion 442, 1887.

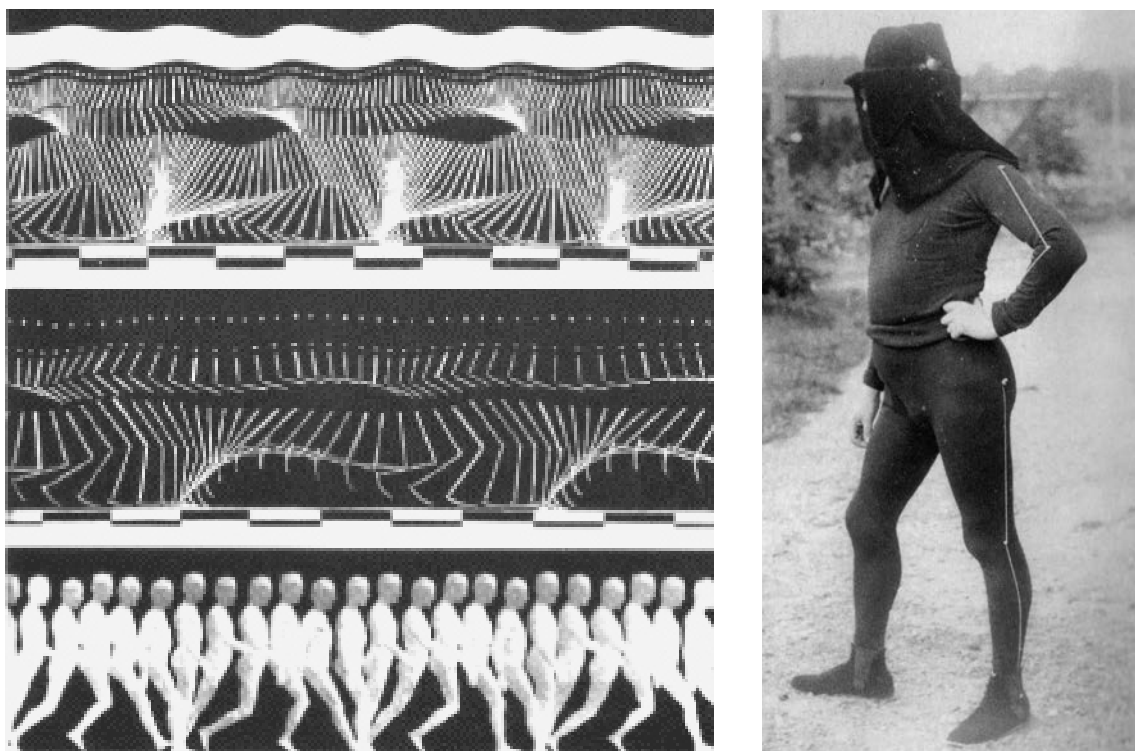


Fig. 2-5: Etienne-Jules Marey Estudio de movimiento de la figura humana, fechado entre 1830-1904. Izquierda: Demery vestido de negro en preparación par ala chronofotografía geométrica, vestimenta de 1884. Album A, plate 12, Beaune.

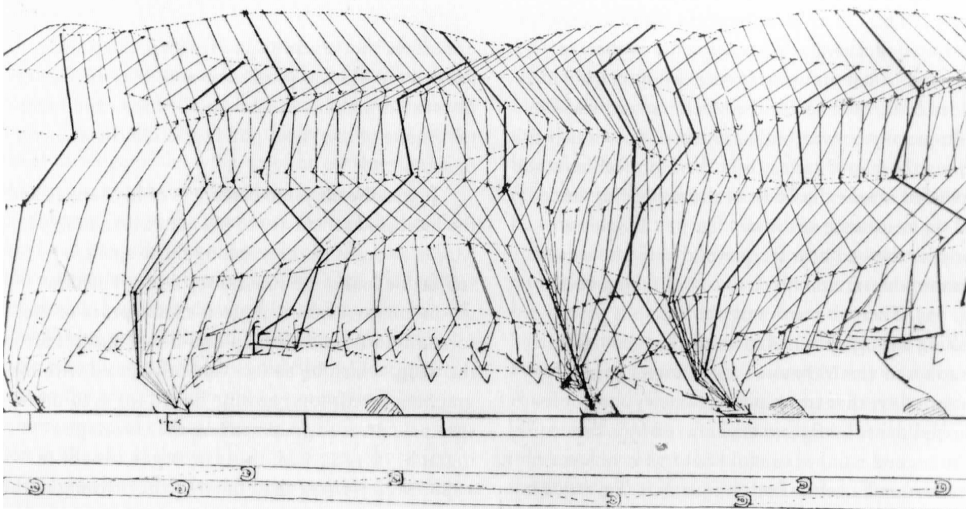
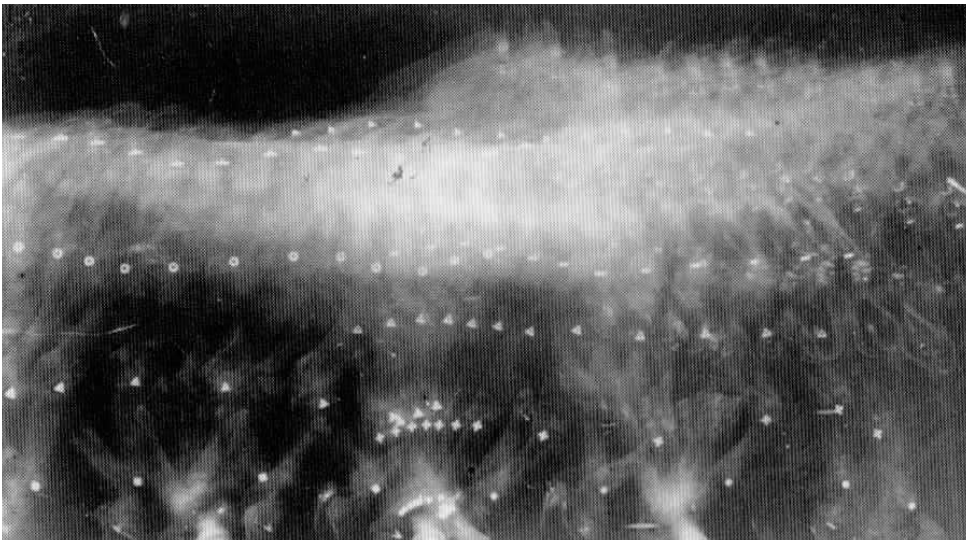
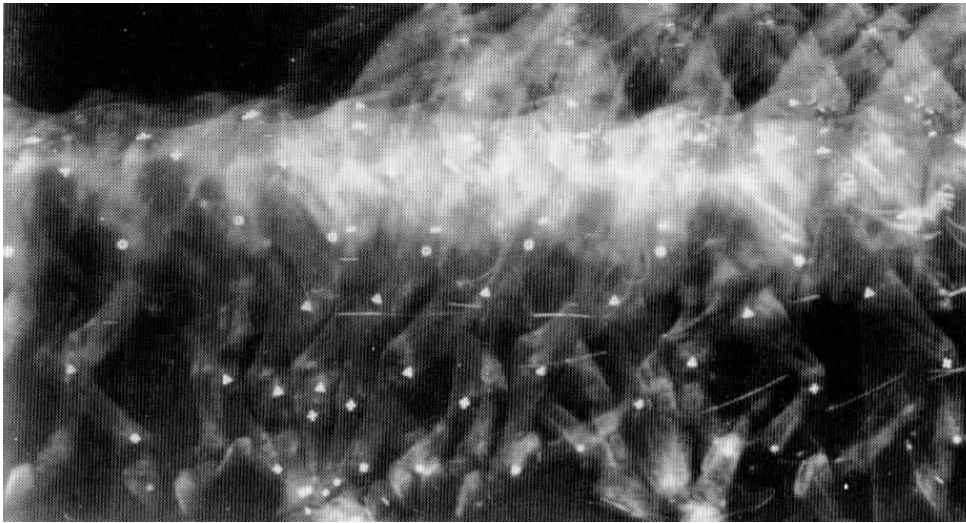


Fig. 2-6: (Arriba) Movimiento de un caballo, se muestran las articulaciones con papel blanco. 1886. College de France.
(Abajo) Diagrama de la pata derecha de un caballo caminando. 1886.

ante una línea, un punto, o un símbolo que pudiera representar la máxima reducción de la forma. Duchamp no se interesaba en el movimiento en sí, sino en revelar la descomposición de las formas buscando expresar un gesto sintético de movimiento, mediante la descomposición, el despedazamiento y la dislocación. La capacidad de síntesis del movimiento, revela una voluntad de acercarse al símbolo abstracto y preciso para representar una silueta en movimiento.

Duchamp consideraba la expresión plástica del movimiento como superflua y carente de significados subyacentes. Introduce así el concepto de fragmentación de la forma en planos y puntos específicos, destinados a proporcionar una lectura dislocada del movimiento, reflejando puntos en el espacio que dan acuso de una serie de instantes específicos en el tiempo. Los conceptos esbozados por Duchamp han sido estudiados extensamente en el plano filosófico, en cuando al concepto del tiempo como una secuencia de horas, desprendida de causalidades y entendiendo cada figura como una expresión particular en el tiempo, y al conjunto de secuencias como un concepto irreductible de eventos y movimiento. La contribución del trabajo de Duchamp esta relacionada con la representación del tiempo en la forma, mediante la utilización de lógicas de descomposición basadas en relaciones geométricas cambiantes entre las partes y el todo. Para ello, Duchamp afirma que el movimiento de las formas inevitablemente nos lleva a comprender aspectos de geometría y matemáticas.⁹

Con respecto a este estudio, se rescatan las aportaciones de Duchamp en cuanto a la fragmentación de partes, y la creación de secuencias en un todo, y la incorporación de aspectos geométricos y matemáticos para describir ciertos procesos de transformación.

Una postura en el uso de estas lógicas son desarrolladas a mediados del siglo XX por casi 30 años, cuando el artista Escher desarrolla sus series denominadas "Metamorfosis" (Fig.2-8). Escher explora una serie de procesos de transformaciones formales en una serie de composiciones sorprendentes. Si bien esta temática ha sido explorada recurrentemente en el arte y las matemáticas bajo nociones de "teselaciones" desde los mosaicos árabes, Escher explora la evolución de formas a partir de una malla inicial confirmada por figuras es posible identificar la partes dentro de un todo en continua transformación porque cada línea es distinta, con puntos de control en teselaciones regulares/irregulares, pudiéndose extraer reglas y pasos en un proceso iterativo. El legado de Escher presenta interés para este estudio por la existencia de un sistema geométrico de trama, la existencia de partes dentro de un todo, y la continua variación de las partes, generando múltiples secuencias y series.

Otro referente importante es el trabajo del escultor e ingeniero ruso Naum Gabo (aka Naum Neemia Pevsner), quien explora la descomposición de las formas desde una perspectiva matemática estudiando superficies regladas intentando representar el movimiento en el espacio y el tiempo. Junto

⁹ Henderson, Linda. *The Fourth Dimension and Non-Euclidean Geometry in Modern Art*. Princeton [N. Jersey] : University Press, 1983. P 128.

a su hermano Antoine Pevsner escribe el "Realistic Manifesto" (Pevsner & Gabo, 1920)¹⁰, un documento esencial para el Constructivismo Ruso que reivindica la técnica constructiva, reconsiderando nociones del espacio y el tiempo. En su obra escultórica, Gabo explora formas mediante el uso de modelos de alambre, donde las superficies de doble curvatura se expresan como una construcción constituida por líneas directrices y de planos en continua rotación. Metodológicamente, Gabo se basa en modelos matemáticos, investigando la materialidad mediante la construcción de modelos físicos en alambre (Fig.2-9), explorando un espacio continuo definido por líneas y perímetros curvos de gran plasticidad, donde se evidencia la voluntad de descomponer el todo en sus partes constituyentes, y de hacer explícita una indisociable relación entre sus partes. La noción de parametrizar la forma aparece al definir superficies de doble curvatura mediante líneas rectas (superficies regladas), no solo simplificando su definición geométrica, sino que también sugiriendo una traslación a escala escultórica y arquitectónica.

2.2

PRECEDENTES EN LA FILOSOFÍA

En otras áreas del conocimiento surgen ciertas lógicas relacionales asociados al concepto de redes culturales y sociales, las que fueron estudiadas extensamente por Paul Baran, quien desarrolla en 1964 esquemas de redes centralizadas, descentralizadas y distribuidas (Fig. 2-10). El interés de estos esquemas radica en la existencia de un orden estructurado en sistemas geométricos en base a puntos o nodos, y enlaces o líneas, las que han sido extensamente utilizados para representar fenómenos relacionados con el Internet y las redes sociales. El trabajo de Baran sigue ejerciendo profunda influencia en los esquemas actuales de organización en red.

El inicio del siglo 21 ha traído consigo significativos adelantos en la tecnología, en las comunicaciones y en la información, que están afectando profundamente la concepción de la sociedad en que vivimos. En el ámbito de la filosofía, los profundos cambios hacia una sociedad de la información basada en las herramientas digitales será decisivo en la definición de la sociedad contemporánea. Estas manifestaciones han impulsado a diversos filósofos a explorar conceptos subyacentes a estas transformaciones, que afectan los sistemas sociales, políticos, y culturales. Aparece en la filosofía una postura basada en la teoría de subjetividad, introducida a partir de la década de 1980 por los filósofos Deleuze, Foucault, Derrida, y más recientemente, por Manuel Castells. Estas posturas comparten una visión particu-

¹⁰ Gabo, Naum; Pevsner, Antoine. *The Realistic Manifesto*. In : *The Tradition of Constructivism*. Bann, Stephen (ed.). New York : Da Capo Press, 1974. Pp 3-11.

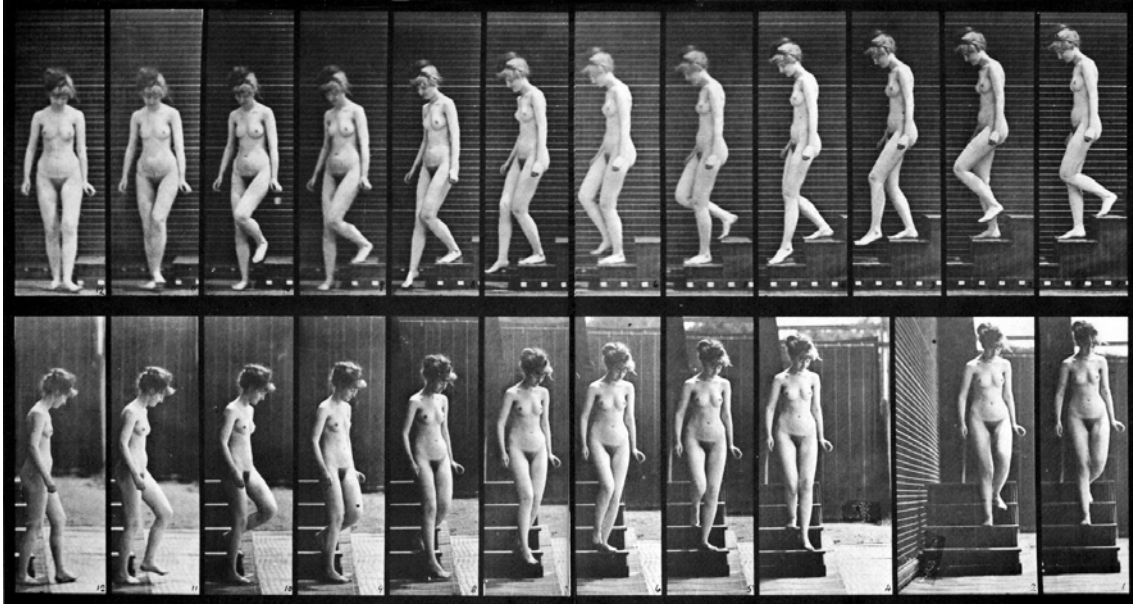


Fig. 2-7: (Arriba) Mujer bajando la escalera, Eadweard Muybridge., 1887. (Abajo Izquierda) Desnudo bajando una escalera de Marcel Duchamp, 1912. (Abajo Derecha) Fotografía de Duchamp reproduciendo el cuadro original mediante una "fotografía científica" basado en la técnica de Muybridge de Eliot Elisofon, 1952.

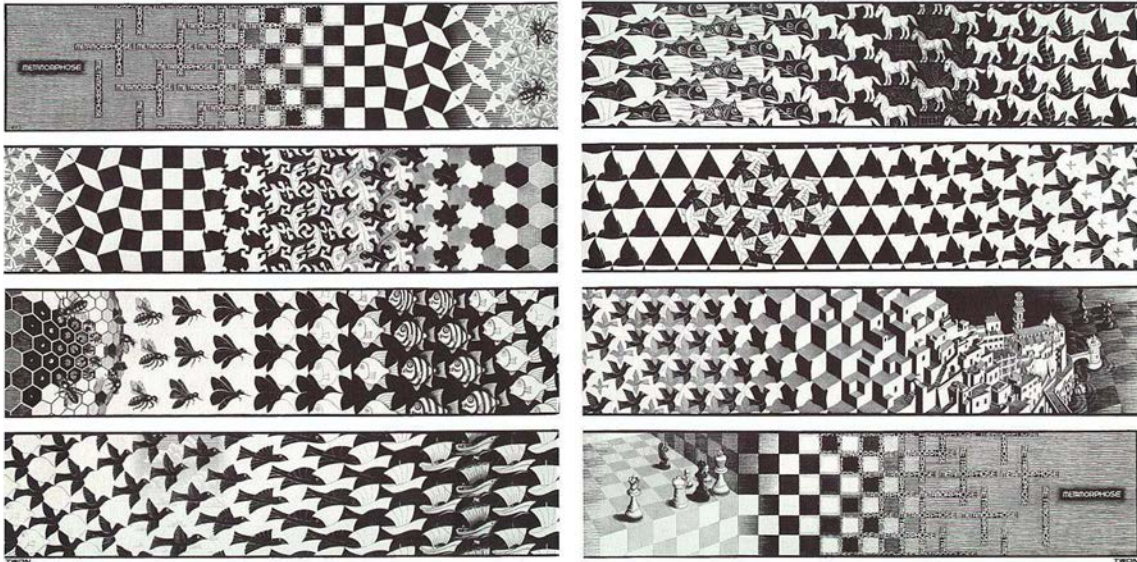


Fig. 2-8: Escher, Metamorphosis II, 1939-1940 y Metamorphosis III, 1967-1968.

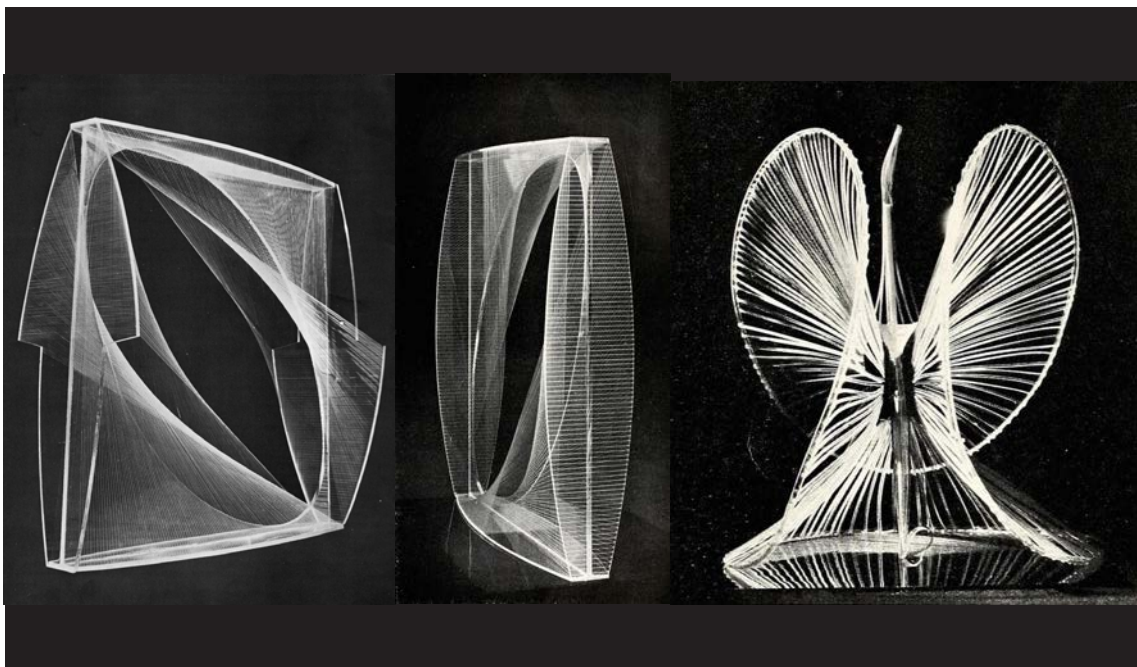


Fig. 2-9: Gabo Naum. Linear Constructions. 1942-43.

lar de una sociedad de la información estructurada en torno a relaciones, enlazadas mediante parámetros cambiantes, donde la interacción de las partes genera multiplicidades, multivalencias y complejidades en sistemas de variadas escalas.

A este respecto, una postura relevante aparece cuando el filósofo contemporáneo Manuel de Landa (2002), desarrolla conceptos en como concebimos y entendemos nuestra sociedad, basado extensamente en el trabajo del filósofo Gilles Deleuze, e intentando responder a profundos cambios detonados por avances en la tecnología, nuevas formas de conocimiento colectivo y especializado, preocupaciones medioambientales, entre otros factores. De Landa afirma que la noción predominante por más de un siglo ha estado basada en la concepción de la sociedad como un cuerpo u "organismo" como un todo indisoluble del que todos formamos parte. Esta metáfora básica ha evolucionado a una concepción basada en "Relaciones de Interioridad", donde las partes se constituyen por las relaciones dentro de una totalidad indivisible, pero esta metáfora implica que las partes separadas del todo cesan de ser lo que son, porque ser parte del todo es su propiedad constituyente. Una más reciente conceptualización se basa en torno a "Relaciones de Exterioridad"¹¹, donde la escala más pequeña de comportamiento social se encuentra contenida en "individuos singulares", o entidades que pueden presentarse de variada escala (personas, redes, organizaciones, gobiernos, ciudades, naciones, o cualquier otro componente autónomo), donde emergen relaciones entre estas partes, resultando no en un todo homogéneo, sino en una suma de singularidades que retienen sus características individuales, y poseen la capacidad de formar otras totalidades (Fig. 2-11).

El trabajo filosófico de Deleuze y De Landa, sirve de fundamento para explorar conceptos esenciales de relaciones entre singularidades y el todo, introduciendo conceptos fundamentales como pensamiento de población, topologías, **singularidades múltiples, relaciones de exterioridad, y de inteligencia de ensamblajes.**

2.3

—

PRECEDENTES EN LA COMPUTACIÓN

Con respecto a los alcances de esta investigación, uno de los argumentos más controversiales ha sido la relación entre las lógicas paramétricas y la aparición de las herramientas computacionales.

Nicholas Negroponte, arquitecto director del MediaLab en el Massachu-

¹¹ Manuel DeLanda. *A New Philosophy of Society: Assemblage Theory and Social Complexity*. London : A&C Black, 2006.

setts Institute of Technology (MIT), argumenta que la inteligencia computacional fue abordada por primera vez por Alan Turing, quien en un manuscrito de 1950 titulado "Maquinaria Informática e inteligencia", hizo una propuesta seria y sin precedentes sobre la inteligencia de las máquinas.¹² Numerosos avances en el área de la computación comienzan a gestarse a partir del trabajo de Turing, considerado por muchos el padre de la computación.

El MIT podría considerarse como uno de los centros líderes en el mundo de investigación sobre el interfaz entre el hombre-ordenador y su aplicación a la arquitectura. El trabajo revolucionario y temprano de Ivan Southerland de 1963 denominado Sketchpad (Fig. 2-12), desarrollado como disertación de PHD mediante un programa de gráficos interactivos por ordenador que incorpora principios y parámetros basados en restricciones de materiales, sistemas, y procesos, así como variaciones mediante interacción dinámica, y en la creación crítica de instancias. Según Negroponte, el trabajo de Southerland es considerado por muchos como el big bang de los gráficos por ordenador, señalando que "El Sketchpad introdujo muchos conceptos nuevos: gráficos dinámicos, simulación visual, restricciones con resolución, seguimiento del lápiz óptico, y un sistema de coordenadas prácticamente infinito, entre muchos otros.....el resultado fue de tal magnitud y repercusión que a alguno de nosotros nos llevo una década entender y apreciar todo lo que aportaba".¹³ El trabajo de Southerland es considerado por muchos como la primera manifestación del diseño paramétrico aplicado a la computación.

Durante los años siguientes, el MIT sigue con la investigación sobre la relación entre computación y arquitectura.¹⁴ En 1970 Negroponte expone de manera casi profética los principios de los programas de diseño actualmente utilizados en la arquitectura en su libro "The Architecture Machine"¹⁵. Es aquí cuando declara enfáticamente que la inteligencia digital no radica solo en la inteligencia de las máquinas, sino que también en entender la inteligencia que sustenta la arquitectura.

Al mismo tiempo, la industria aeronáutica comienza a implementar plataformas de diseño computacional desde finales de 1960 a pasos agigantados, apareciendo programas como CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) en 1977, originalmente denominado CAD/CAM CAD software por el fabricante de aviones francés "Avions" de Marcel Dassault (Fig. 2-13). Esta plataforma permitió no solo desarrollar diseños interactivos fácilmente modificables, sino imbuir criterios de inteligencia como factores externos (aerodinámicos), y a su vez conectarlos con sistemas de producción computarizados CAD/CAM. Una serie de programas computacionales similares fueron desarrollados en la industria automov-

12 Negroponte, Nicholas. *El Mundo Digital*. Barcelona : Ediciones B, 1995. P 96.

13 Ibid. P. 65.

14 Negroponte, Nicholas. *Towards a Theory of Architecture Machines*. Journal of Architectural Education, 23 (2), 1970. Pp 9-12.

15 Negroponte, Nicholas. *The Architecture Machine: Toward a More Human Environment*. The MIT Press, 1973. pp. 9-12.

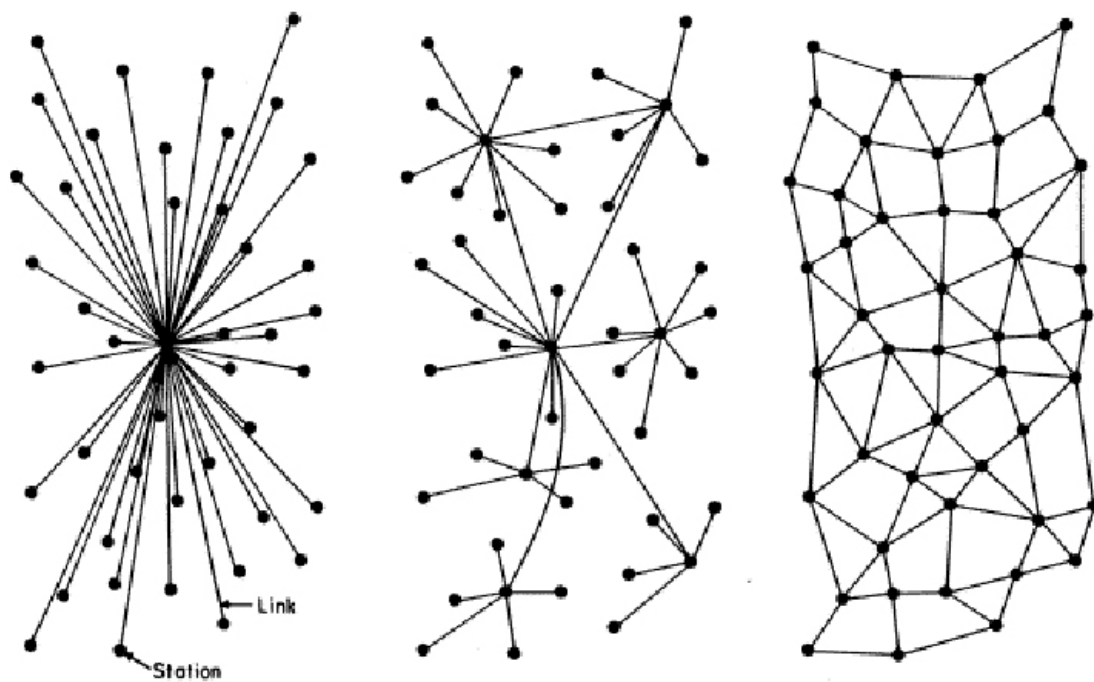


Fig. 2-10: Paul Baran, 1964, Centralized, Decentralized and Distributed Networks. Cultural & Social networks evolve.

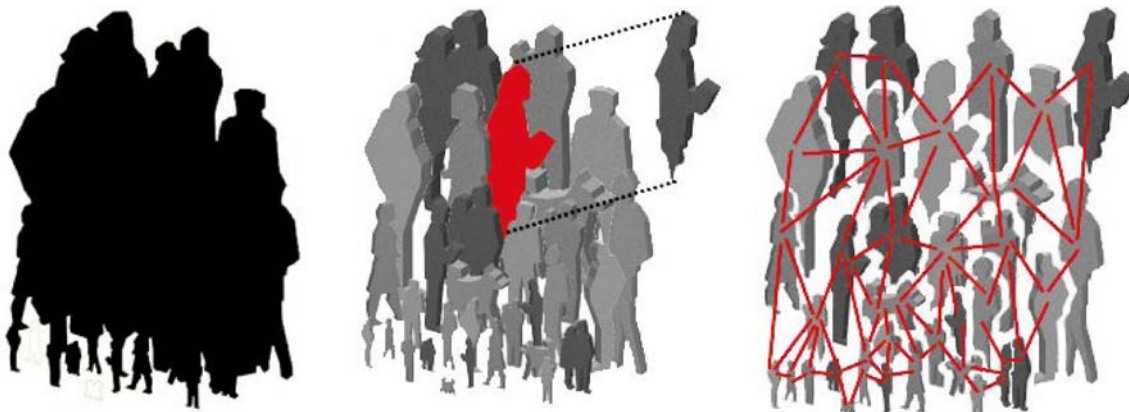


Fig. 2-11: Tres influyentes precedentes filosóficos de concepción de la sociedad según Manuel De Landa: (1) Metáfora de sociedad como un organismo, (2) Relaciones de Interioridad, y (3) Relaciones de Exterioridad.

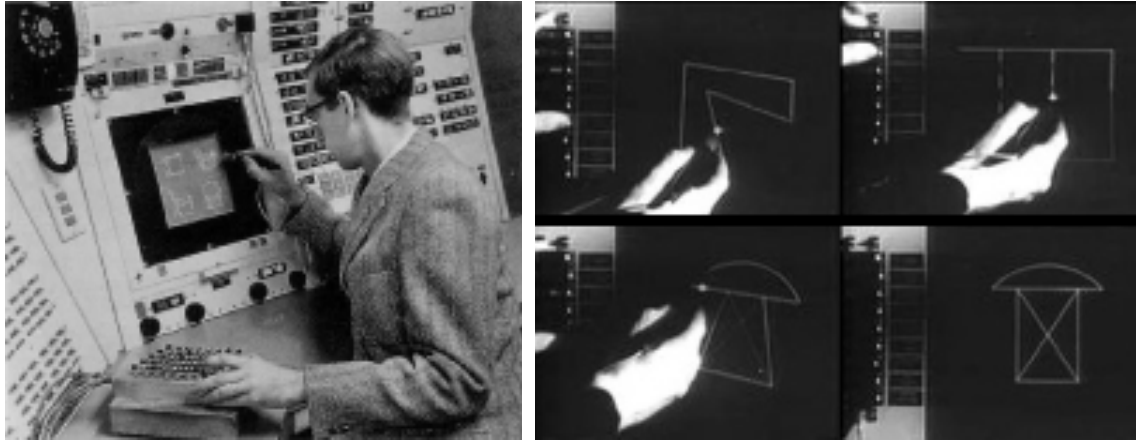


Fig 2-12 : Ivan Southerland con su Sketchpad desarrollado en 1963.

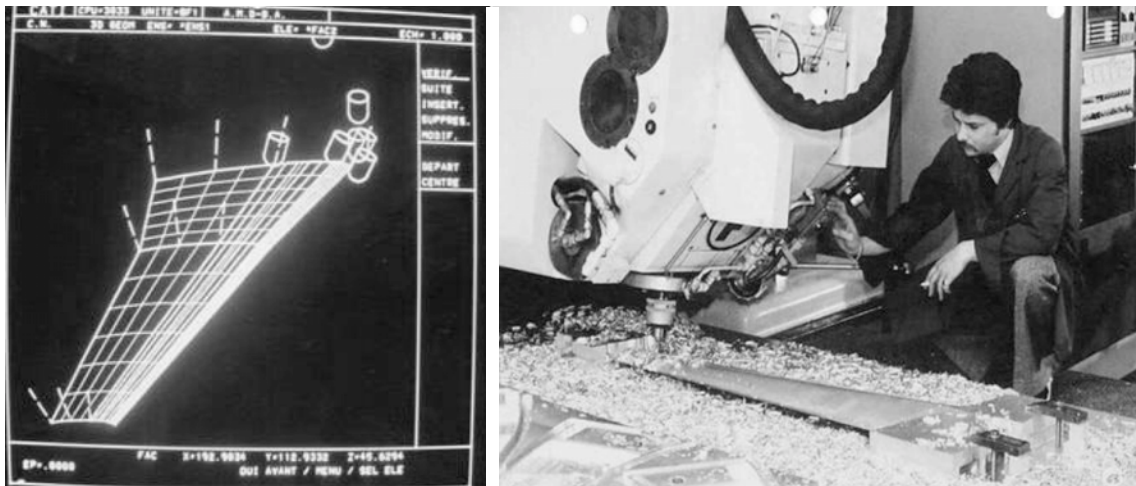


Fig 2-13 : Primera versión del programa CATIA, en 1977.

ilística, la ingeniería mecánica y el diseño industrial, como el SOLIDWORKS (3D CAM) en 1993, TOPSOLID (CAD/CAM - Computer Aided Design & Computer Aided Manufacturing) desarrollado por la compañía Missler Software a principios de 1990. En la década de los 90, la producción arquitectónica se vio fuertemente impactada por la aparición del “computer numerically controlled (CNC) processes”, redefiniendo la relación entre la arquitectura y los medios de producción.

2.4



LO DIGITAL Y LA ARQUITECTURA

Fue sin duda a finales del siglo 20 donde la relación del hombre con la maquina se diseminó a niveles nunca antes imaginados con la creación del PC o computadora personal, desarrollado por IBM en 1981. El vertiginoso avance de la tecnología facilitó un rápido desarrollo de herramientas digitales a disposición del arquitecto, donde lo digital comenzó a tomar un rol preponderante dentro del proceso del diseño, así como también en la producción y construcción arquitectónica. Desde la década de 1990, la práctica arquitectónica se ha visto fuertemente presionada por estas nuevas maneras de interfase entre el arquitecto-diseñador y la herramienta-ordenador. Estos avances en el mundo del diseño y la fabricación no tardaron en invadir la producción arquitectónica, con sofisticados programas en 3D.

Numerosas plataformas digitales paramétricas recién comenzaron a aparecer a finales de la década de 1980, con softwares como ArchiCAD (1987), 3DMax (1996), RhinoCeros (1998) with Grasshopper Plug-in (2007), Revit (2000), Generative Components (2003), Autocad (2010), y Digital Projects (2004). Es preciso aclarar que el programa Revit se llamaba “Parametric Technology Corporation” en sus inicios, actualmente distribuido por Autodesk, y es uno de los programas que esta adquiriendo un liderazgo indiscutible en ciertos círculos, por sus ventajas de proporcionar una fácil interfase, y traer imbuidos sistemas de representación y documentación estandarizadas en la industria. El desarrollo de herramientas digitales paramétricas en la arquitectura se muestra desplegado en una línea de tiempo en la Fig. 2-14.

El surgimiento de estas nuevas plataformas apunta a la utilización del BIM, o Building Information Modelling, que consiste en el diseño dinámico a través de un modelo de información del edificio en tres dimensiones, que puede tener imbuidos aspectos como localización geográfica, cantidades y tipos de componentes y materiales, entre otros aspectos. La particularidad de estas herramientas es su capacidad de trabajar con parámetros en

un sistema enlazado de relaciones, donde cambios en las partes se proliferan a través del sistema. Estos softwares de modelado están convirtiéndose sin duda en importantes protagonistas de la práctica arquitectónica actual, debido a que están modificando profundamente los procesos de diseño y de producción arquitectónica.

La utilización de herramientas digitales en la arquitectura se remonta a inicios de la década de 1990, cuando numerosos despachos se enfrentan a la problemática de que las herramientas de diseño, representación y producción disponibles en la arquitectura se hacen insuficientes para la creciente complejidad de ciertos proyectos pioneros o experimentales. Se hace necesario acudir a expertos informáticos, quienes con la ayuda de potentes herramientas de programación con algoritmos y scripting logran generar códigos para facilitar la traducción de formas complejas a un sistema geométrico y matemático coherente. Quizás el ejemplo más conocido lo desarrolla la firma Gehry & Associates, pioneros al elegir un software utilizado en la industria aeronáutica: CATIA. Este programa, basado en lógicas paramétricas, permite racionalizar formas libres, y ha posibilitado la construcción de proyectos característicos de Gehry & Assoc. Varios despachos comienzan a explorar esta agenda prioritaria, y establecen grupos de investigación internos para impulsar estas plataformas, como es el caso de el "Specialist Modelling Group" (Foster & Partners, 1997), "Gehry Technologies" (Gehry Partners, 2002), "Advanced Geometry Unit" (Arup, 2000), y "CODE" (Zaha Hadid Architects).

Aunque la mayoría de despachos tradicionales ha utilizado el ordenador como una poderosa herramienta de dibujo para generar precisa planimetría, renders, e incluso modelos en 3D, sectores más atrevidos o radicales comenzaron a utilizar el ordenador como una potente herramienta creativa de diseño hacia comienzos del siglo 21. Tal ha sido el impacto de estas herramientas digitales, que ciertos grupos de investigación especializados comienzan a diseminar su conocimiento en la academia, y en el mercado, y se comienzan a comercializar potentes softwares que facilitan la interfase entre programación, diseño y fabricación.

El diseño paramétrico ha adquirido recientemente una importancia indiscutible a través de técnicas de diseño singulares con la implementación de softwares de modelamiento BIM. Dentro del diseño paramétrico, la metodología de formulación, detección y definición de los parámetros relevantes son un requisito previo esencial para la correcta aplicación y uso de técnicas de modelamiento digital. Pero estas técnicas han revelado fuertes limitaciones. En primer lugar, la falta de referentes arquitectónicos que permitan servir de precedentes ofreciendo un rango de proyectos concretos que muestren la diseminación de esta lógica. En segundo lugar, los aspectos metodológicos sugeridos por estas herramientas aparecen ambiguos a escala arquitectónica. En tercer lugar, el proceso generativo de la forma construida a partir de la interpretación de los resultados de los softwares requiere de una experiencia considerable, y a menudo los expertos en informática incluso bien entrenados exhiben cierta incapacidad para interpretar estos parámetros, los que muchas veces requieren de un

1963, SKETCHPAD,
Ivan Southerland, MIT.



1977, CATIA,
Avions Marcel Dassault.



1981 IBM
First Personal Computer



1950

1955

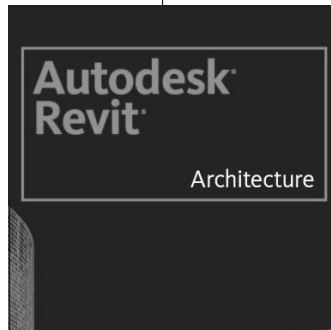
1960

1965

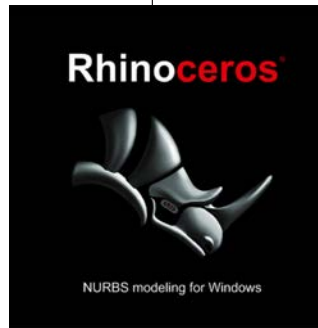
1970

1975

1980



1995, Autodesk Revit.



2000, Rhinoceros,
Rob McNeel.



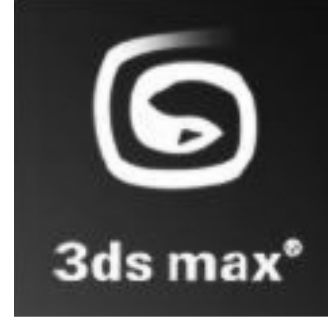
2004, Digital Project, by
Gehry Technologies.

Fig 2-14 : Softwares Parametricos desde 1950 hasta la fecha.

1985 Parametric Tech.'s Pro/Engineer software for Mech. design.

1990, Top Solid, Missler Software.

1992, 3dmax.



1985

1990

1995

2000

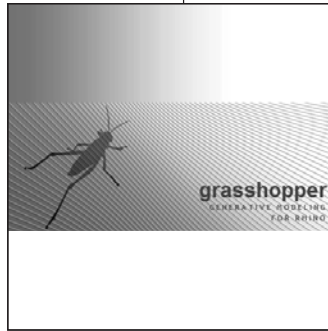
2005

2010

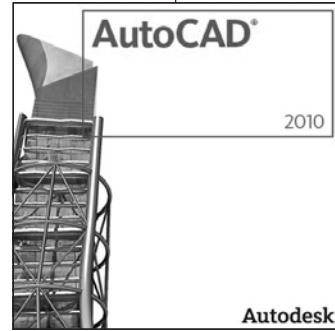
2015



2005, Generative Components, Robert Aish.



2007, Grasshopper 3D, Rhino Plugin, David Rutten & Robert McNeel & Assoc.



2010, AutoCad with parametric platform, Autodesk.



2005, ParaCloud, Eyal Nir.

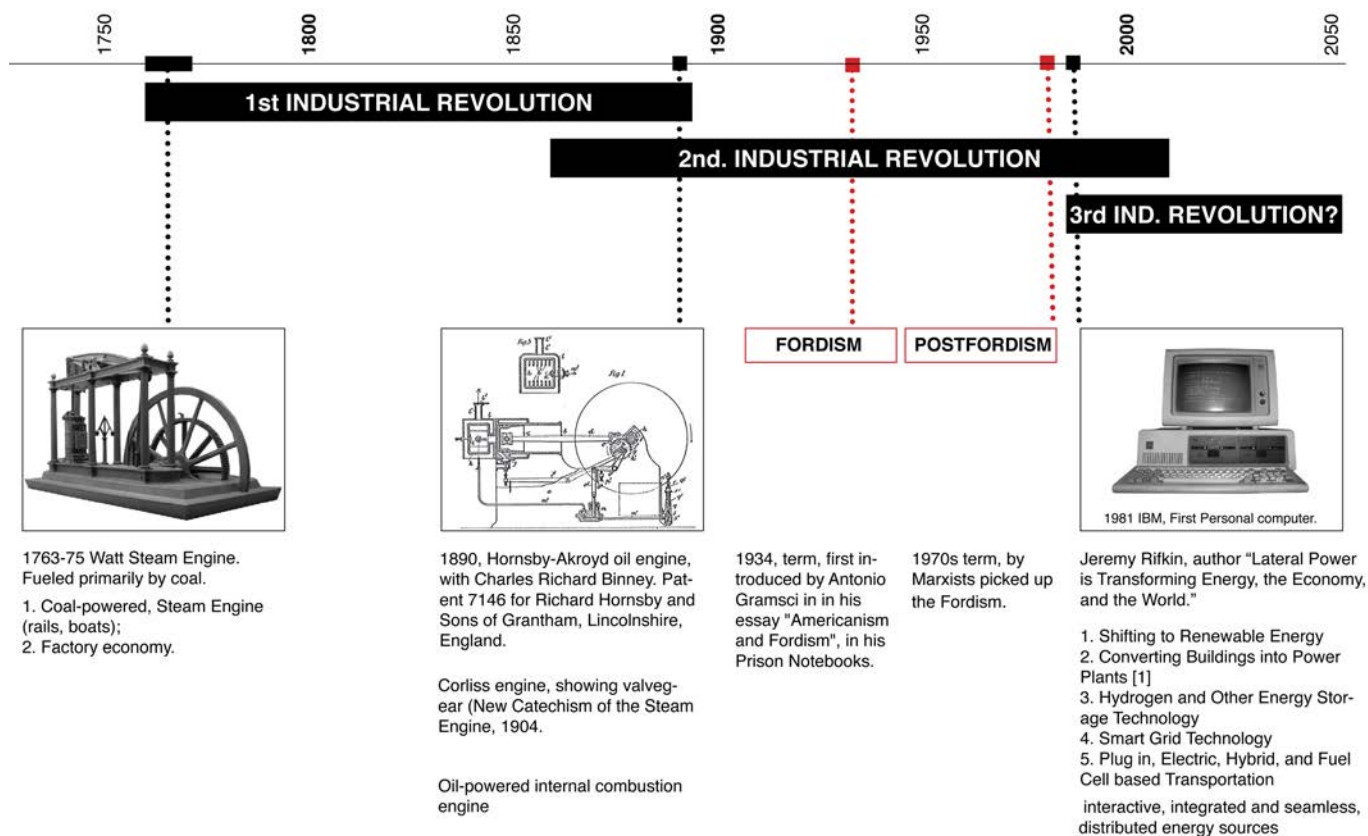


Fig. 2-15: Las revoluciones industriales impulsadas por máquinas de producción.

conocimiento disciplinar.

De manera profética, Nicholas Negroponte advierte ya en 1975 sobre el dominio de la inteligencia de las máquinas, y de su influencia sobre el futuro de la arquitectura, que ante la posibilidad de ser asistida, aumentada, o replicada por ordenadores, podría caer en manos de simple autócratas.¹⁶ Otros autores han abordado una postura crítica similar, donde se argumenta que si bien la maximización de la técnica ha introducido positivos beneficios en la administración de la producción y ha facilitado ciertos métodos en el ámbito del diseño arquitectónico, siempre y cuando el uso inteligente de la tecnología sea aplicado de manera apropiada para la tarea, en vez del peligro de usar la tecnología con el fin de producir solo imágenes sugerentes, refiriéndose a este fenómeno como "tecno-idolatría" (Thomas Maldonado citado por Kenneth Frampton, 2014).¹⁷

Otra postura, quizás más esperanzadora, es la defendida por Lewis Mumford, donde afirma mientras que la máquina puede reemplazar al hombre cuando se reduce a un autómatas, en las artes la máquina sólo puede expandir y profundizar las funciones e intuiciones originales del hombre.¹⁸

Es posible afirmar que las grandes revoluciones industriales han aparecido asociadas a máquinas de producción (Fig. 2-15). La Primera Revolución Industrial se fundaba en la aparición de la máquina de vapor a carbón, creada en 1763-75, que da origen a la mecanización de la industria textil y generaba nuevas formas de producción en las industrias. La Segunda

16 Negroponte, Nicholas. *Soft Architecture Machines*. MIT Press, 1976.

17 Kenneth Frampton Architecture Extras Interview. Arbuckle Industries, 2014. [viewed 6 September 2015]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=NzZ1VsrUyXU>

18 Mumford, Lewis. *Technique et Civilisation*. Paris: Editions du Seuil, 1950. p.343.



Fig. 2-16 : Maquinas de fabricación digital en la arquitectura: (1) Fresadora, (2) Cortadora Láser, (3) Impresora 3D, (4) Makerbooth.

Revolución Industrial se basaba en el motor de combustión a petróleo de Hornsby-Akroyd con Charles Richard Binney en 1890, lo que genera el surgimiento de líneas de montaje en cadena que caracteriza la producción en masa, denominada "Sociedad Fordista" por el impacto que Henry Ford produjo en los sistemas de industrialización. A finales del siglo pasado, el termino "Postfordismo" comienza a dominar algunas esferas de la filosofía a la luz de nuevas formas de producción emergentes con una marcada especialización y flexibilización.

Para Jeremy Rifkin, ya estaríamos inmersos en la Tercera Revolución Industrial (Rifkin, 2013), porque los avances en la inteligencia digital son tan vastos, que la interfase con la tecnología se esta volviendo cada vez mas interactiva, integrada e imperceptible, y se están implementando fuentes energéticas distribuidas.¹⁹ Este fenómeno podría definirse en 5 puntos: el cambio hacia energías renovables; el convertir edificios en plantas energéticas; el uso de hidrogeno y otras tecnologías de almacenaje energético; y el revolucionario uso de tecnología smart grid; plug in, eléctrico, hibrido, y transporte basado en fuel cell. La propuesta de Rifkin resulta intrigante, si se considera que las anteriores revoluciones industriales estuvieron fuertemente impulsadas por la creación de sistemas de producción, y aparecieron íntimamente ligadas a la aparición de nuevas tecnologías y sistemas energéticos.

A principios del siglo 21, los efectos de la inteligencia digital en todas las formas de producción humanas resultan tanto sorprendente como acelerados. La aparición de nuevas herramientas de fabricación digital permiten

¹⁹ Rifkin, Jeremy. *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World*. New York : St. Martin's Press, 2011. Pp.37.

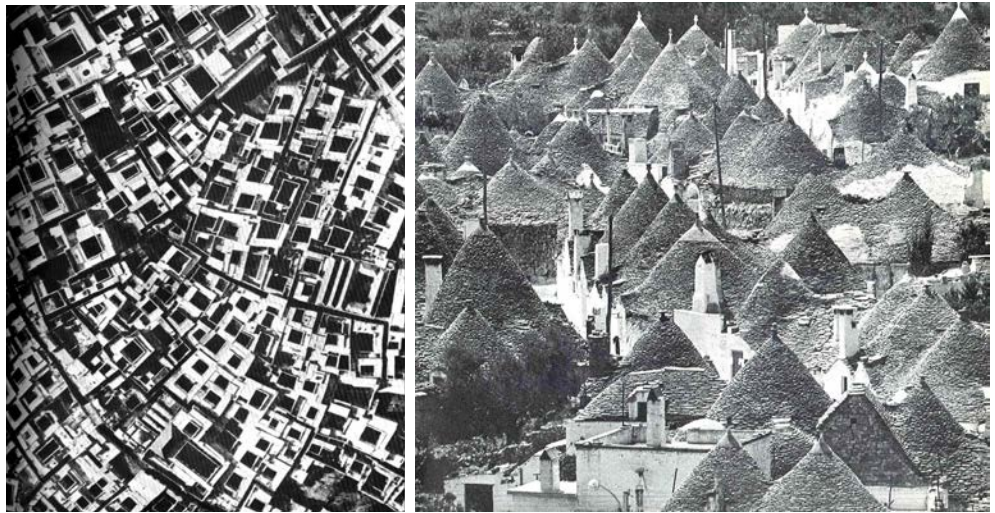


Fig. 2-17: Proyectos vernáculos con lógicas paramétricas. Marrakech (Morocco), y villorios.

nuevas formas de producción (en su mayoría automatizadas), y están detonando la aparición de un fenómeno revolucionario: el de la producción personalizada, no-estándar, no-homogénea, y no-repetitiva. En particular, nuevas máquinas comienzan a invadir la producción arquitectónica, como las cortadoras a láser, impresoras 3D, fresadoras, impresoras que imprimen impresoras, escáneres, o robots programables para desempeñar funciones específicas (Fig. 2-16).

Si bien la incorporación de nuevos sistemas de producción digital a escala arquitectónica conlleva una gran libertad para imaginar ensamblajes altamente personalizados, también imponen una serie de consideraciones y restricciones. Estos adelantos implican un profundo cambio en el conocimiento requerido para dialogar, operar y producir con estas herramientas, porque se requiere de una interfase entre las máquinas de diseño y las de producción, el que se gestiona a través de softwares paramétricos, lo que se ha denominado "from file to factory" (desde el archivo a la manufactura). Estas intensas transformaciones conllevan profundos cambios, como por ejemplo cuestionar el rol del diseñador o arquitecto, el uso y potencial de los nuevos materiales, y el profundo cambio en los sistemas constructivos y de producción, los que deben de ser cuidadosamente examinados. Se anticipa que el desarrollo de herramientas digitales continuara expandiéndose, y se hace necesario formular proyectos de investigación en esta área, porque las herramientas de diseño y producción digital han evolucionado disociadas del conocimiento arquitectónico.

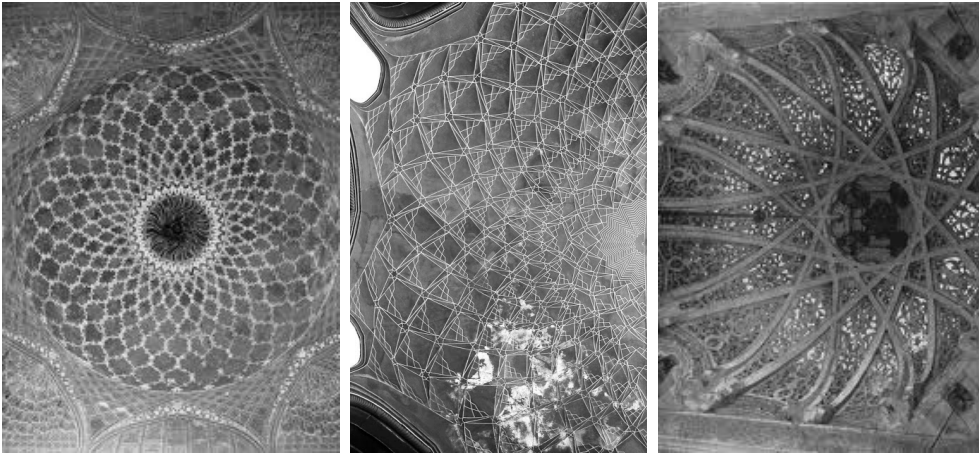


Fig. 2-18: (a) Palacio Nazarí de la Alhambra (s. XIV). Bóveda de la Sala de Dos Hermanas.
 (b) Gran Mezquita de Tremecén, Argelia (1082) Cúpula del mirhab.
 (c) El domo Mocárabe del mausoleo de Nur al-Din in Damascus (1167-68), one of the earliest muqarnas domes in Syria.

2.5



PRECEDENTES EN LA ARQUITECTURA

A partir de los principios enunciados en el capítulo anterior, indagaciones preliminares durante el desarrollo de esta tesis han constatado que existen múltiples indicios de proyectos engendrados con lógicas paramétricas en la arquitectura en diversos puntos de la historia y con diversos grados de intensidad. Sus orígenes pueden encontrarse en la noción básica de un orden regido por relaciones cambiantes entre sus partes constituyentes.

Es posible encontrar expresiones de estas lógicas en proyectos vernáculos, magistralmente expuestos en el libro "Arquitectura sin arquitectos" (Bernard Rudofsky, 1964). Estos proyectos emergen dispersos y diseminados en el tiempo, en culturas y geografías disímiles, representados con una innumerable selección de proyectos vernáculos de algunos conglomerados residenciales, entre otros notables ejemplos (Fig. 2-17).

Durante el siglo XI al XVI aparecen asombrosos ejemplos en el arte y la arquitectura Almorávide, de sistemas con cúpulas Mocárabe regidos por parámetros variables, con una exquisita y profusa decoración. Un número importante de estos ejemplos se producen en Andalucía, ejemplificados en el palacio Nazarí de la Alhambra y la Gran Mezquita de Tremecén (Fig.

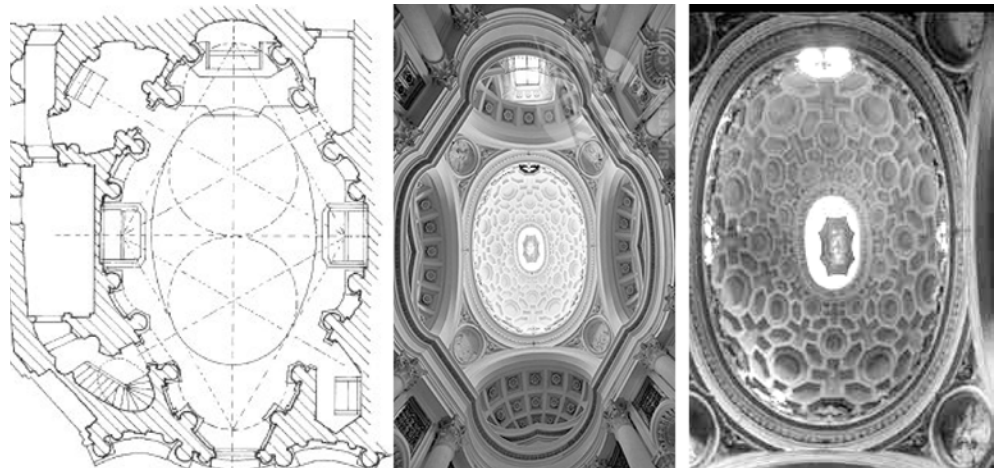


Fig. 2-19: Borromini, Interior Domo, Iglesia de San Carlo alle Quattro Fontane, 1638-41.

2-18).

Durante el gótico de los siglos XV-XVII, estas lógicas realmente cobraron una gran importancia, donde se observa una correspondencia entre forma, estructura, materialidad y sistema construido. El gótico permitió concebir la forma a partir de las fuerzas y movimiento, que se pensaron como expresión de la estructura subyacente. La geometría se basaba en la síntesis de fuerzas estructurales y estéticas. Uno de los autores que más trabajo dentro de esta línea es Antonio Gaudí, quien basado en los principios de síntesis forma-estructura, desarrolla una asombrosa obra a principios del Siglo XX. El trabajo de Gaudí se une a varios intentos de sus contemporáneos pertenecientes al modernismo catalán, como Manzanera (Masia Freixa), el celebre Gusatavino (bóvedas de ladrillo).

En la parte inicial de este estudio se han identificado una relevante cantidad de proyectos generados con estas lógicas durante el Siglo 20. Si bien estas propuestas nunca llegaron a construirse, constituyen importantes referentes para la arquitectura del último siglo, que aparecen como expresiones aisladas de la producción de su tiempo en búsqueda de una cierta libertad formal y expresiva, las que se encuentran representadas por arquitectos tan importantes como Tatlin, IM Pei o Le Corbusier (Fig. 2-20).

A pesar de estas múltiples referencias, estas expresiones en la arquitectura han permanecido escasamente estudiados, y merecen ser revisados para comprender sus principios.

Un periodo de particular interés se inicia a finales del Siglo 19, cuando numerosos arquitectos e ingenieros de vanguardia formularon proyectos sin

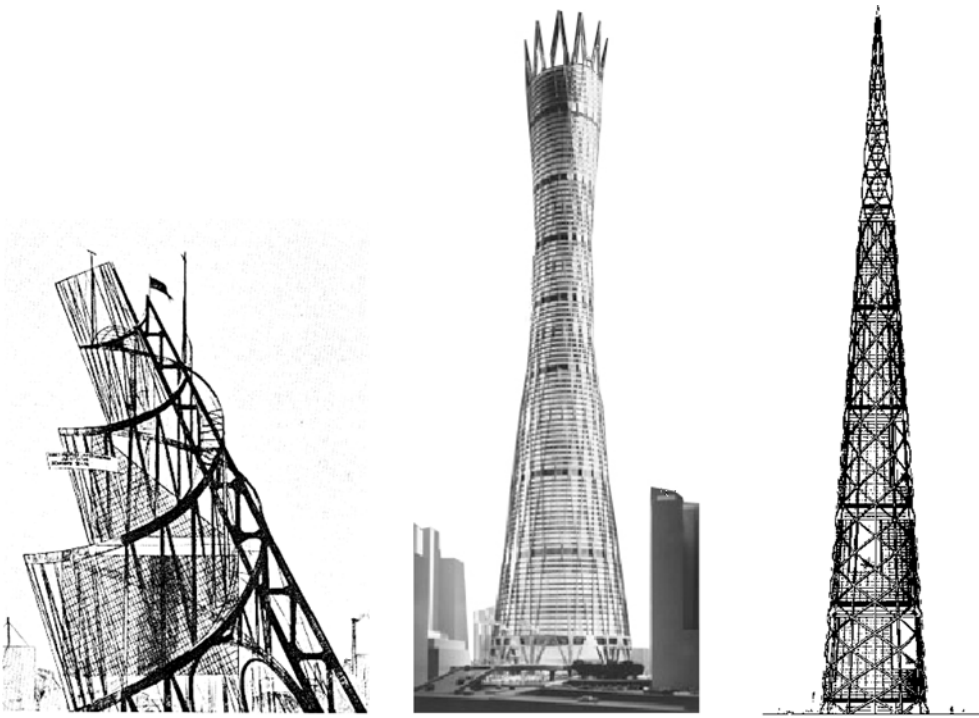


Fig. 2-20: Monument to the 3th. International, Vladimir Tatlin, 1920. Office Tower at Grand Central, IM Pei, New York, 1956. Millenium Tower, Foster & Partners, 1989.

precedentes para su época, recurriendo a un repertorio formal inusitado en búsqueda de conceptos arquitectónicos vanguardistas, al margen del discurso arquitectónico predominante de su tiempo, y surgen estrechamente asociados a pioneros procesos de innovación. Gran parte de estas obras resultan paradigmáticas en la historia de la arquitectura por su fuerte contenido innovador, por los asombrosos avances en aspectos constructivos, estructurales y formales, y por su inexplicable diseminación en diversos lugares y culturas.

Al confrontar los proyectos desarrollados durante el Siglo XX con algunos proyectos recientes, se observa que a pesar de estar alejados por casi 100 años, es posible afirmar que muchos trabajan con estrategias formales, estructurales, y constructivas similares entre si (Fig, 2-21 a 2-24). Sin embargo, a pesar de su fundamental contribución al conocimiento arquitectónico, estos proyectos han sido escasamente estudiados como un fenómeno interrelacionado, y este legado se encuentra actualmente ausente o vagamente posicionada dentro del conocimiento arquitectónico.

Por que continuaran apareciendo proyectos similares en la arquitectura de manera recurrente? Podrían ser estudiados en su conjunto como un fenómeno interrelacionado? Existe relación entre la innovación y forma, estructura, materiales, y sistemas constructivos?

Expuestos algunos de los numerosos precedentes en varias disciplinas, y en la arquitectura en particular, en el próximo capítulo se precederá a estudiar proyectos específicos durante el Siglo XX, para intentar extraer ciertas lógicas y metodologías relativas a la practica arquitectónica, tanto en sus dimensiones teóricas como prácticas.

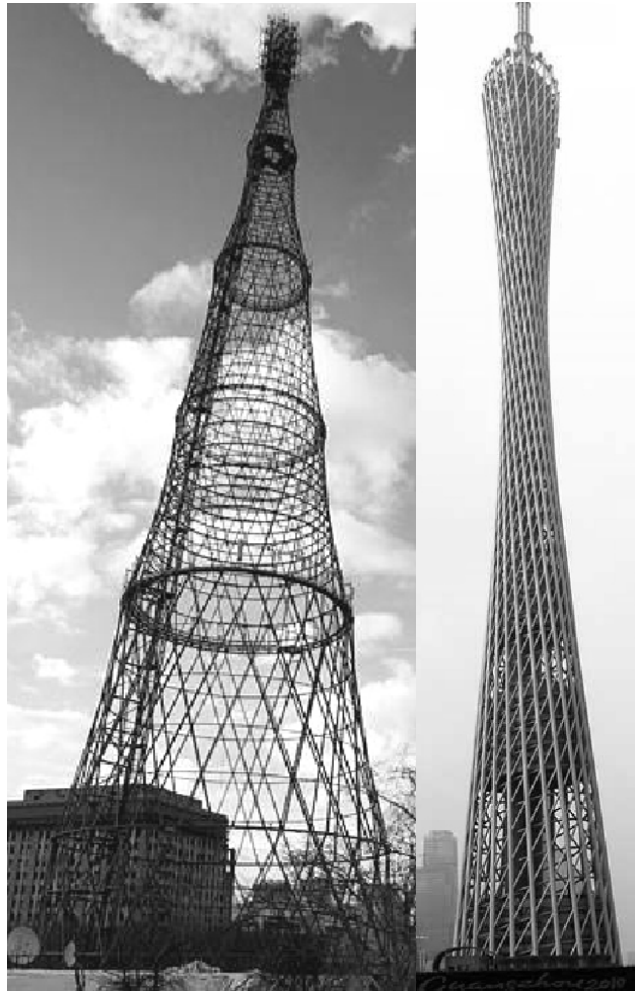


Fig. 2-21: (Izquierda) Shukov or Shabolovka Radio Tower, 160m high hyperbolic structure, Russia, 1922.
 (Derecha) Canton TV Tower, Guangzhou, China, Mark Hemel/ Barbara Kuit (IBA) arch, Arup (eng.), 610m, 2010.



Fig. 2-22: (Superior) Taut Glass Pavilion, Cologne, Germany, Bruno Taut, 1914 .
 (Inferior) Swiss Re Headquarters, Londres, Foster & Partners, 1997-2004.

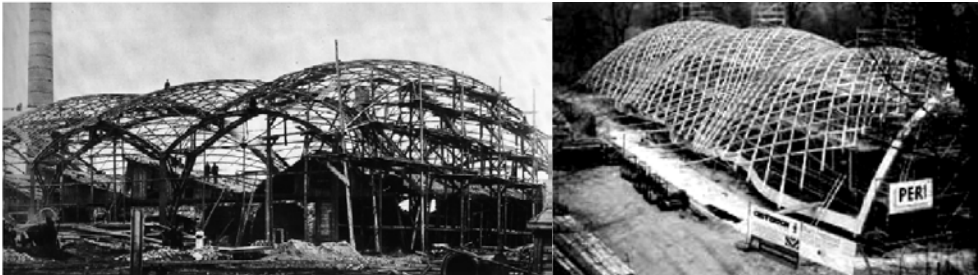


Fig. 2-23: (Izquierda) 1a. celosía de doble curvatura metálica, Vyksa , Vladimir Shukhov, 1897.
(Derecha) Weald and Downland Gridshell, 1a. celosía de doble curvatura metálica Singleton, UK. Edwars Cullinan, 2001.

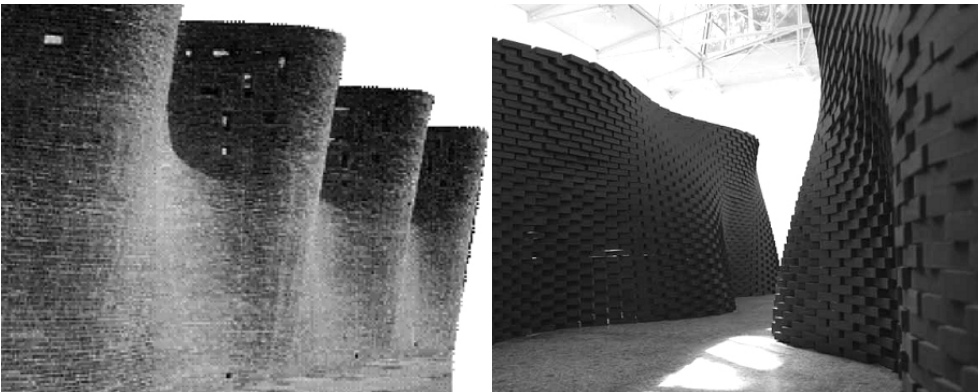


Fig. 2-24: (Izquierda) Eladio Dieste, Iglesia, 1958.
(Derecha) Switzerland Biennal Pavillion, Venice, Gremazio Kohler, 2008.

CAPITULO 3

PROYECTOS DE INNOVACION EN EL SIGLO XX



CONSTRUYENDO REFERENTES

El diseño paramétrico ha adquirido recientemente una importancia indiscutible a través de técnicas de diseño singulares con la implementación de softwares de modelamiento BIM. Dentro del diseño paramétrico, la metodología de formulación, detección y definición de los parámetros relevantes son un requisito previo esencial para la correcta aplicación y uso de técnicas de modelamiento digital. Pero estas técnicas han revelado fuertes limitaciones. En primer lugar, la falta de referentes arquitectónicos que permitan servir de precedentes ofreciendo un rango de proyectos concretos que muestren la diseminación de esta lógica. En segundo lugar, los aspectos metodológicos sugeridos por estas herramientas aparecen ambiguos a escala arquitectónica. En tercer lugar, el proceso generativo de la forma construida a partir de la interpretación de los resultados de los softwares requiere de una experiencia considerable, y a menudo los expertos en informática incluso bien entrenados exhiben cierta incapacidad para interpretar estos parámetros, los que muchas veces requieren de un conocimiento disciplinar.

Para subsanar algunas de estas limitaciones, este capítulo intenta identificar las obras arquitectónicas relevantes a lo largo del Siglo 20, con el objetivo de generar un catalogo de referentes arquitectónicos, con el fin de estudiar y enunciar las lógicas generativas. A partir de la identificación de sus elementos básicos y de las relaciones constituyentes entre ellos, se determina una cierta metodología y proceso deductivo de generación de la forma construida en cada proyecto. Estos procesos serán estudiados en su conjunto en los próximos capítulos de esta tesis.

Para este estudio se han seleccionado proyectos que cumplen con los siguientes criterios:

- Proyectos desarrollados durante el siglo XX, antes de la aparición de herramientas digitales, específicamente entre los años 1890 y 1980. Este criterio se basa en el postulado que a fines del siglo XIX se implementan numerosas soluciones tecnológicas que permite la aparición de proyectos altamente innovadores.
- Haber sido proyectos construidos, debido a que deben incorporarse criterios específicos en la implementación de sistemas constructivos, estructurales y de materialidad que no están siempre presentes en proyectos no construidos;
- Proyectos que albergan a programas a escala arquitectónica, excluyendo a proyectos de infraestructura, de escala urbana, o vernáculos, los cuales requieren metodologías de estudios específicas;
- Se priorizan proyectos que se encuentren apropiadamente documentados, o que puedan ser analizados o reconstruidos mediante

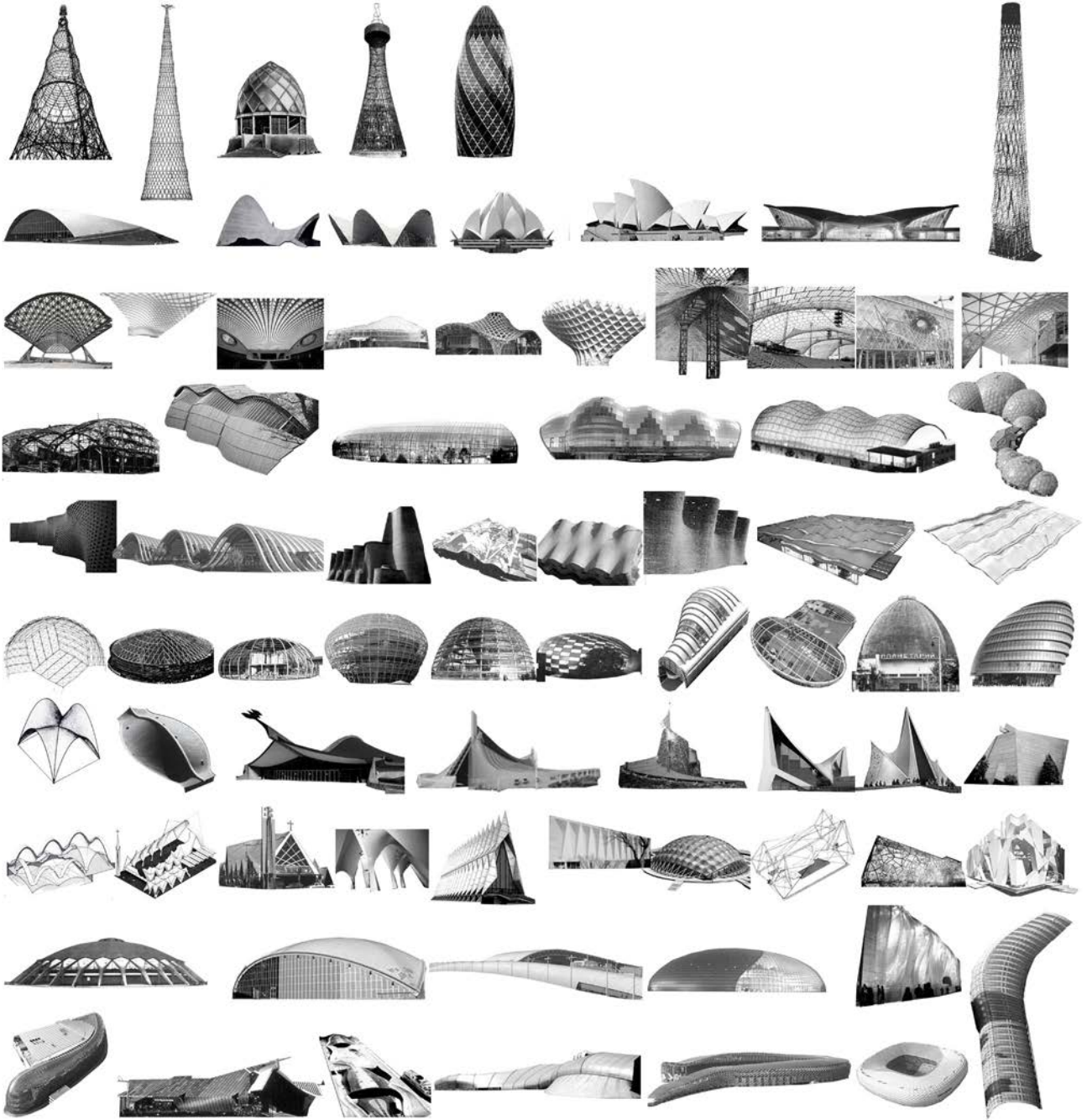


Fig. 3-0-1: (Arriba) Proyectos identificados en una primera aproximación, desde 1890 hasta la actualidad. (Abajo) Proyectos identificados por teóricos relevantes (Giedion, Banham, Frampton).

herramientas computacionales actuales;

- Proyectos que exhiban cierto grado del uso de lógicas paramétricas en su formulación geométrica, constructiva, y estructural. La selección de proyectos depende de la presencia de ciertos principios o lógicas, las que serán desglosados y analizados en detalle:
- Configuración formal asociada a una geometría singular;
- Presencia de un modulo base claramente identificable, que se propaga a un ensamblaje mayor, exhibiendo variaciones dimensionales y geométricas;
- Existencia de miembros y conectores con condiciones cambiantes y adaptables, todos de ellos conformando un sistema interrelacionado formal, estructural y constructivo.

Una aproximación inicial permite constatar numerosos proyectos que presentan estas lógicas durante el Siglo 20, manifestándose desde finales del siglo 19 hasta la actualidad. El siguiente gráfico representa mas de 100 proyectos seleccionados construidos (Fig. 3-0-1). Se organizan estos proyectos en una secuencia cronológica, para detectar la cantidad, frecuencia e intensidad a lo largo del Siglo 20. En una primera aproximación, se detecta de que los proyectos comienzan a aparecen desde 1890 hasta la actualidad (Fig.3-0-2).

Sin embargo, se propone estudiar solamente los proyectos construidos a partir de 1890, hasta antes de la irrupción de las nuevas tecnologías informáticas (1980), al revelarse el interés y la calidad en la producción arquitectónica de los proyectos. Para ello, se detectan los proyectos que han sido identificados por relevantes historiadores y teóricos: Giedion , Banham, y Frampton.

Se identifican mas de 40 proyectos (Fig. 3-0-2), organizados según localización (Fig. 3-0-3), y en detalle año, autor, nombre. Cada proyecto es documentado con una ficha descriptiva (Año, Autor, Nombre, Ubicación), planimetría básica (Plano situación, plantas, elevaciones, cortes, detalles constructivos). Luego se procede a la formulación de modelo 3D utilizando el programa Rhinoceros 5 para Windows, con plug-in Grasshopper; y la verificación de modelos 3D.

Luego el análisis de proyectos con metodología para extraer las lógicas predominantes: las matemáticas, los modelos físicos, y ciertos aspectos constructivos. El análisis matemático determina la geometría base a partir del enunciado de formulas matemáticas precisas y sus parámetros. Los modelos digitales utilizan el software Grasshopper para Rhino. Los aspectos constructivos con secuencias de fabricación o manufactura de sus partes, ensamblaje y montaje, con sistemas de partes permite identificar elementos y sus relaciones; la identificación de parámetro de subdivisión base. La generación de proyectos conlleva la subdivisión de superficies mediante ordenes específicos (superficies regladas, entramados, ejes, retículas); para detectar los elementos base: miembros, y sus variantes (min.,máx.). Se estudia la conexión nodal para determinar la conexión como elemento que define los limites o constreñimientos (ángulos, soporte, sujeción, ensamblaje, materialidad), y a su vez proporciona el método de ensamblaje constructivo.

Los resultados en el conjunto de proyectos se agrupan en familias matemáticas y geométricas; en modelos de simulación (físicos y digitales); y en sistemas constructivos.

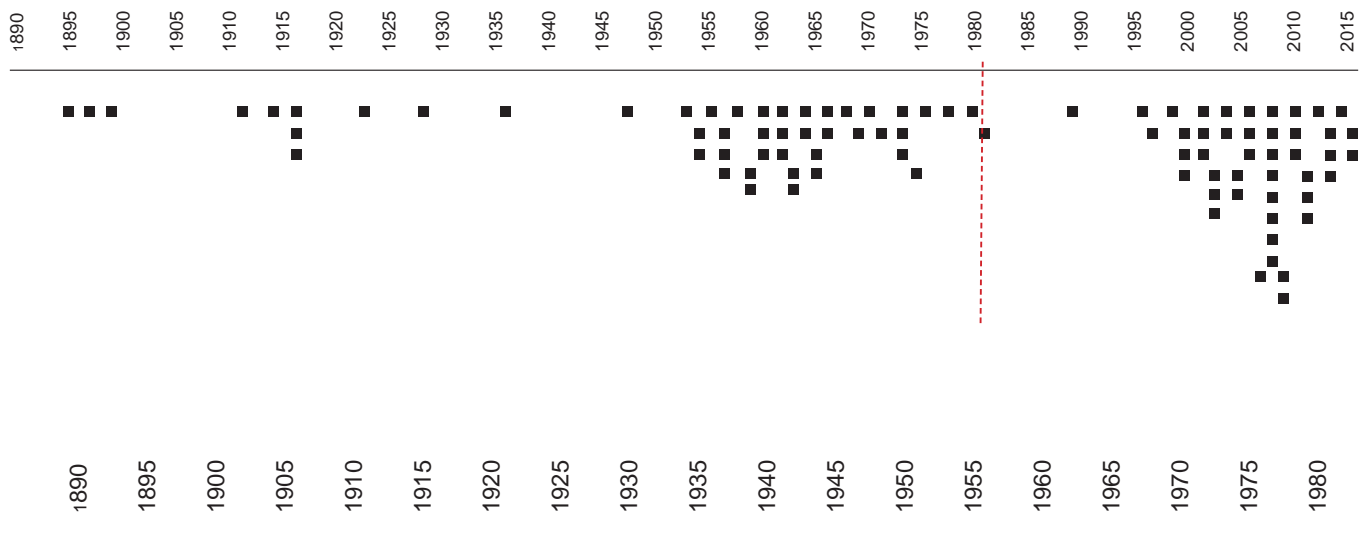


Fig. 3-0-2: Proyectos seleccionados en orden cronológico. (Izquierda): Proyectos preselccionados en 1a. etapa. (Derecha): Proyectos seleccionados en 2a. etapa.

La documentación de proyectos se realiza siguiendo una secuencia:

La recopilación de antecedentes de cada proyecto (planimetría, detalles, fotografías, etc.), que proporcionen la información que permitan reconstruir los proyectos de manera digital (Fig.2-8). Los proyectos seleccionados fueron compilados en fichas de trabajo, que forman parte del anexo gráfico de la tesis doctoral. Este documento presenta una lectura coherente y cierta consistencia gráfica, al estandarizar el procesamiento de la información, lo que permite traducir la información a un modo de representación común, para alejarse de la subjetividad que podría conllevar el uso de diversas fuentes de publicación. La reconstrucción digital utilizando plataformas digitales actuales paramétricas permitió establecer tres ámbitos fundamentales a considerar:

- Matemáticas: Para iniciar un modelo paramétrico, se requiere formular los algoritmos matemáticos que definen la forma, así como enunciar sus parámetros precisos;
- Resistencia: A continuación se verifica el uso de modelos físicos en cada proyecto, y se producen modelos de simulación estructurales a partir del modelo en 3D;
- Modelo constructivo: Finalmente, se identifican los parámetros constructivos en términos de elementos, detalles parametrizados, y ensamblaje.

Basados en la documentación y reconstrucción de proyectos, se verifica la existencia de lógicas previamente definidas.

Este proceso intenta demostrar que los proyectos pueden ser estudiados fácilmente mediante plataformas digitales actuales, las que permiten la

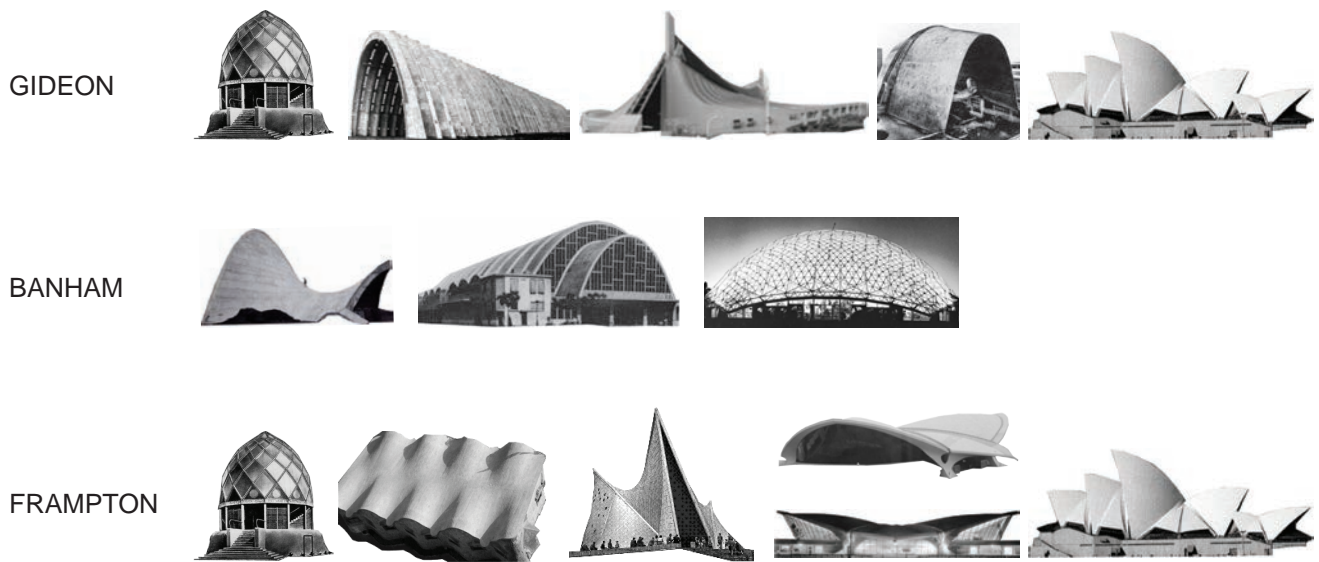


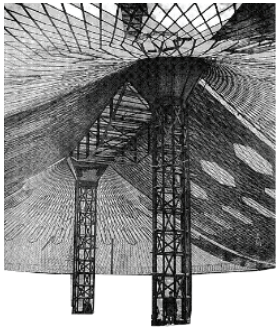
Fig. 3-0-3: Proyectos identificados por teóricos relevantes (Giedion, Banham, Frampton).

identificación de parámetros fundamentales en la determinación de su morfología. Se demuestran también los procesos metodológicos necesarios para el establecimiento de una secuencia de trabajo precisa para su definición y desarrollo. El objetivo de este ejercicio es dar a conocer lógicas inherentes a cada proyecto, que servirá de guía para aquellos interesados en trabajar dentro de estos principios.

En el siguiente segmento de este capítulo se exploran estas tres fases metodológicas del diseño paramétrico: 1) Espacio matemático; 2) Forma resistente; y 3) Ensamblajes constructivos.



PROYECTOS SELECCIONADOS



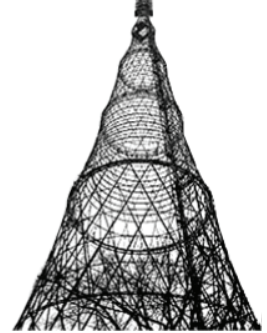
1
1895
Shukhov
?
1st. tensile steel gridshell
Nizhny Novgorod



2
1911
Vladimir Shukov
Faro di Adziogol (68 m)
Adziogol, Ucraina.



3
1897
Vladimir Shukhov
1st double curvature lat-
tice steel shell,
Vyksa, Russia.



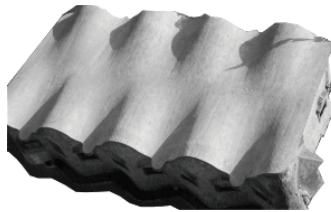
4
1922
Shukov
Shabolovka Radio Tower,
Moscow, Russia.



5
1914
Bruno Taut
Glass Pavillion
Alemania



6
1916
Freysinet
Airship Hangar
Orly, Francia.



7
1916
Gaudi
Iglesia de la Sgda. Flia.
Barcelona, España.

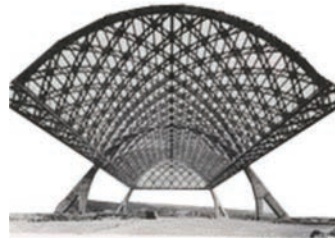


8
1922-23
Dyckerhoff y Widmann
Walther Bauersfeld
Zeiss I
Jena (Alemania).



9

1929
E. Maigrot (A) /
E. Freyssinet (E), C.
Limousin (E).
Halles du Boulingrin
Reims, France.



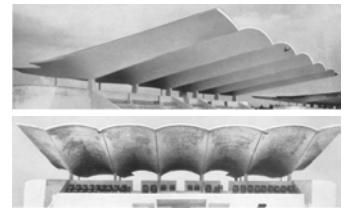
10

1935
Nervi
Air Force Hangar
Orvieto, Italia



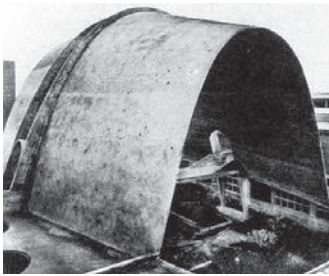
11

1933
Manuel Sánchez Arcas
Eduardo Torroja y Miret
Algeciras Market Hall
Algeciras, España.



12

1935
E. Torroja.
Hipódromo de Madrid
Madrid, España.



13

1939
Robert Maillart/Hans
Leuzinger
Pavilion Exposition Natio-
nale. Zurich, Switzerland.



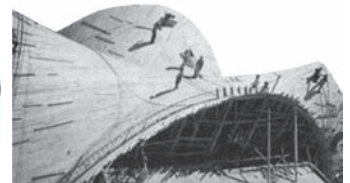
14

1952
Fuller
Geodesic Dome
Several Locations



15

1953
Saarinen
Kresge Auditorio
Cambridge, Mass.



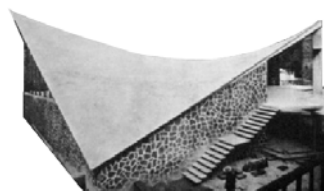
16

1955
Candela
Bolsa de Valores
Mexico



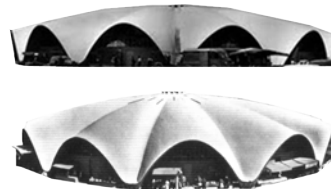
17

1954-55
R.E.Camelot, J. de Mailly, B.
Zehrfuss
J. Prouvé (ext), N.Esquillan,
Nervi (consultant).
CNIT
Paris, France.



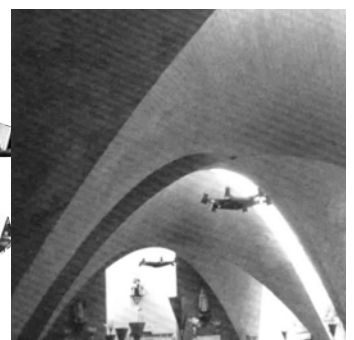
18

1955
E de la Mora y Palomar,
Fernandez López Carmona,
F Candela,
Capilla Nuestra Señora de
la Soledad
Churubusco, Mexico City



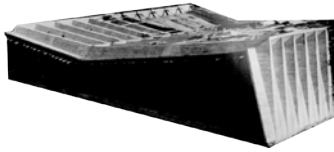
19

1955
Louis Simon & André
Morisseau.
Royan Market, France.



20

1956
Felix Candela
Iglesia San Antonio de
las Huertas,
Tacaba, Mexico.



21

1953-8
PL Nervi, M Bruer, B
Zehrfuss.
Auditorio Sede Unesco
Paris.



22

1958
Eero Saarinen, Douglas Orr
(Assoc. A).
Severud-Elstad-Krueger,
(E)
Ingalls Ice Arena
Yale, USA.



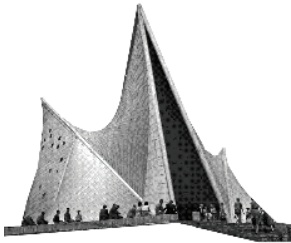
23

1960
M. Piacentini (A),
Pier Luigi Nervi (E)
Palazzo dello Sport
Rome, Italy.



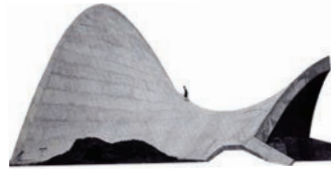
24

1958
Candela
Manantiales
Mexico



25

1958
Xenakis, Le Corbusier
Phillip Pavilion
Brussels, Belgium.



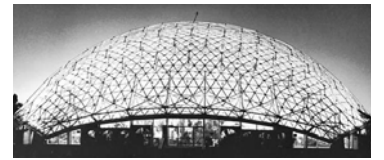
26

1958
Candela
Iglesia
Cuernavaca, Mexico.



27

1960
Dieste
Iglesia de la Atlantica
Uruguay



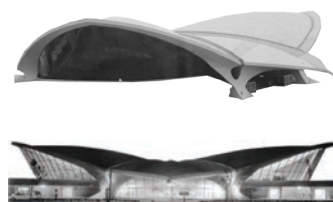
28

1960
Murphy & Mackey (A),
P.Londe; Marshall, Tyler,
Rausch LLC; Morgan & As-
soc.; Ross & Baruzzini Inc.
(renovation)
Climatron



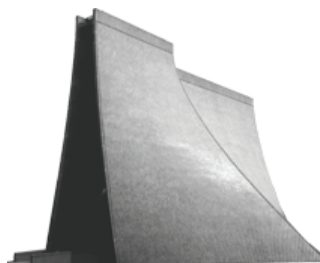
29

1961
Nervi Bruer
St. John Abbey



30

1958-62
Saarinen
TWA Terminal
New York, USA.



31

1963
I.M.Pei
Luce Chapel



32

1963
Tange
St. Mary's Cathedral
Tokyo, Japan.



33

1963
Iglesia Bremen-
Grolland Schroeck-St
Lukas



34

1979
Heinz Isler
Heimberg Tennis Center
Switzerland



35

1970
Niemeyer
Catedral Brasilia
Brasilia, Brazil.



36

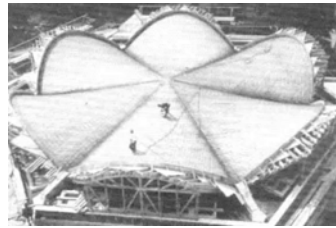
1967
Fuller
Expo 67
Montreal, Canada.



37

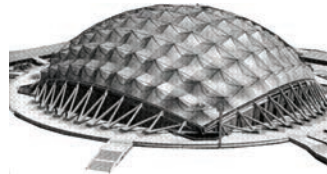
1967
Marcel Bruer

St. Francis de Sales
Muskegon, MI.



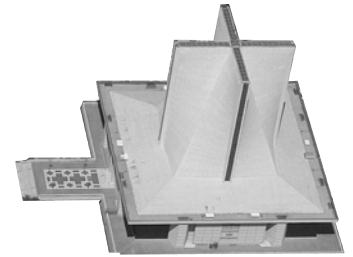
38

1962-4
Biblioteca Universidad de
Basilea
Heinz Hosdorf
Basilea, Suiza.



39

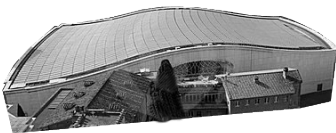
1968
Candela
Palacio de Deporte
Mexico City



40

1971
Nervi

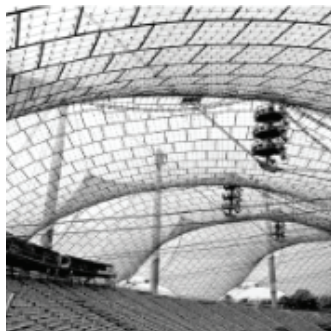
Saint Mary's Cathedral
San Francisco, USA.



41

1964-71
Nervi

Audience Hall
Vatican City, Italy.



42

1972
Otto Olympic Stadium
Munich
Frei Otto, G



43

1957-73
Utzon
Sydney Opera House
Sydney, Australia.



44

1975-8
Eladio Dieste
Caryl Horizontal Silo

ESPACIO MATEMÁTICO

Debido a su naturaleza de objeto físico que adquiere una forma en el espacio, la obra arquitectónica ha recurrido continuamente a las matemáticas como una ciencia robusta desde donde apoyar su formulación y su desarrollo.

Un caso singular se comienza a desarrollar a finales del Siglo 19, cuando surgen formas previamente inexploradas en la arquitectura, como las representadas por las superficies con curvaturas que comúnmente se denominan “geometrías no-euclidianas”. Para su implementación, se ha detectado el uso y aplicación de ciertas estrategias matemáticas que fueron altamente determinantes para engendrar ciertas formas. Si bien la traslación desde el ámbito de las matemáticas a la arquitectónica se ha manifestado con notables aciertos, también han presentado ciertas resistencias, inconsistencias, e incongruencias. Este fenómeno ha sido escasamente estudiado dentro del conocimiento disciplinar.

Ante este fenómeno cabe preguntarse: ¿Por qué se han utilizado estas formas?, ¿Cómo se han formulado? ¿Qué instrumentos de cálculo se han implementado?, ¿Cuáles fueron las formulas matemáticas mas recurrentes?, ¿Como se establecen sus parámetros?, ¿Se requiere un conocimiento matemático altamente sofisticado para su implementación?

Para intentar responder a algunas de estas preguntas, este capítulo investiga el uso de las matemáticas durante el Siglo 20. Se comienza por abordar definiciones fundamentales referentes a la geometría euclidiana y no euclidiana, expandiendo a nociones de geometría esférica, trigonometría, y conceptos de formulaciones implícitas, explícitas y paramétricas. Se formulara un marco de análisis desde una formulación paramétrica a los proyectos.

Se exploran también la importante relación entre arquitectura y matemáticas, enunciando la importante relación entre superficies con curvatura las implicaciones en el ámbito arquitectónico.

Se propone un modelo de análisis de los proyectos seleccionados que comienza por una agrupación según familias geométricas. A continuación, se identifican las formulas matemáticas mas apropiadas para su formulación, evaluándose diversos mecanismos para deducir la forma geométrica, comparando el método de deducción algorítmica original propuesto por el autor (de estar disponible), con la aplicación de formulas alternativas acorde al objeto construido. Se enuncian los algoritmos mas adecuados para cada caso utilizando softwares actuales (Script in LISP y Grasshopper for Rhino), y se completa la reconstrucción digital de cada proyecto en 3D mediante un modelo íntegramente paramétrico, identificando las lógicas geométricas y matemáticas que los sustentan, así como los parámetros base con sus intervalos.

Este proceso de análisis no pretende generar una detallada descripción de cada proyecto, la que se encuentra fuertemente limitada por la documentación disponible, y claramente restringida por el conocimiento en la temática de la autora. Solo se intenta trabajar con un método deductivo preciso que intenta extraer algunas lógicas subyacentes, al plantear una aproximación y un método de representación de los principios geométricos y matemáticos predominantes. Esta aproximación podría proporcionar valiosos antecedentes sobre los criterios matemáticos que sustentan cada proyecto, pudiendo develar las relaciones más críticas, con el objetivo de extraer lógicas, metodologías, y procesos.

Se concluye este capítulo con una mirada más general, agrupando algunos proyectos similares acorde a familias geométricas, fórmulas matemáticas, y desglosando sus parámetros base. Finalmente, se indagan las razones que motivaron a la exploración de ciertas geometrías singulares, y se valora si el uso de ciertas fórmulas matemáticas han facilitado su generación, evaluándose en que grado ha predeterminado la resolución formal de cada proyecto. También se explora si el uso de ciertas familias obedece a ventajas que exhiben con respecto a otras geometrías, como quizás una facilidad de ser construidas con reducidos instrumentos, o por formular una lógica subyacente que se implementa a lo largo de sucesivas etapas del proyecto, o por contener algunos beneficios inherentes a su organización que posibilitan su aplicación a escala arquitectónica.

3.1.1

GEO_METRIA

“Cum divina tua mens et numen, imperator Caesar, imperio potiretur orbis terrarum” ...L.I-Prefacio.

“Cuando tu voluntad y tu inteligencia divinas, César Emperador, te hicieron dueño del imperio del “círculo de la tierra”...”¹

Uno de los pilares del conocimiento humano lo constituyen las matemáticas, que han sido utilizadas históricamente para entender fenómenos de un universo complejo y variado. De particular interés para la arquitectura es la rama de las matemáticas denominada geometría, cuyo término proveniente del latín geometría, y este del griego γεωμετρία geometría, de γεω ggeo, ‘tierra’, y μετρία metría, ‘medida’ en la generación de figuras geométricas. Si la geometría se ocupaba de medir la tierra, la geografía se ocupa de describirla y de dibujarla.

La geometría entendida como la ciencia que estudia la medida de la tierra o el “Geos”, ha sido objeto de numerosos estudios desde la antigüedad, y la evolución en su entendimiento continúa sorprendiendo a la ciencia. Numerosos matemáticos han investigado el rol de la geometría en la generación de formas a partir del espacio euclidiano, representada en el espacio

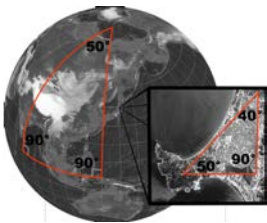
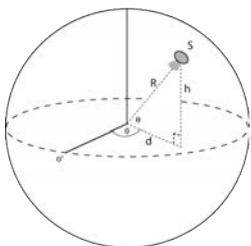


Fig. 3-1-1:
(1) Geometría Euclidiana vs. No-Euclidiana.



(2) Geometría Esférica. Método de determinación de un punto en la superficie de la esfera mediante Geometría Euclidiana, donde S (point), θ (geographic) latitude, φ longitude, R radius, d axial distance, formula $d = R \cos \theta$ and $h = R \sin \theta$.

¹ Vitruvi Pol-lió, Marc. *Los Diez Libros de Architectura*. Toledo: Antonio Pareja, 1999.

Cartesiano por las coordenadas en los ejes x,y,z.

Históricamente la geometría euclidiana ha servido de base para la formulación de proyectos arquitectónicos, en particular en el uso de sólidos platónicos que datan del siglo II BC. Con el paso del tiempo, estas formas pasaron a ser estudiadas mediante la geometría analítica, fundados en el cálculo mediante simples algoritmos matemáticos. Aunque la Geometría Euclidiana establece postulados que resultan válidos para superficies de curvatura cero, estos postulados excluyen a superficies con curvatura, como lo representa la familia de las cuádricas (a excepción del cono y el cilindro). Este grupo de geometrías no cumplen el 5º postulado de Euclides, el cual estipula que la sumatoria de ángulos en un triángulo suma 180° , lo que ha dado paso a la aparición de lo que se ha denominado "Geometría No-Euclidiana" (Fig.3-1-1).

Si bien el término "Geometría No Euclidiana" es atribuido a Gauss ², se hace preciso aclarar que una rama de la geometría no-euclidiana denominada "Geometría Esférica", ha estado dedicada durante siglos al estudio de superficies con curvatura. La determinación de distancias basadas en círculos y arcos, identificando líneas de trayectorias mínimas (comúnmente entendidas como geodésicas), se han visto implementadas extensamente en el campo de la astronomía, la navegación y la industria aeronáutica. Basadas en estos mismos principios geométricos, las cúpulas geodésicas aparecerían durante el Siglo 20 como una forma arquitectónica de cierta relevancia.

Una importante rama de la geometría esférica es la "Trigonometría Esférica" que se basa en ángulos esféricos, que sirven para determinar distancias a lo largo de superficies con curvatura (Fig. 3-1-2). Varios estudios abordan esta temática desde la antigüedad, comenzando por los griegos desde 90 AD por Menelaus de Alejandría, cuando escribe el libro "Sphaerica", y desarrolla el teorema de Menelaus que define el triángulo esférico ³. Pero también fue objeto de estudio por el matemático árabe Abu Abd Allah Muhammad ibn Muadh Al-Jayyani, autor del libro "Unknown arcs of a sphere", considerado el primer tratado de trigonometría esférica, y que data del Siglo XI ⁴.

Uno de los métodos más conocidos para operar dentro de la trigonometría esférica, es la denominada "Gnomonic Projection" o proyección gnómica, que consiste en la proyección desde el centro de la esfera hacia un plano tangente a su superficie (Fig 3-1-3). La relevancia de la Gnomónica en la arquitectura fue destacada por Marco Lucio Vitruvio en el primer tratado de arquitectura, para quien la arquitectura estaba compuesta de 3 partes: Edificios, Gnomónica, y Maquinas (Cache, 2010). La "Gnomónica" del capítulo IX destaca la relevancia de la astronomía, relojes solares y mecánicos (Fig.3-1-4). Se basaba en cálculos trigonométricos relacionados con la geometría esférica. Vitruvio construye una estructura geométrica que representa el posicionamiento de paralelos y meridianos en la tierra trazando la trayectoria del sol.⁵

Los avances de la geometría no euclidiana posibilitan la aparición de nue-

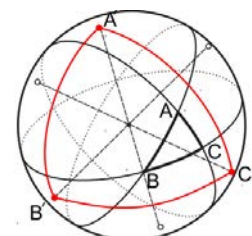
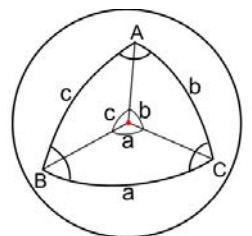
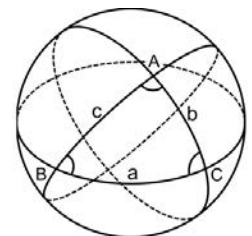


Fig. 3-1-2: Trigonometría Esférica.
(1) Ocho triángulos esféricos definidos por la intersección de tres circunferencias;
(2) Triángulo básico en una esfera;
(3) Triángulo Polar A'B'C'.

2 Klein, Felix. *Elementary Mathematics from an Advanced Standpoint: Geometry*, Dover, 1948 [reprint of English translation of 3rd Edition, 1940. First edition in German, 1908]. pp. 176.

3 Menelaus of Alexandria. O'Connor, J; Robertson, E F. 1999 [viewed April 16, 2014]. Available from: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Menelaus.html>

4 Abu Abd Allah Muhammad ibn Muadh Al-Jayyani. O'Connor, J.; Robertson, E. 1999. [viewed 16 April 2014]. Available from: <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/Al-Jayyani.html>

5 Vitruvio. Op.cit.

vas formas como la hipérbola, la parábola, o las superficies cuádricas, las que surgieron como formas altamente sugerentes donde experimentar para la arquitectura y la ingeniería.

Para continuar esta discusión, es necesario aclarar importantes conceptos matemáticos con respecto a la geometría no-euclidiana, debido a que se utiliza este termino indiscriminadamente para referirse a un variado rango de superficies con curvatura. Algunas de estas geometrías se basan en la disección de un cono a través de un plano, y por tanto, son formas que datan de antaño, y que pueden ser resultas mediante simples formulas dentro de los confines de la geometría euclidiana. Es el caso de la Elipse, la Parábola, y la Hipérbola (Fig. 3-1-5).

Para definir estas geometrías, surgen en las matemáticas tres tipos de formulaciones: explícita o funcional, implícita o ecuación cartesiana, y paramétrica. Se revisan en consideración con las curvas y las superficies.⁶

1) Representación funcional o explícita: Una curva admite una representación de este tipo cuando se puede interpretar como la gráfica de una función de una variable en algún sistema de coordenadas.

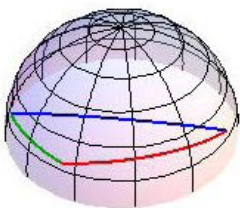
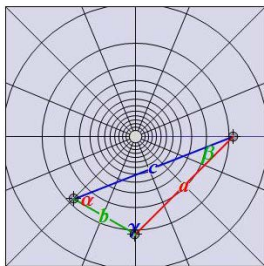
De la misma manera, hay superficies que tienen la propiedad de que hay una dirección del espacio que todas las rectas que tienen esta dirección cortan la superficie en un solo punto como mucho. Entonces podemos establecer un sistema de coordenadas en el que una recta de esta dirección sea el eje de las z y los ejes x e y estén sobre un plano π perpendicular a ella. En esta referencia, la superficie se puede interpretar como la gráfica de una función de dos variables.

2) La representación implícita o ecuación cartesiana: Es una relación que liga implícitamente, por medio de una ecuación, las dos coordenadas de los puntos de la curva, (ecuación cartesiana de la curva). Pasando todos los términos de la ecuación a un lado tendremos una expresión en dos variables igualada a cero. En el caso de las superficies, se tiene una relación que liga implícitamente, por medio de una ecuación, las tres coordenadas de los puntos de la superficie. Por eso también se habla de ecuación cartesiana. Pasando todos los términos de la ecuación a un lado tendremos una expresión en tres variables igualada a cero.

3) Representación paramétrica: Es la más adecuada cuando lo que se quiere es trazar efectivamente la curva; por ello se utiliza en todos los métodos de modelización de una curva a partir de un conjunto de puntos dados por el usuario. Consiste en introducir una nueva variable, el parámetro, que designaremos por t, y expresar las dos coordenadas (x, y) de los puntos de la curva como funciones de t.

Es la más adecuada cuando lo que se quiere es trazar efectivamente la superficie; tanto es así que es también la que se utiliza en todos los métodos de modelización de una superficie a partir de un conjunto de entradas dados por el usuario. Como ahora se trata de objetos bidimensionales en un espacio tridimensional, hay que introducir no una, sino dos nuevas variables, los parámetros, que designaremos por s y t, y expresar las tres coordenadas (x, y, z) de los puntos de la superficie como funciones de s y t.

Para el estudio de los proyectos en este capítulo, Amadeo Monreal⁷ postu-



$$\alpha = 84.3^\circ \quad \beta = 41.9^\circ \quad \gamma = 120.9^\circ$$

$$\alpha = 32.7^\circ \quad \beta = 21.3^\circ \quad \gamma = 152.2^\circ$$

$$E = \alpha + \beta + \gamma - 180^\circ = 26.2^\circ$$

Fig. 3-1-3: Proyección Gnomónica sobre una esfera.

6 Alsina, C.; Casabó, J.; Jacas, J.; Monreal, A.; Tomás, M^a. *Càlcul per a l'Arquitectura*. Barcelona : Edicions UPC, 2008. Pp. 163-181

7 Monreal Pujadas, Amadeo. *Parametrizació de Còniques i Quàdriques*. *Apuntes*

la que las ecuaciones cartesianas implícitas en las figuras o superficies curvas ha despertado el interés para evidenciar su estructura algebraica, para proporcionar una condición de pertenencia de un punto en la figura, para encontrar tangencias, intersecciones con otras figuras, etc., pero que no resultan muy útiles en términos de generación efectiva. Una formulación más adecuada es la paramétrica, en la cual las coordenadas de los puntos de la figura son funciones explícitas de unos parámetros, y cuando se dan valores precisos, se obtienen puntos específicos en la figura. Las ecuaciones cartesianas se obtienen a partir de las paramétricas, eliminando los parámetros de las ecuaciones). Hay que aclarar que este proceso no es nunca único ni canónico y así, de cada ecuación cartesiana, podemos obtener más de una familia de ecuaciones paramétricas.

El método de ecuación reducida mediante ecuaciones trigonométricas proporciona una base que facilita la formulación, la deducción y el cálculo, y permite su aplicación en los proyectos seleccionados.

Estos prolíficos avances en el campo del conocimiento matemático se ven impulsados por renovados conceptos filosóficos y por un nuevo entendimiento del espacio. Este nuevo repertorio geométrico matemático no pasa desapercibido por ingenieros y arquitectos, quienes encuentran en las matemáticas un fértil territorio de experimentación e innovación. La aplicación del conocimiento matemático a la arquitectura será estudiada a continuación.

3.1.2

MATEMÁTICAS Y ARQUITECTURA

Es posible afirmar que los adelantos en las matemáticas han estado íntimamente ligados al desarrollo de la arquitectura a través de la historia, la cual se ha manifestado con diversas intensidades y énfasis en su evolución. Si bien la arquitectura ha permanecido históricamente dentro de los confines del mundo de formas platónicas de poliedros regulares como el tetraedro (pirámide), el cubo, el octaedro (pirámide de base rectangular), también se han revelado valiosos intentos de explorar otras geometrías desde donde apoyar su formulación, como la geometría esférica, o la geometría no-euclidiana, entre muchas otras.

La variedad de formas disponibles a fines del Siglo 19 abre nuevas posibilidades para el arquitecto. Pero las ventajas aparentes del uso de ciertas geometrías como estrategia principal de la composición no explica porque los arquitectos deberían utilizarlas, más allá de una predilección estética (Burry, 2011).⁸

Un grupo de arquitectos e ingenieros pronto descubre que en la medida en que una estructura dependa más de su geometría para lograr la esta-

Docentes de DEA Departamento de Estructuras en la Arquitectura, ETSAB, UPC.

⁸ Burry, Mark. *Geometry Working Beyond Effect. Architectural Design*, 2011, no. 81 (4). pp. 80–89.

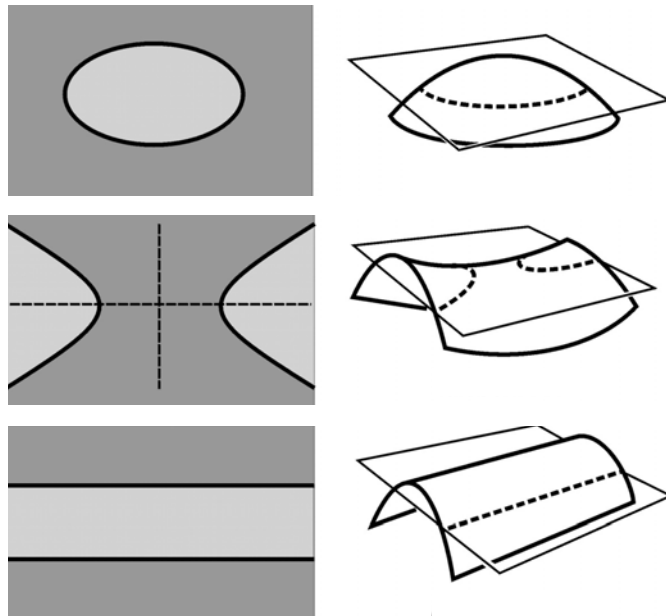


Fig 3-1-4: Geometrías no- euclidianas, clasificadas de acuerdo a su curvatura en sinclásticas (arriba), anticlásticas (centro) y monoclásticas (abajo).

bilidad, y menos en su peso y en la rigidez del material, sus componentes podrán ser mas y mas livianos.⁹ El uso de superficies con curvatura aparece entonces como una estrategia eficaz para generar formas construidas con mayor resistencia, permitiendo salvar mayores luces, reduciendo y optimizando el uso de materiales, y al mismo tiempo logrando una mayor expresividad en las construcciones. Estas formas se denominan estructuras de superficie activa (Ching, 2014), porque trabajan activamente al redirigir las cargas exteriores a lo largo de su envolvente (como es el caso de una estructura de membrana), o a través de la forma de sus componentes (como es el caso de un arco o una catenaria y de mallas espaciales).

Esta oportunidad no pasa desapercibida por un grupo de arquitectos e ingenieros, quienes descubren que, mediante plegados o curvaturas, es posible obtener una mayor rigidez de las formas. Se ha argumentado que la introducción de formas no-convencionales intentaba sobrepasar los límites de las construcciones ya probadas (Heino Engel, 2012)¹⁰, y se ha evidenciado que el uso de ciertas formas singulares ofrecen una capacidad inherente de trabajar efectivamente con superficies que por su morfología son capaces de ofrecer mayor resistencia. Este descubrimiento implica que una serie de familias formales antes inexploradas comienzan a emerger en la arquitectura, relacionando íntimamente aspectos geométricos, estructurales, constructivos y de materialidad.

El uso de superficies con curvatura dan origen a tres familias formales (Fig 3-1-4) denominadas: 1) Monoclásticas o con curvatura en un sentido; 2)

9 Ching, Frank, Barry Onouye, and Douglas Zuberbuhler. *Manual de Estructuras Ilustrado*. Barcelona : Gustavo Gili, 2014. P. 26.

10 Engel, Heino. *Sistemas de Estructuras = Sistemas Estruturais*. Barcelona : Gustavo Gili, 2001. Pp. 18.

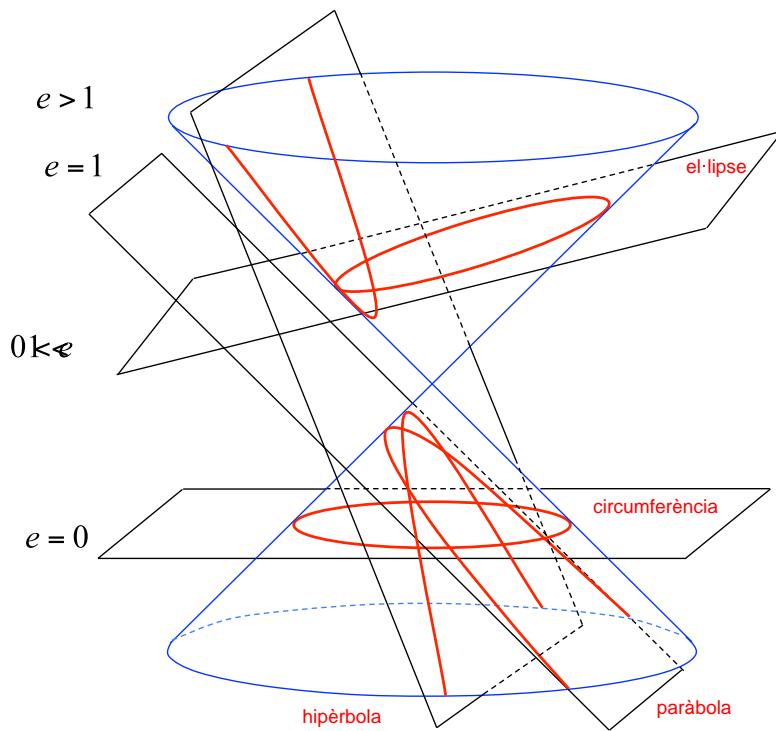


Fig 3-1-5: Geometrías no-euclidianas a partir de las secciones de un cono.

Sinclásticas o con doble curvatura en la misma dirección; y 3) Anticlásticas con doble curvatura en dirección opuesta.

Las superficies monocásticas poseen una curvatura constante, y la superficie trabaja predominantemente a compresión.

Las superficies sinclásticas son definidas como "aquellas que en todos los puntos existe una misma curvatura. Es decir la intersección de un plano perpendicular a dicha superficie produce una línea de intersección que siempre tiene la concavidad hacia el mismo lado".¹¹ Estas superficies con curvaturas en una sola dirección trabajan a compresión.

Las superficies anticlásticas, se definen como aquellas que en todos los puntos existe curvatura en dos sentidos. La intersección de un plano perpendicular a dicha superficie produce una línea de intersección que tiene la concavidad hacia un lado, mientras que la intersección de un plano perpendicular al anterior produce una línea de intersección que tiene la concavidad hacia el lado contrario. Mediante el uso de curvaturas en ambas direcciones, se logra una mayor rigidez en las formas, porque la doble curvatura en direcciones opuestas permiten trabajar la superficie a compresión y tracción.

A pesar de que se evidencia una presencia significativa de estas formas matemáticas en la arquitectura durante el Siglo XX, su evolución y desarrollo ha sido escasamente estudiada en la disciplina, y estudios en proyectos específicos podría develar ciertos aspectos que permanecen aun ocul-

¹¹ Superficies sinclásticas y anticlásticas. Patronaje UPC. n.d. [viewed 20 Octubre 2015].

Available from: <http://tecno.upc.edu/wintess/manual/pat/introduccion.htm>

tos para el conocimiento arquitectónico.

Este capítulo explora la relación entre forma arquitectónica y matemática.

Referentes matemáticos en la arquitectura

A partir de los proyectos bajo estudio, se estudiarán algunos proyectos en la siguiente secuencia:

- (1) Agrupación de los proyectos seleccionados según familias geométricas;
- (2) Enunciado de fórmulas matemáticas utilizadas por los autores en cada proyecto, si han sido documentadas por sus autores. Si hay diversas maneras posibles de concebir estas geometrías, se enuncian en cada proyecto específico;
- (3) Propuesta de una fórmula matemática tentativa basada en la estructura geométrica, si las fórmulas no han sido encontradas. El protocolo de formulación de un algoritmo tentativo para generar la forma se apoyará en las siguientes premisas:
 - a. Uso de fórmulas ya existentes en su época. Se prioriza el uso de métodos euclidianos, intentando fórmulas para cada proyecto mediante fórmulas trigonométricas básicas. Este proceso incluye la revisión de fórmulas básicas, y de métodos alternativos;
 - a. Deducción de parámetros a partir de datos existentes (altura, vértices, flechas). Gran parte de estos proyectos no cuentan con planimetría disponible que permita deducir información precisa sobre parámetros geométricos, y solo se limitan a enunciar alturas y luces en puntos críticos;
- a. Análisis matemático de cada fórmula aplicada a cada proyecto;
 - i. Definición de parámetros bases (con intervalos de mínimos y máximos);
 - ii. Aplicación de valores cambiantes al algoritmo matemático;
- (4) Reconstrucción digital de la geometría de cada proyecto:
 - a. Formulación del algoritmo matemático en el software escogido, y comprobación de algoritmos a partir de los modelos 3D;
 - b. Definición de parámetros con min. y máx.;
 - c. Reconstrucción de los proyectos aplicando las fórmulas matemáticas como algoritmos matemáticos (Script);
 - d. Construcción de un modelo paramétrico en 3D para cada proyecto en estudio (por medio de fórmulas y su geometría asociada);
- (5) Agrupación de proyectos según sus fórmulas y parámetros matemáticos base;

Una primera reconstrucción en 3D, devela que en la mayoría de los proyectos se observa una cierta inexactitud entre la información documentada del proyecto, y su versión en modelo en 3D basada en dimensiones críticas. Esta problemática se debe a que los proyectos se encuentran documentados utilizando proyecciones ortográficas tradicionales (plantas, cortes, alzados), y en escasos casos en proyecciones axonométricas o perspectivas. Por otra parte, los programas de modelización en 3D utilizan algoritmos basados en fórmulas avanzadas, los cuales no concuerdan con la información documentada. Se concluye que para obtener modelos 3D precisos, se hace indispensable utilizar fórmulas matemáticas para describir su geometría, formulando algoritmos y parámetros, para finalmente verificar en plataformas de lenguaje computacional.

Se implementa una metodología de trabajo, que propone una estrategia propositiva y deductiva, basada en dos suposiciones.

La primera suposición identifica las familias geométricas presentes en cada

proyecto.

La segunda suposición identifica las formulas geométricas posibles para deducir las formas.

La metodología de trabajo se enuncia a partir de una postura proporcionada por Amadeo Monreal¹² con respecto a la formulación paramétrica. Se opta por la aproximación desde la trigonometría por varios motivos: la simplicidad en su formulación por el hecho de que han sido ampliamente conocidas desde antaño, de no requerir una formación matemática avanzada, y especialmente, porque han sido detectadas en un grupo de proyectos.

Hay que aclarar que la parametrización basada en ángulos trigonométricos, ha sido extensamente criticada por algunos matemáticos por su falta de exactitud, favoreciendo otras aproximaciones. En la actualidad, existen otros métodos de formulación matemática quizás mas eficientes y optimizados para deducir estas superficies algorítmicamente, a la luz de nuevos adelantos en el conocimiento y de nuevas herramientas computacionales. Sin embargo, si bien estos métodos podrían resultar limitantes, satisfacen el propósito de evaluar estos proyectos a partir de su definición matemática, y proporcionan un sólido marco metodológico desde donde deducir su formulación. Especialmente, se ha preferido utilizar aproximaciones que eran fácilmente deducibles con el conocimiento matemático de su tiempo.

La ultima suposición intenta aplicar la formula a cada proyecto específico para comprobar las formulas en cada proyecto para verificar su idoneidad. Este paso se ha realizado mediante herramientas de programación generando un lenguaje de códigos en AutoLISP para AutoCAD 2013 y Grasshopper para Rhinoceros 5.¹³

El capítulo concluye con el análisis de resultado y conclusiones.

3.1.2.0

FAMILIAS GEOMÉTRICAS

Se agrupan los proyectos seleccionados en familias geométricas reconocibles. Es preciso aclarar que en algunos proyectos ciertas geometrías se utilizan en combinación con otras menores, de modo que su agrupación obedece a la geometría predominante.

1. Hipérboloides:

1. 1896 Shukhov (A/E), 1st. tensile steel gridshell, Nizhny Novgorod, Rusia
2. 1896 Shukhov , 1st hyperboloid structure.
3. 1922 Shukov, Shabolovka Radio Tower, Moscow, Russia.
4. 1935 Torroja (E), Hipódromo de Madrid.
5. 1970 Niemeyer, Cathedral of Brasilia, Brasil.

¹² Este capítulo se ha desarrollado bajo la dirección de Amadeo Monreal. Durante periódicas sesiones de trabajo se han estudiado algunos de los proyectos que comprende esta tesis, evaluando las posibles soluciones matemáticas.

¹³ Rhinoceros ©. Version 5, 2014. Robert McNeel & Associates.

2. Paraboloides Elípticos:
 1. 1955 Louis Simon & André Morisseau, Royan Market, France.
 2. 1958-62 Saarinen, TWA Terminal.
 3. 1896 Mancunill, Masía Freixa, Terrassa, España.
 4. 1897 Shukhov, 1st double curvature lattice steel shell, Vyksa, Russia
3. Paraboloides Hiperbólicos – Hypar:
 1. 1955 E de la Mora y Palomar, Fernández, López Carmona, F Candela, Capilla Nuestra Señora de la Soledad.
 2. 1958 Candela, Iglesia de Cuernavaca.
 3. 1958 Candela Manantiales
 4. 1956 Candela, Iglesia San Antonio de las Huertas.
 5. 1963 Candela, Iglesia de la Virgen de Guadalupe.
 6. 1956 Candela, Iglesia St. Vicente de Paul.
 7. 1964 Tange, National Stadium Tokyo, Japan.
 8. 1962-64 Carsten Schröck / Frei Otto, Evangelische Kirche
 9. 1963 I.M.Pei, Luce Memorial Chapel
 10. 1961 Nervi (E) / Bruer, St. John Abbey.
 11. 1958 Xenakis / Le Corbusier, Phillip Pavilion.
 12. 1963 Tange(A), Yoshikatsu Tsuboi (E), St. Mary's Cathedral.
 13. 1967 Bruer, St. Francis de Sales.
 14. 1971 Nervi (E), Saint Mary's Cathedral.
4. Cilindros Elípticos
5. Cilindros Parabólicos:
 1. 1916 Freyssinet Airship Hangar.
 2. 1929 E. Maigrot (A) /E. Freyssinet (E), C. Limousin (E), Halles du Boulingrin.
 3. 1935 Nervi (E), Air Force Hangar, Orvieto, Italia.
 4. 1954-55 R.E.Camelot, J.de Mailly, B.Zehrfuss, J.Prouvé (ext), N.Esquillan, Nervi (consultant), CNIT.
 5. 1975-8 Dieste, Cadyl Horizontal Silo.
6. Elipsoides:
 1. 1914 Taut, Glass Pavilion, Expo Werkbund.
 2. 1933 Torroja Algeciras Market.
 3. 1953 Saarinen Kresge Auditorium.
 4. 1957-75 Utzon Sydney Opera House.
 5. 1960 Nervi Pallazzo del Sport
 6. 1979 Isler, Heimberg Tennis Center.
 7. 1956 Saarinen, Ingalls Ice Arena.
7. Cúpulas Geodésicas
 1. 1923 Dyckerhoff y Widmann Walther Bauersfeld Zeiss I Dome.
 2. 1968 Candela, Palacio del Deporte
 3. 1960 Murphy y Mackay, Climatron.
 4. 1967 Fuller Montreal USA Pavilion
8. Sinusoides
 1. 1916 Gaudi Escuela Sagrada Familia
 2. 1960 Dieste, Iglesia de la Atlántica
9. Planos Plegados
 1. 1964-71 Nervi (E), Audience Hall
 2. 1953-8 Nervi, Bruer, Zehrfuss. Auditorio Unesco.
10. Catenarias
 1. 1972 Otto (E), G. Behnisch (A), H. Peltz, C. Weber - Olympic Stadium
 2. 1975 Otto/ Mutschler & Part/Happold/ Arup – Multihalle

Se identifican algunas formulas matemáticas utilizadas en cada proyecto, algunas enunciadas explícitamente por sus autores, o se proponen formu-

las matemáticas tentativas basada en su estructura geométrica.

Se procede a analizar la manera que cada geometría se usa en algunos de los proyectos contemplados en este estudio, con sus ecuaciones cartesianas, y ecuaciones paramétricas. La aproximación a la base geométrica pasa por analizar cada proyecto de acuerdo a su conformidad con la estructura geométrica de familias conocidas, agrupándose los proyectos de acuerdo a su afiliación a las familias geométricas en diversas categorías.

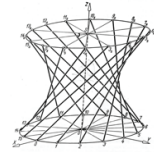
Se evidencia la existencia de las siguientes geometrías base:

1. Hiperboloides
2. Cilindros Elípticos
3. Cilindro Parabólico
4. Paraboloide Elíptico
5. Paraboloides Hiperbólicos – Hypar
6. Elipsoides
7. Geodésicas
8. Superficies Regladas
9. Espirales
10. Sinusoides
11. Catenarias

A continuación se explora cada familia, y su aplicación a los proyectos seleccionados. Una vez detectadas las familias geométricas, se formulan sus formulas parametrizadas, verificando su idoneidad mediante modelamiento en 3d a partir de formulaciones paramétricas.

1890 —

- 1895 1st. steel gridshell, Shukhov
- 1896 1st. double curvature, Shukhov
- 1897 lattice steel shell, Shukhov

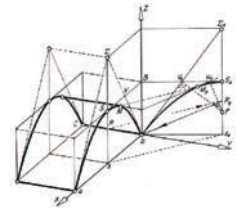


1900 —



1910 —

- 1911 Faro di Adziogol, Shukhov
- 1914 Glass Pavilion
- 1916 Airship Hangar
- Gaudi Escuela Sagrada Familia

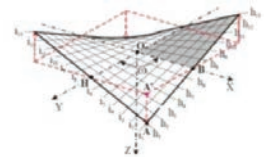


1920 —

- 1922 Zeiss I

1930 —

- 1933 Mercado de Algeciras, Torroja
- 1935 Air Force Hangar, Nervi
- 1935 Hipodromo de Madrid, Torroja

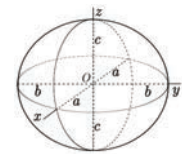


1940 —

1950 —

- 1952 The Dome Restaurant
- 1954 CNIT
- 1955 Capilla Sra. de la Soledad
- 1955 Royan Market

- 1958 Auditorio Sede Unesco
- 1958 Manantiales
- 1958 Philip Pavilion
- 1958 Iglesia Cuernavaca
- 1958 Ingalls Ice Arena



1960 —

- 1960
- 1961 St. John Abbey
- 1962 TWA Terminal
- 1963
- 1964 National Stadium Tokyo

- 1960 Iglesia de la Atlantida
- 1960 Palazzo dello Sport
- 1960 Iglesia de Sta. Monica
- 1960 Climatron
- 1960 Iglesia de la Atlántica



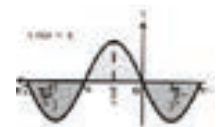
- 1967
- 1968 Palacio del Deporte

- 1963 Luce Chapel
- 1963 St. Mary Cathedral
- 1963 Iglesia Guadalupe

1970 —

- 1970 Catedral Brasilia
- 1971
- 1972 Olympic Stadium Munich
- 1973 Sydney Opera House
- 1975 Multihalle de Mannheim

- 1967 Expo 67
- 1967 St. Francis Church
- 1971 St. Mary Cathedral
- 1971 Audience Hall Vatican



1980 —

- 1978 Cadyl Horizontal Silo
- 1979 Center Heimberg

86 Fig 3-1-6 : Familias de geometrías utilizadas en los proyectos seleccionados organizados en una línea de tiempo.

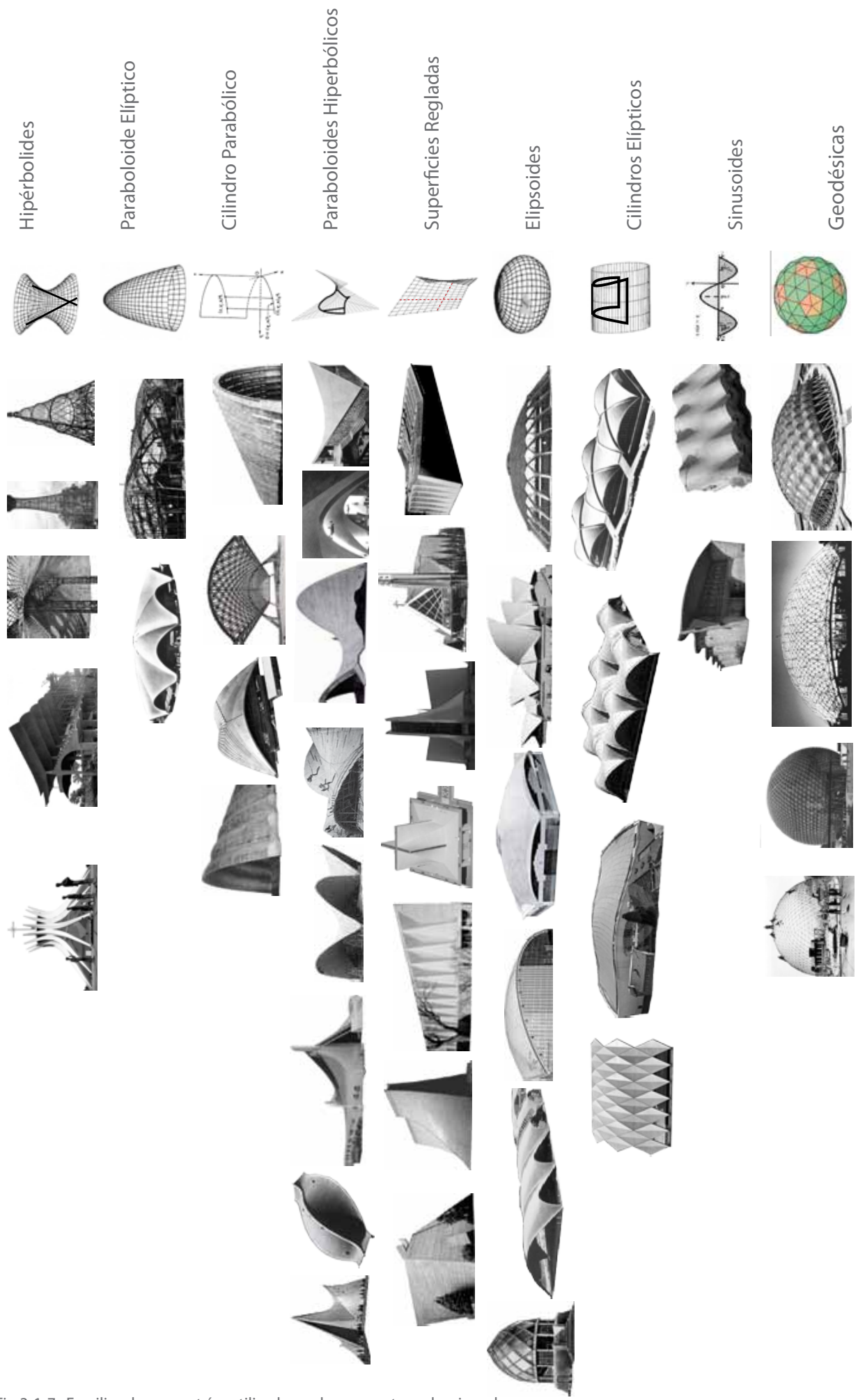
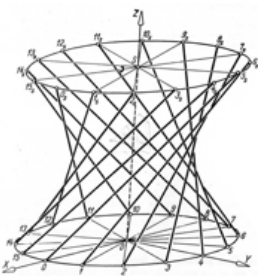


Fig 3-1-7 : Familias de geometrías utilizadas en los proyectos seleccionados.

3.1.2.a

HIPERBOLOIDES



Los hiperboloides pueden ser definidos como una superficie cuádrica reglada definida por generatrices rectas. Debido a que pueden de ser construidas mediante un entramado de elementos rectos, su construcción resulta fácil y rápida.

Formula Matemática

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Parametrización Cartesiana, doblemente reglada:

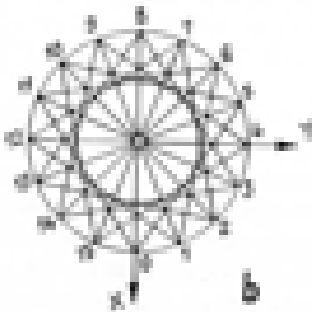


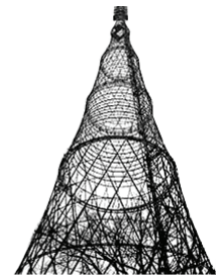
Fig. 3-1-8: Geometría base de un hiperboloide.

$$\begin{cases} x = a \frac{\cos(v+w)}{\cos(w-v)} \\ y = b \frac{\sin(v+w)}{\cos(w-v)} \\ z = c \tan(w-v) \\ v+w \in [0, 2\pi) \\ w-v \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}$$

El uso de hiperboloides en proyectos construidos posee notables proyectos:

- 1896 Shukhov, 1st. tensile steel gridshell, Nizhny Novgorod, Rusia
- 1896 Shukhov, 1st hyperboloid structure.
- 1922 Shukov, Shabolovka Radio Tower, Moscow, Russia.
- 1935 Torroja (E), Hipódromo de Madrid.
- 1970 Niemeyer, Catedral of Brasilia, Brasil.

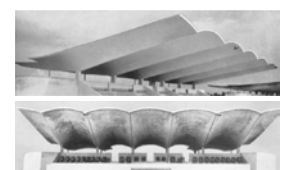
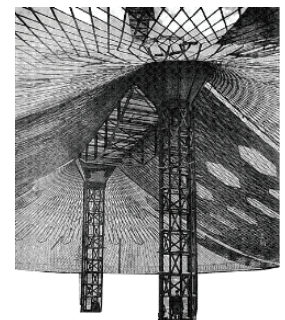
Shukhov utiliza extensamente las hipérbolas de una hoja por sus ventajas propias de volumen tridimensional generado por líneas rectas, para construir una forma resistente y ligera (Melikova, 2014)¹⁴, lo que permite explorar formas que pudiesen acomodar al metal como nuevo material bajo estrictas normas de economía y ligereza. Construyendo su primera torre de 25m en el Industrial Fair de 1899, que continuaron con cerca de 200 torres construidas que alcanzan una altura de 150m, aunque fuesen diseñadas originalmente de 350m. Estas torres se desarrollan utilizando una fórmula matemática única, y mediante la variación de sus parámetros es posible obtener múltiples versiones.



El enunciado de las fórmulas matemáticas han sido documentadas por Shukhov para la Torre Shabolovka, con fecha de 1920. Shukhov utiliza el trabajo matemático de hipérbolas basadas en la fórmula cartesiana reducida, las cuales pueden ser deducidas mediante operaciones trigonométricas y álgebra simple. Las fórmulas que desarrolla Shukhov (a partir de la fórmula base $x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$) son importantes, porque demuestran una secuencia de trabajo precisa. La reconstrucción matemática permite enfatizar que las formaciones geométricas que utiliza Shukhov se basan en dos órdenes: la estructura de los segmentos principales, cuyo radio se determina por su altura con respecto a la base, y los segmentos se organizan en torno a la aplicación de la fórmula para determinar los anillos perimétrales que contienen los segmentos rectos. Los ángulos de los segmentos rectos son determinados mediante deducciones trigonométricas, aunque cabe destacar que durante la construcción el uso de perfiles metálicos requirió de rotaciones hechas a mano para compensar el ángulo de giro de su geometría.



Con respecto a la Catedral de Brasilia, se he optado por no continuar con su reconstrucción matemática, dado que existen precedentes que su forma construida no coincide con la forma geométrica de una hiperboloide.¹⁵



14 *High risk: Moscow's iconic Shukhov Tower is under threat.* The Calvert Journal. 2014 [viewed April 28, 2014]. Available from: <http://calvertjournal.com/comment/show/2280/shukhov-tower-under-threat>.

15 Montreal, Amadeo. *Afirmació i Argumentació de que la Forma Bàsica de la Catedral de Brasília, de Oscar Niemeyer no s'ajusta a un Hiperboloide de Revolució d'una Fulla*, Unpublished article. n.d., p. 1–6.

Formulació paramètrica del hiperboloide asintòtic de la Torre de 1896 (Shukov) utilitzant LISP. Per Amadeo Monreal.

```

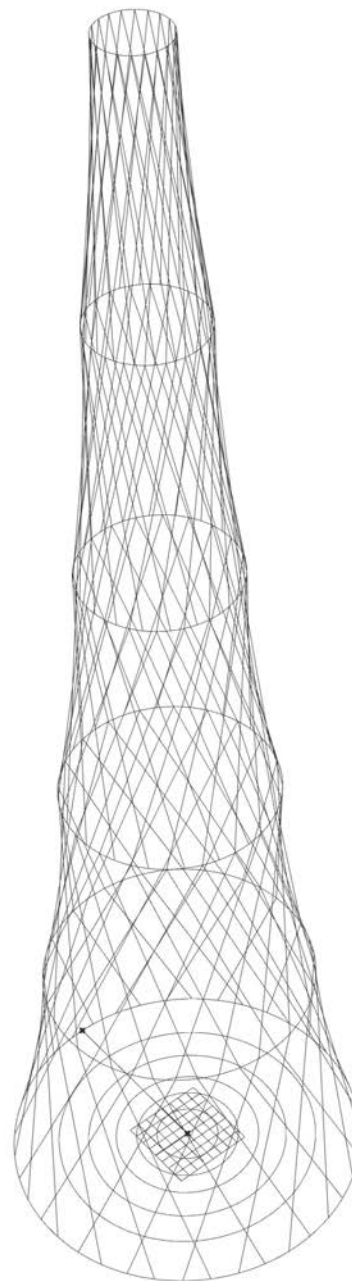
;|
Funcions per produir un hiperboloide d'una fulla
amb la doble família
de generatrius rectes, usant la parametrització as-
símptotica
(parametrització 4b de l'arxiu de "parametrització
de c-q")
i jugant amb la funció grada per produir una regió
esgraonada del domini
i poder així fer tota la volta a l'hiperboloide.
Altament, amb una regió rectangular, només es
pot arribar a fer un "rombe".
;
; carregar grada.lsp
;|
Un exemple de la regió esgraonada en el pla
(u,v):
Notar que klat=5 és una mica inferior a 12/2=nkp/2
(setq nkp 12 kpas (/ pi nkp) klat 5)
(supm '(list (+ (xgrad kpas s) u) (zgrad kpas s) 0.0)
0 (* 2 nkp) (* -1 klat kpas) (* (- klat 1) kpas) (* 2
nkp) (- (* 2 klat) 1)
)
)
;
; parametrització 4-b tal com apareix al document
"parametrització de c-q"
(defun hypas (a b c au bv)
(list (* a (/ (float (cos (+ au bv))) (cos (- bv au))))
(* b (/ (float (sin (+ au bv))) (cos (- bv au))))
(* c (tan (- bv au)))
)
)
)
; exemple on surt un rombe:
; (supm '(hypas 1 1 1 s u) mpip6 pip6 mpip6 pip6
10 10)
; parametrització 4-b amb regió esgraonada
(defun uhyp (pas s u) (+ (xgrad pas s) u)
)
(defun vhyp (pas s u) (zgrad pas s)
)
(defun hypass (a b c n k s u / ppas)
(setq ppas (/ pi n))
(if (> (float k) (* 0.5 n))
(prompt "\n Error: L'Hiperboloide se'n va a
l'infinit")
(hypas a b c
(uhyp ppas (* s 2 n) (reglad (* -1 k ppas) (*
(- k 1) ppas) u))
(vhyp ppas (* s 2 n) (reglad (* -1 k ppas) (*
(- k 1) ppas) u))
)
)
;|
n= n tant de petjades com de cantells en grada
= n de puntes en cada
canto de l'hiperboloide
k= número de porcions de Pi/n de l'equador fins
a cada vora de l'hiperboloide
Cal que k sigui menor que n/2, perquè la "latitud"
no arribi a pi/2, perquè
llavors se'n va a l'infinit.
Cal executar hypass per s de 0 a 1 amb 2*n divi-
sions i
u de 0 a 1 amb 2*k-1 divisions (o múltiples
d'aquests números).
exemples
(supm '(hypass 5 5 5 32 10 s u) 0 1 0 1 64 19)
(supm '(hypass 7 5 4 64 24 s u) 0 1 0 1 128 47)
es pot reduir el nombre de puntes sense reduir les
divisions o, fins i tot, augmentant-les:

```

```

(supm '(hypass 5 5 5 16 5 s u) 0 1 0 1 (* 4 32) (* 4 9))
en versions wireframe
(supm '(hypass 5 5 5 64 24 s u) 0 1 0 1 128 47)
(supm '(hypass 5 5 5 64 24 s u) 0 1 0 1 128 47)
(supm '(hypass 5 5 5 64 24 s u) 0 1 0 1 128 47)
(supm '(hypass 5 5 5 16 5 s u) 0 1 0 1 (* 4 32) 1)
(supm '(hypass 5 5 5 16 5 s u) 0 1 0 1 (* 4 32) (*
4 9))
un "normal" per visualitzar millor els filferros
(supm '(v1 hiper3 4.95 4.95 4.95 s u)
0 pi2
(* -1 (nth 2 (hypass 4.95 4.95 4.95 64 24 0 0)))
(nth 2 (hypass 4.975 4.95 4.95 4.95 64 24 0 0))
64 10
)
;|

```



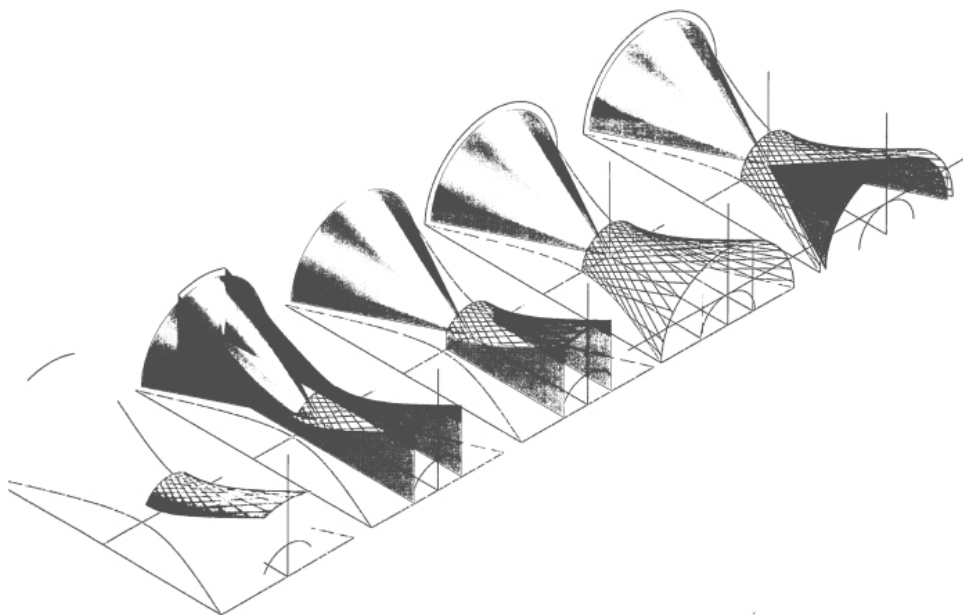
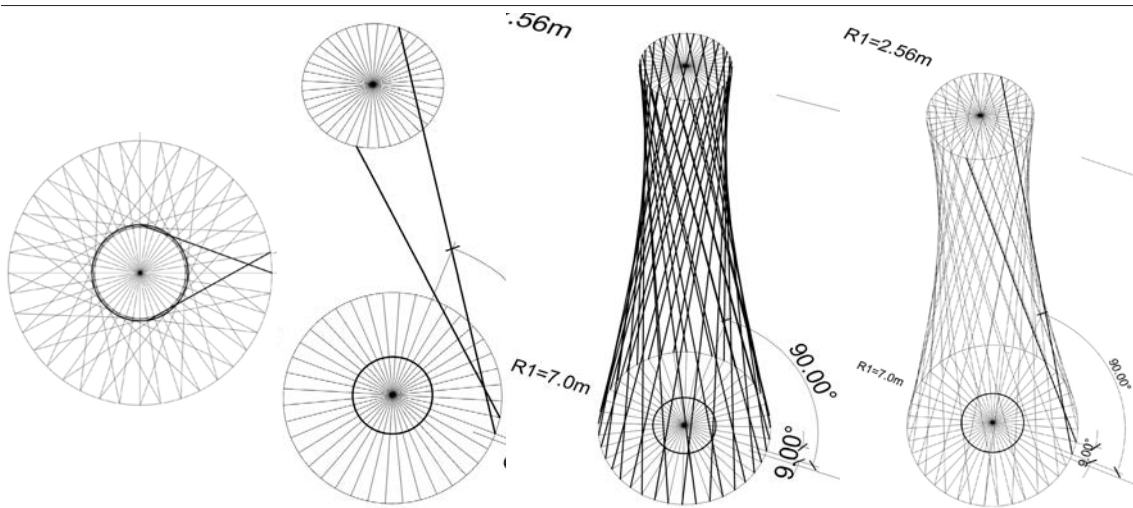
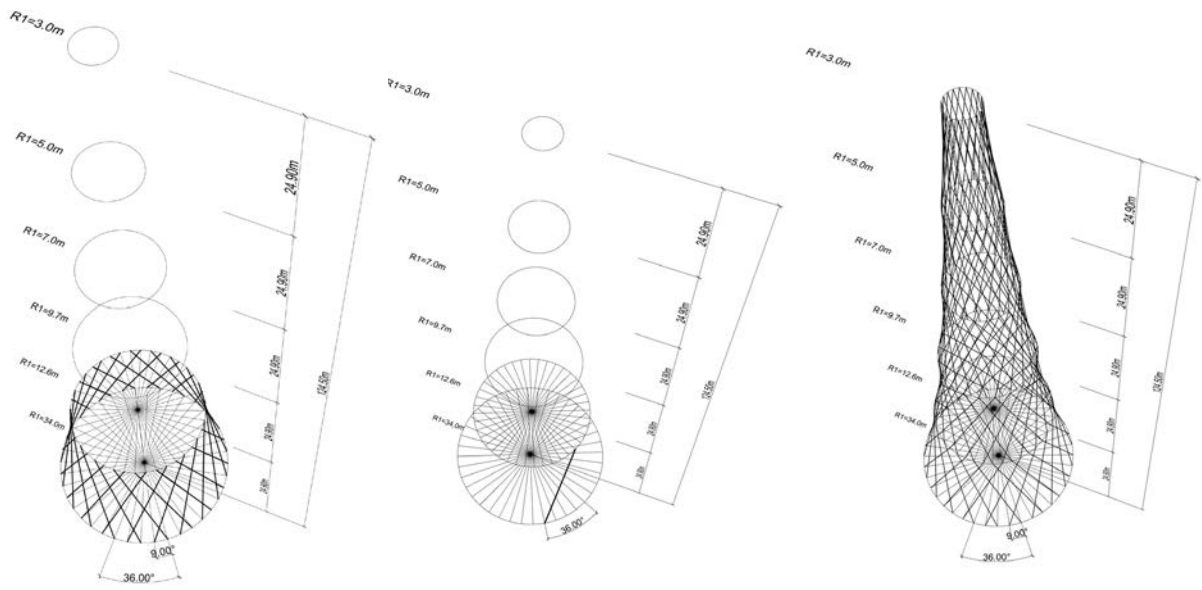
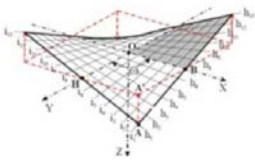


Fig. 3-1-9: Modelos parametricos generados mediante Grasshopper para Rhino en los proyectos: Shabolovka Radio Tower(1922), Faro di Adziogol (1911). Abajo: Geometria base del Hipódromo de Madrid (1935).

PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS [HYPAR]



Los paraboloides hiperbólicos son superficies de doble curvatura o planos alabeados que se pueden construir a partir de líneas rectas, lo que se denomina superficie reglada. En sus secciones presenta parábolas con lados hacia arriba, y hacia abajo en su sección perpendicular. Las secciones paralelas al suelo son en forma de hipérbola.

FORMULA

MATEMATICA

(ECUACION CARTESIANA)

$$z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}$$

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = z, \text{ o sigui, } \left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right)\left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right) = z.$$

Fig. 3-1-10: Geometría base de un Paraboloides Hiperbólico.

CURVAS

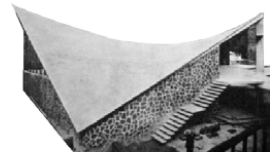
$$\begin{cases} x = s \\ y = u \\ z = \frac{s^2}{a^2} - \frac{u^2}{b^2} \\ s \in \mathbb{R} \\ u \in \mathbb{R} \end{cases}$$

REGLADAS

$$\begin{cases} x = \frac{a}{2}(s+u) \\ y = \frac{b}{2}(s-u) \\ z = s u \\ s \in \mathbb{R} \\ u \in \mathbb{R} \end{cases}$$

La aplicación de paraboloides hiperbólicos ha sido extensa en la arquitectura, lo que se evidencia en el número de proyectos detectados.

12. 1955 E de la Mora y Palomar, Fernández, López Carmona, F Candela, Capilla Nuestra Señora de la Soledad.
13. 1958 Candela, Iglesia de Cuernavaca.
14. 1958 Candela Manantiales
15. 1956 Candela, Iglesia San Antonio de las Huertas.
16. 1963 Candela, Iglesia de la Virgen de Guadalupe.
17. 1956 Candela, Iglesia St. Vicente de Paul.
18. 1964 Tange, National Stadium Tokyo, Japan.
19. 1962-64 Carsten Schröck / Frei Otto, Evangelische Kirche
20. 1963 I.M.Pei, Luce Memorial Chapel
21. 1961 Nervi (E) / Bruer, St. John Abbey.
22. 1958 Xenakis / Le Corbusier, Phillip Pavilion.
23. 1963 Tange(A), Yoshikatsu Tsuboi (E), St. Mary's Cathedral.
24. 1967 Bruer, St. Francis de Sales.
25. 1971 Nervi (E), Saint Mary's Cathedral.

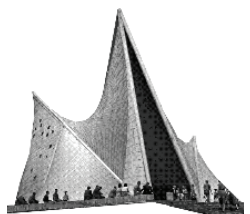


Las formulas matemáticas de paraboloides hiperbólicos que han sido utilizadas han sido documentadas por sus autores en algunos casos. Candela formula y utiliza reiteradamente sus formulas en diversos proyectos, y comienza a interesarse por el paraboloides hiperbólicos cuando conoce el trabajo de algunos ingenieros franceses alrededor de 1930 que habían experimentado y construido algunas estructuras, pero sin advertir las posibilidades artísticas o económicas que ofrecían.¹⁶

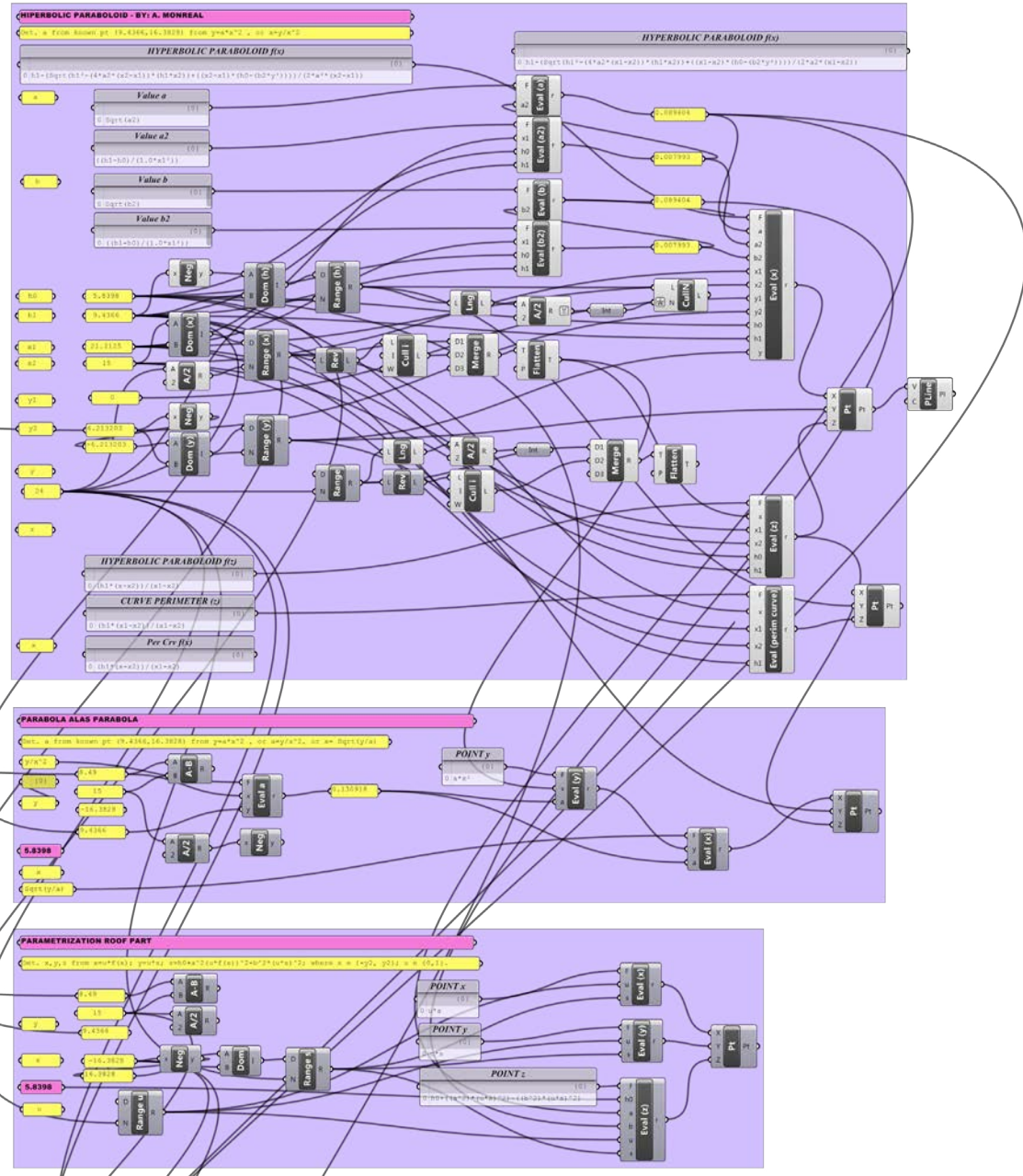


A partir de los años 60, Bezier desarrolla una formula compacta de un cuadrilátero alabeado a partir de 4 puntos, que facilita enormemente su formulación.

Se han desarrollado algunas formulaciones paramétricas de ciertos proyectos, las que se enuncian a continuación.



16 Félix Candela. The Harvard Crimson, 1961 [viewed June 13, 2015]. Available from: <http://www.thecrimson.com/article/1961/11/17/felix-candela-pthe-norton-lecturer-for/>



Formulación paramétrica del paraboloides hiperbólicos utilizando Grasshopper para Rhino. Se utiliza la misma definición para varios proyectos.

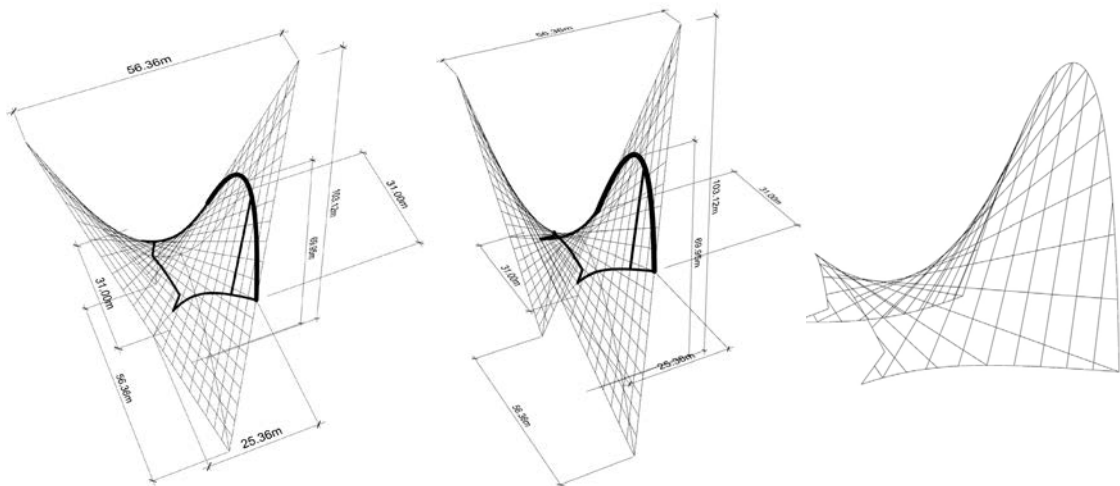
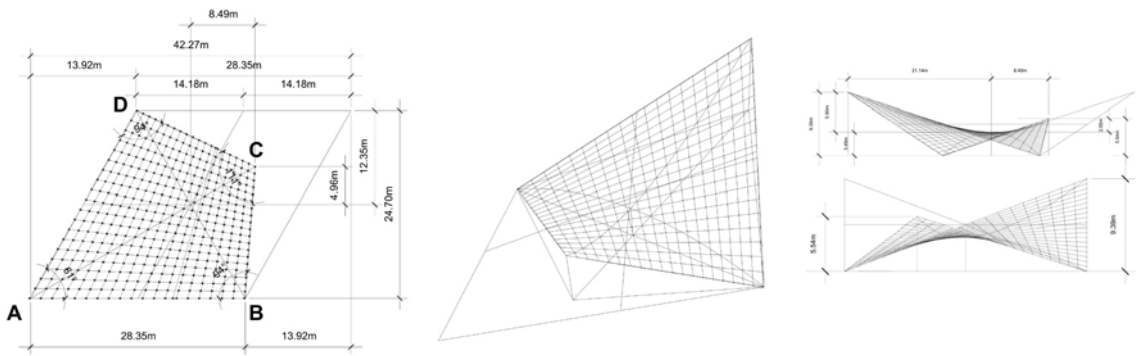
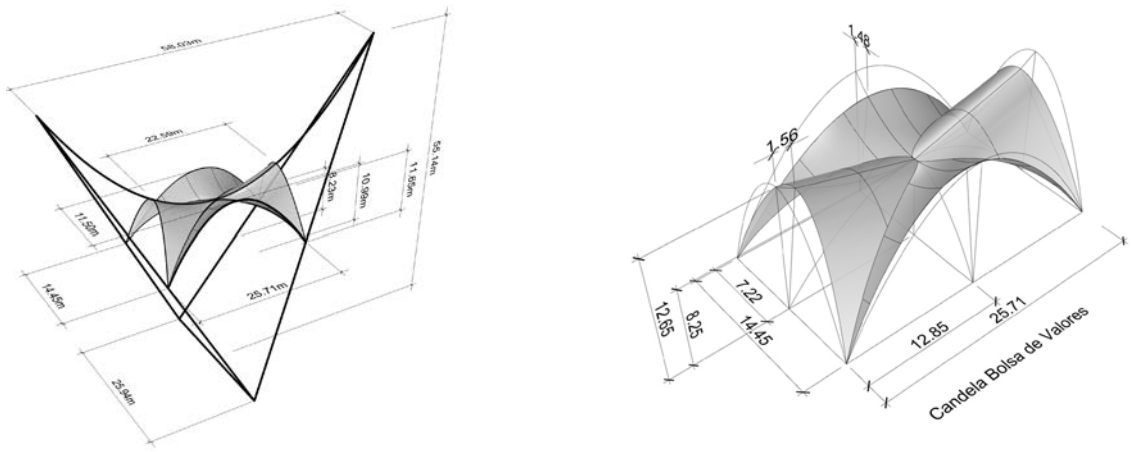


Fig. 3-1-11: Modelos paramétricos generados mediante Grasshopper para Rhino de 3 proyectos: Capilla Nuestra Señora de la Soledad(1955), Bolsa de Valores (1955), Cuernavaca (1958). Fuente: M. Bravo, 2014.

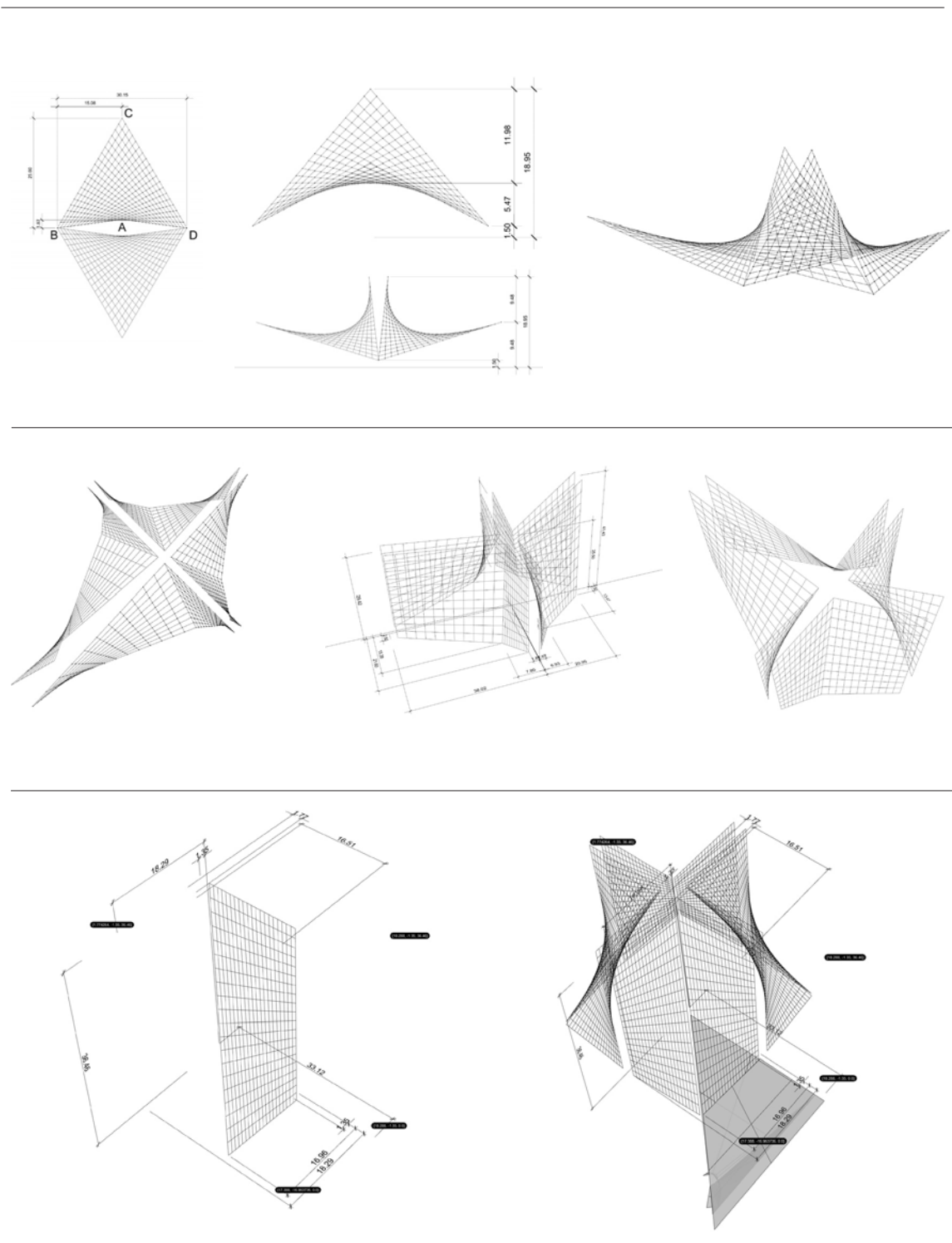


Fig. 3-1-12: Modelos paramétricos generados mediante Grasshopper para Rhino de 3 proyectos: Iglesia St Jose Obrero (1959), St. Mary's Cathedral (1963), Nervi Saint Mary (1971). Fuente: M. Bravo, 2014.

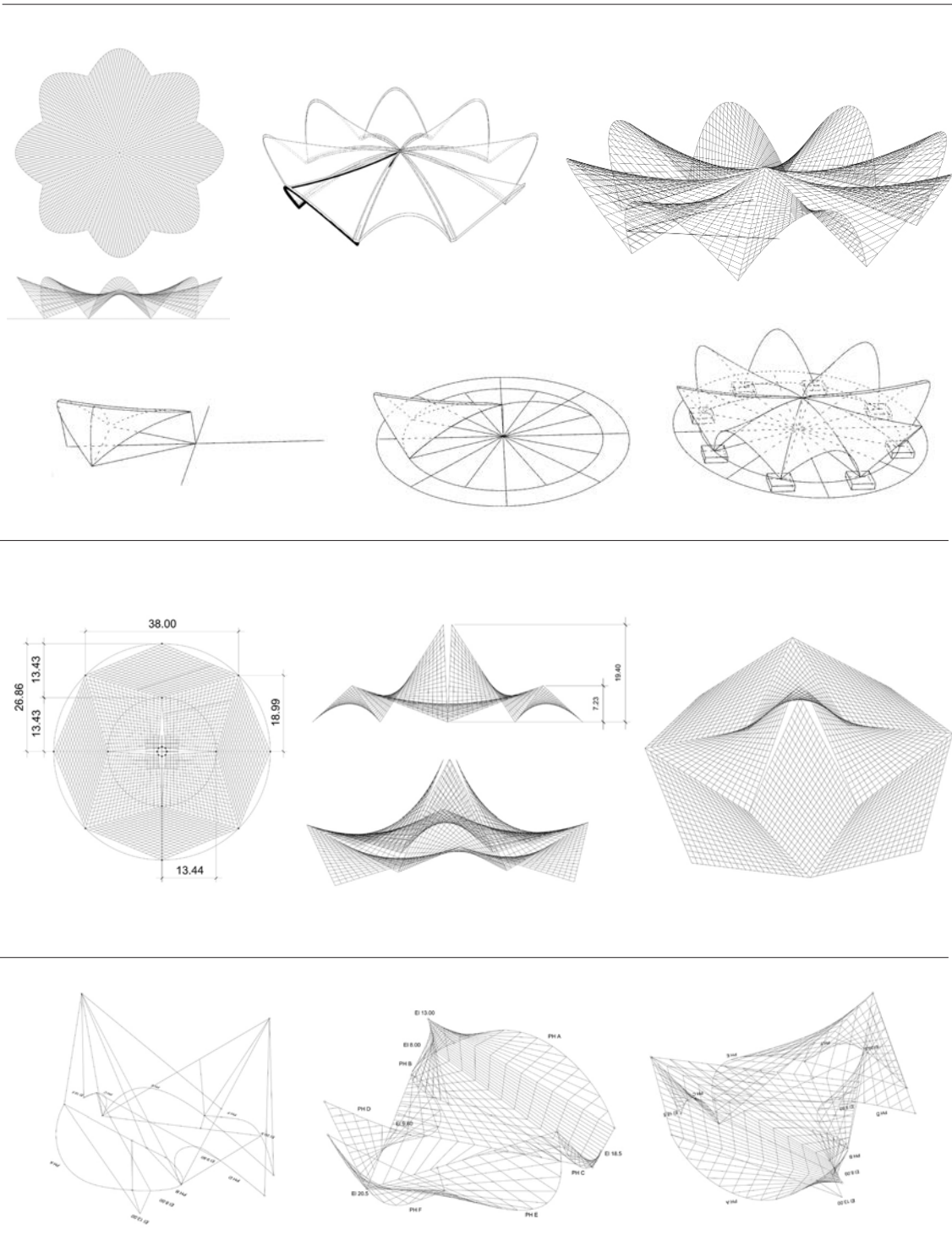


Fig. 3-1-13: Modelos paramétricos generados mediante Grasshopper para Rhino de 3 proyectos: Manantiales (1958), Iglesia Virgen de Guadalupe (1963), Philip Pabellon (1958). Fuente: M. Bravo, 2014

Formulación paramétrica del hiperboloide hiperbólico de Luce Chapel de 1963 (I.M.Pei) utilizando LISP. Por Amadeo Monreal.

```
(setq
a 3.3825
b 9.02
c 0.922
d 2.9725
l 15.19
h 15.89
hm 7.945
)
(setq pp00 (list 0 0 h)
      pp11 (list b l 0)
)
; del maple:
(setq pp10 (list 0.964520 -6.515142 0.0)
      pp01 (list 0.0 37.969444 h)
)
(supm '(parhip0 pp00 pp10 pp01 pp11 s u) 0 1 0 1 50 50)
(defun uu0 (s) (/ (* -1.6287855 s) (- (* 4.0660755 s) 9.492361)))
(defun uu1 (s) (/ (+ (* -16.287855 s) -37.975) (- (* 40.660755 s) 94.92361)))
(corbap '(parhip0 pp00 pp10 pp01 pp11 u (uu0 u)) 0 1 100)
(corbap '(parhip0 pp00 pp10 pp01 pp11 u (uu1 u)) 0 1 100)
(supm '(parhip0 pp00 pp10 pp01 pp11 s (reglad (uu0 s) (uu1 s) u)) 0 1 0 1 50 50)
```

Formulación paramétrica del hiperboloide hiperbólico de Manantiales de 1958 (Candela) utilizando LISP. Por Amadeo Monreal.

```

; Candela-edificio manantiales
; dades
(setq
  h0 7.5
  h1 12.5
  x1 19.968124
  y1 0.0
  x2 14.968124
  y2 6.2
  x12 (- x1 x2)
  a2 (/ (- h1 h0) (* 1.0 x1 x1))
  a (sqrt a2)
  b2 (/ (+ h0 (* a2 x2 x2)) (* 1.0 y2 y2))
  b (sqrt b2)
)
(defun xfhyp (y)
  (list
    (/ (- h1
        (sqrt (- (* 1.0 h1 h1)
                (* 4 a2 x12 (+ (* h1 x2) (* x12 (- h0 (* b2 y y)))))))
        )
      )
    (* 2.0 a2 x12)
  )
  y
)
(defun zhypxy (h0 a2 b2 x y)
  (+ h0 (* a2 (expt x 2)) (* -1.0 b2 (expt y 2)))
)
(defun zhyp (h0 a2 b2 s u / ppt xppt yppt)
  (setq ppt (reglad ee0 (xfhyp s) u)
        xppt (nth 0 ppt) yppt (nth 1 ppt)
  )
  (list xppt yppt (zhypxy h0 a2 b2 xppt yppt))
)
(setq u2 (+ (* a x2) (* b y2))
      pp00 (list (/ (* -1.0 u2) a) 0.0 (+ h0 (* u2 u2)))
      pp10 (list 0.0 (/ (* -1.0 u2) b) (- h0 (* u2 u2)))
      pp01 (list 0.0 (/ (* 1.0 u2) b) (- h0 (* u2 u2)))
      pp11 (list (/ (* 1.0 u2) a) 0.0 (+ h0 (* u2 u2)))
)
(setq
  x0hyp (/ h1 (* 2.0 a2 x12))
  tind (+ (/ (* h1 h1) (* 4.0 a2 x12)) (* -1.0 h0 x12) (* -1.0 h1 x2))
  ahyp (sqrt (/ tind (* 1.0 a2 x12)))
  bhyp (sqrt (/ tind (* 1.0 b2 x12)))
)
(supm '(zhyp h0 a2 b2 s u) (* -1 y2) y2 0 1 40 50)
(supm '(parhip0 pp00 pp10 pp01 pp11 s u) 0 1 0 1 20 20)
(corbp '(zhyp h0 a2 b2 u 1) (* -1 y2) y2 40)
(corbp '(list u (* (tan pip8) u) (zhypxy h0 a2 b2 u (* (tan pip8) u))) 0 x2 10)
(corbp '(list u (* -1 (tan pip8) u) (zhypxy h0 a2 b2 u (* -1 (tan pip8) u))) 0 x2 10)

(corbp '(summat (list x0hyp 0.0) (hip ahyp bhyp u) (* -1 y2) y2 60)
  (corbp '(summat (list x0hyp 0.0) (hipn ahyp bhyp u) (* -1 y2) y2 60)
  (command "_line" (list x0hyp (* -1 y2)) (list x0hyp y2) ""))
  (command "_line" (list x1 0) (list (- (* 2 x0hyp) x1) 0) ""))

```

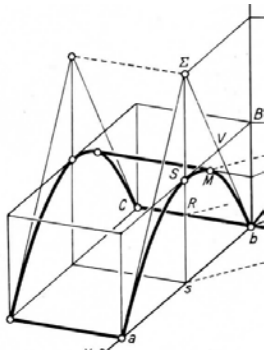


Fig. 3-1-14: Geometría base de un cilindro parabólico.

3.1.2.c

CILINDROS PARABÓLICOS

Los cilindros parabólicos se podrían definir como un cilindro generado por la extrusión de una parábola. A su vez, la parábola es "un conjunto P de todos los puntos en el plano R^2 que equidistan de una recta fija, llamada directriz, y de un punto fijo, denominado foco, que no pertenece a la recta. Una parábola es una curva con dos brazos abiertos, simétrica con respecto a la recta que pasa por el foco y perpendicular a la directriz. Esta recta se llama eje de simetría y el punto donde esta recta intersecta a la parábola se llama vértice."¹⁷



FORMULA

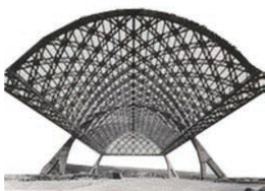
$$ay = x^2$$

MATEMATICA

(ECUACION CARTESIANA)



A escala arquitectónica, la parábola posee la ventaja de ser una forma que minimiza los esfuerzos laterales, y por tanto, ha representado una geometría altamente resistente donde experimentar los límites de nuevos materiales y sistemas constructivos. Se ha evidenciado que cilindros parabólicos han sido utilizados en proyectos de grandes luces y de gran altura para generar bóvedas de cañón, o bien en agrupaciones polares de tres o cuatro cilindros para estabilizar la forma.



Freyssinet utiliza el cilindro parabólico para desarrollar sus estructuras de grandes luces y alturas en hormigón armado. Los arcos resultantes han sido fácilmente adaptados a sistemas de prefabricación.

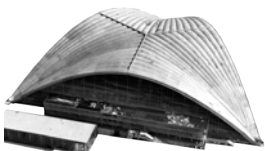
1916 Freyssinet Airship Hangar.

1929 E. Maigrot (A) /E. Freyssinet (E), C. Limousin (E), Halles du Boul-
ingrin.

1935 Nervi (E), Air Force Hangar, Orvieto, Italia.

1954-55 R.E.Camelot, J.de Mailly, B.Zehrfuss, J.Prouvé (ext), N.Esquillan,
Nervi (consultant), CNIT.

1975-8 Dieste, Cadyl Horizontal Silo.



A continuación se exploran algunos proyectos que exhiben esta geometría.



¹⁷ Montreal, Amadeo. *Definiciones propuestas por el autor*. DEA Departamento de Estructuras el la Arquitectura, ETSAB, UPC.

Formulación paramétrica de los cilindros parabólicos de CNIT, 1954-5, Camelot, de Maily, Zehrfuss, Prouvé-ext, Esquillan, Nervi-con, utilizando LISP (por Amadeo Monreal.)

```

; funcion auxiliar ys que da la y en funcion del angulo
(defun ys (d s0 s u)
  (* d (reglad (/ (sin (abs (* 1.0 s s0))) (sin s0)) 1 u))
)
; cilindro base (una porcion de cubierta)

(defun cil1 (r h s u / z0 s0 d0)
  (setq z0 (- h r)
        s0 (acos (/ (* -1.0 z0) r))
        d0 (* -1.0 r (sin s0) (tan pip6)))
  )
  (list (* r (sin (* s s0)))
        (ys d0 s0 s u)
        (+ (* r (cos (* s s0))) z0)
  )
)
; (supm '(cil1 14.201 5.6 s u) -1 1 0 1 80 9)
; cubierta CNIT completa
(defun cil3 (r h s u / z0 s0 d0)
  (setq z0 (- h r)
        s0 (acos (/ (* -1.0 z0) r))
        d0 (* -1.0 r (sin s0) (tan pip6)))
  )
  (prod (gir3dz (* 2 pip3 (pe (/ (+ s 1) 2))))
        (list (* r (sin (* (pers -1 1 s) s0)))
              (ys d0 s0 (pers -1 1 s) u)
              (+ (* r (cos (* (pers -1 1 s) s0))) z0)
        )
  )
)
; (supm '(cil3 14.201 5.6 s u) -3 3 0 1 240 9)
(defun x00 (r h / z0 s0)
  (setq z0 (- h r) s0 (acos (/ (* -1.0 z0) r)))
  (* r (sin s0))
)
; (x00 14.201 5.6)
; suelo circular
; (supm '(reglad eee0 (eli3d 15 15 s) u) 0 pi2 0 1 120 5)
;
; (setq lado 21.8 a (* 0.5 lado) hz 5.1 dap (* -1.0 a (tan pip6)))

(defun cil1 (a h d s u)
  (list (* a s)
        (* d (reglad (abs s) 1 u))
        (* h (- 1 (* s s)))
  )
)
; (supm '(cil1 a hz dap s u) -1 1 0 1 40 9)
(defun cil3 (a h d s u)
  (prod (gir3dz (* 2 pip3 (pe (/ (+ s 1) 2))))
        (list (* a (pers -1 1 s))
              (* d (reglad (abs (pers -1 1 s)) 1 u))
              (* h (- 1 (expt (pers -1 1 s) 2)))
        )
  )
)
; (supm '(cil3 a hz dap s u) -3 3 0 1 120 9)
(defun mur1 (a h d s u)
  (list (* a s)
        d
        (* u h (- 1 (* s s)))
  )
)
; (supm '(mur1 a hz dap s u) -1 1 0 1 40 5)
(defun mur3 (a h d s u)
  (prod (gir3dz (* 2 pip3 (pe (/ (+ s 1) 2))))
        (list (* a (pers -1 1 s))
              d
              (* u h (- 1 (expt (pers -1 1 s) 2)))
        )
  )
)
; (supm '(mur3 a hz dap s u) -3 3 0 1 120 5)

```

Metodo 1 & 2:
 $y = ax^2$

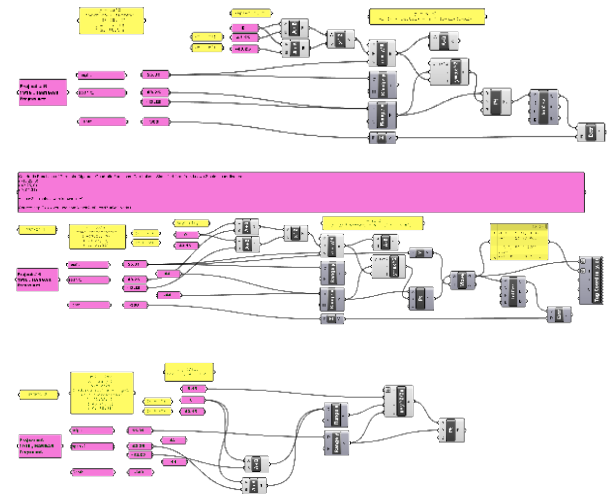
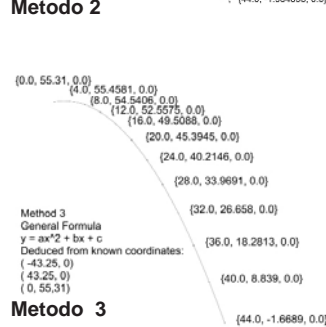
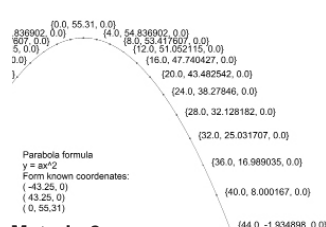
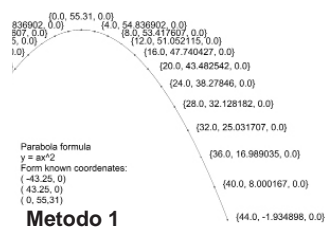
Reemplazando valores para x, y se obtiene a.
 1) (0, 55.31)
 2) (43.25, 0)
 3) (20, 45.3982)

Metodo 3:
 $f(y): ax^2+bx+c$
 Vertex: (b/2a, y)
 Uso para derivar de coordenadas conocidas

Parametros:
 c (Altura) = 55.31 m
 x (Luz) = 43.25m *2
 y (Depth) = 300 m

Cada arco se monta a partir de 25'-ancho (7.5m) apilados, secciones de solo 3.5" (9 cm) espesor; en la base del arco con 18' (5.4 m) de ancho, y en la corona de 11' (3.4 m).

Formulación paramétrica de Cilindros Parabólicos de Airship Hangar de 1916 (Freysinet) utilizando Grasshopper para Rhino.



Formulación paramétrica de Cilindros Parabólicos de Halles du Boulingrin de 1929 (Freysinet, Limousin, Maigrot/A) utilizando Grasshopper para Rhino.

Parametros:
 h (Altura) = 21.84m
 d (Luz) = 42.22m
 y (Depth) = 80 m

Metodo 1:
 $f(y): ax^2+bx+c$
 Vertex: (b/2a, y)
 Uso para derivar de coordenadas conocidas

- 1) (-21.11, 0)
- 2) (21.11, 0)
- 3) (0, 21.84)

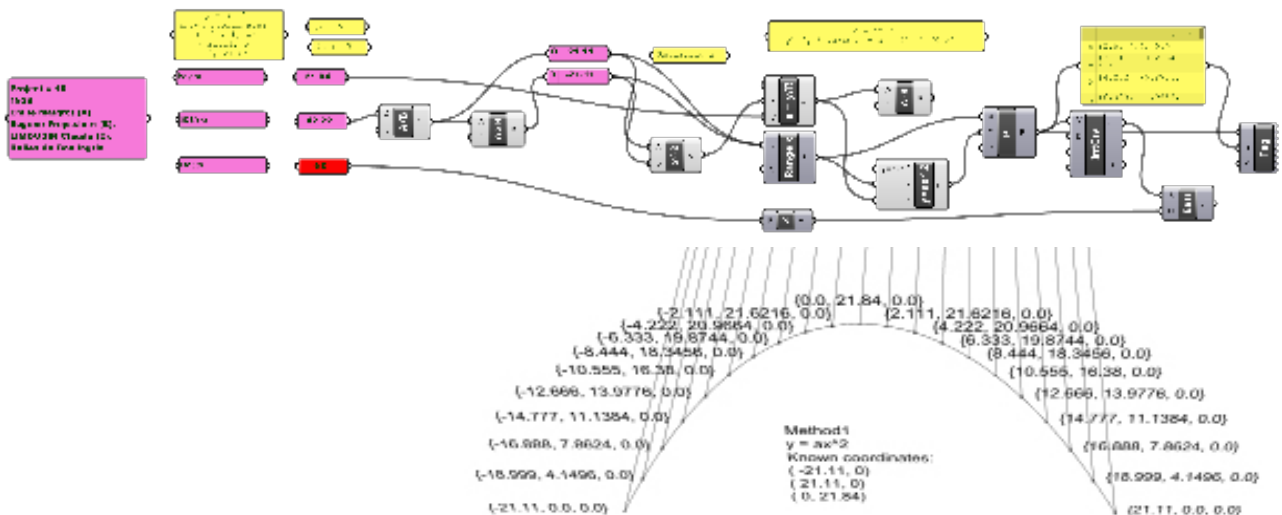


Fig. 3-1-15: Modelos parametricos generados mediante Grasshopper para Rhino de 2 proyectos. (de arriba a abajo) Airship Hangar (1916), CNIT (1955), Halles du Boulingrin (1929).

ELIPSOIDES

El elipsoide es una superficie cuádrica con centro de simetría respecto al origen, ejes y planos de coordenadas.

Cuando $a=b=c=r$, los elipsoides se convierten en esferas de radio r .

Con la excepción a las geodésicas, no se aprecia el uso de arcos completos, sino el uso de triángulos esféricos. Estos segmentos de esferas son frecuentemente rotados en torno a un centro (array polar), o con respecto a un eje.

- El elipsoide es simétrico respecto al origen, ejes, y los planos de coordenadas;
- Las secciones con cualquier plano son elipses, excepto en el caso particular de la circunferencia;
- El elipsoide se extiende en $-a \leq x \leq a$; $-b \leq y \leq b$; $-c \leq z \leq c$.

FORMULA MATEMÁTICA

(ECUACION CARTESIANA):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

ECUACIÓN PARAMÉTRICA:

$$\begin{cases} x(t, u) = a \cos(t) \cos(u) \\ y(t, u) = b \cos(t) \sin(u) \\ z(t, u) = c \cos(t) \end{cases}$$

A escala arquitectónica, las elipses han sido ampliamente utilizadas históricamente por su evidente resistencia en forma de cúpulas, evolucionando en su definición geométrica y asociados a cáscaras o shells de diversos materiales. Han sido utilizados en proyectos que exhiben grandes luces y altura. Con la excepción a las geodésicas, no se aprecia el uso de arcos completos, sino el uso de triángulos esféricos. Estos segmentos de esferas son frecuentemente rotados en torno a un centro (array polar), o con respecto a un eje.

1. 1914 Taut, Glass Pavilion, Expo Werkbund.
2. 1933 Torroja Algeciras Market.
3. 1953 Saarinen Kresge Auditorium.
4. 1957-75 Utzon Sydney Opera House.
5. 1960 Nervi Pallazzo del Sport
6. 1979 Isler, Heimberg Tennis Center.
7. 1956 Saarinen, Ingalls Ice Arena.

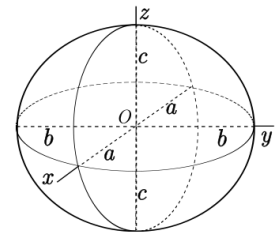
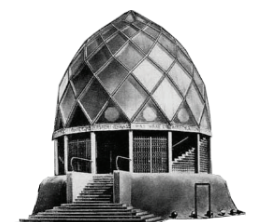
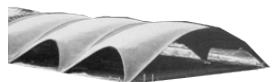


Fig. 3-1-16: Geometría base de un elipsoide.



Formulación paramétrica de proyectos de elipsoide utilizando Grasshopper para Rhino.

Elipsoide Formula

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Parametrización Elipsoide

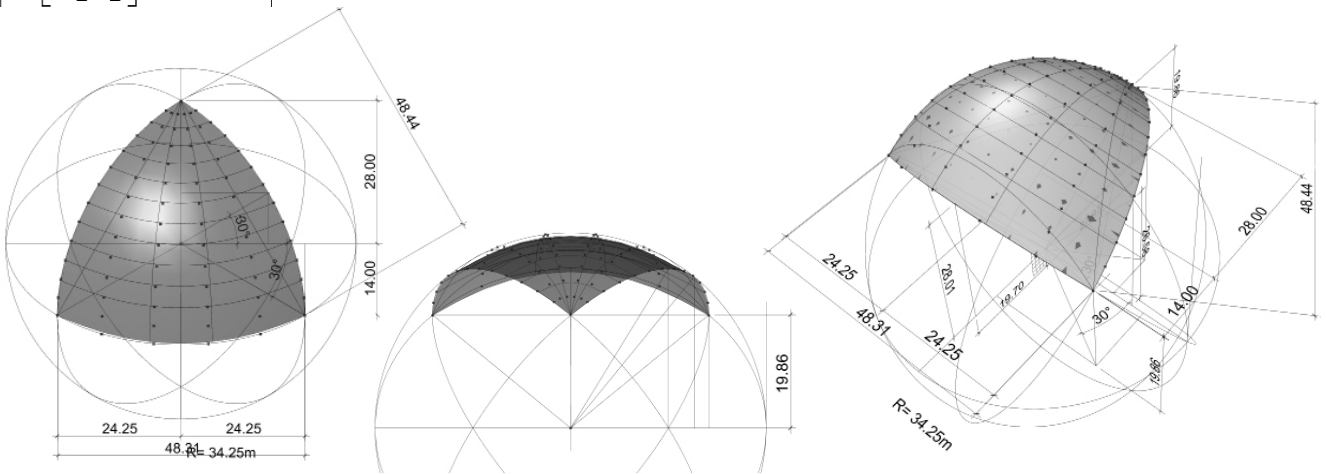
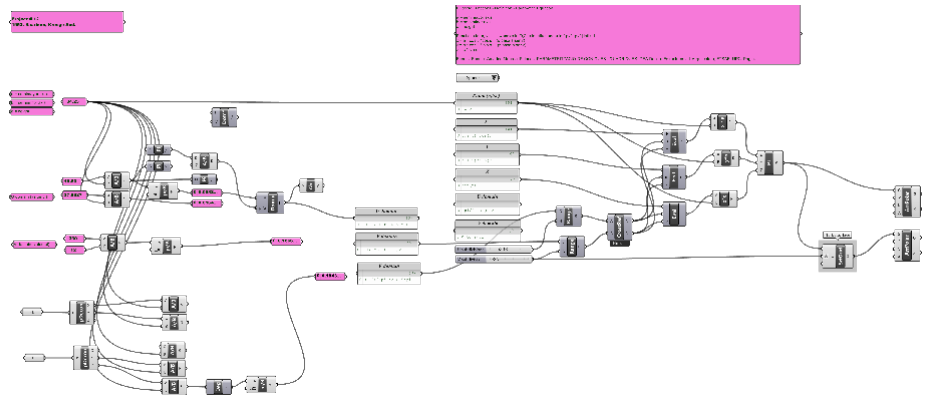
$$f(x): a * \cos u * \cos s$$

$$f(y): b * \cos u * \sin s$$

$$f(z): c * \sin u$$

$$s \in [0, 2\pi) \quad (\text{longitud})$$

$$u \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \quad (\text{latitud})$$



Elipsoide Formula

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Parametrización Elipsoide

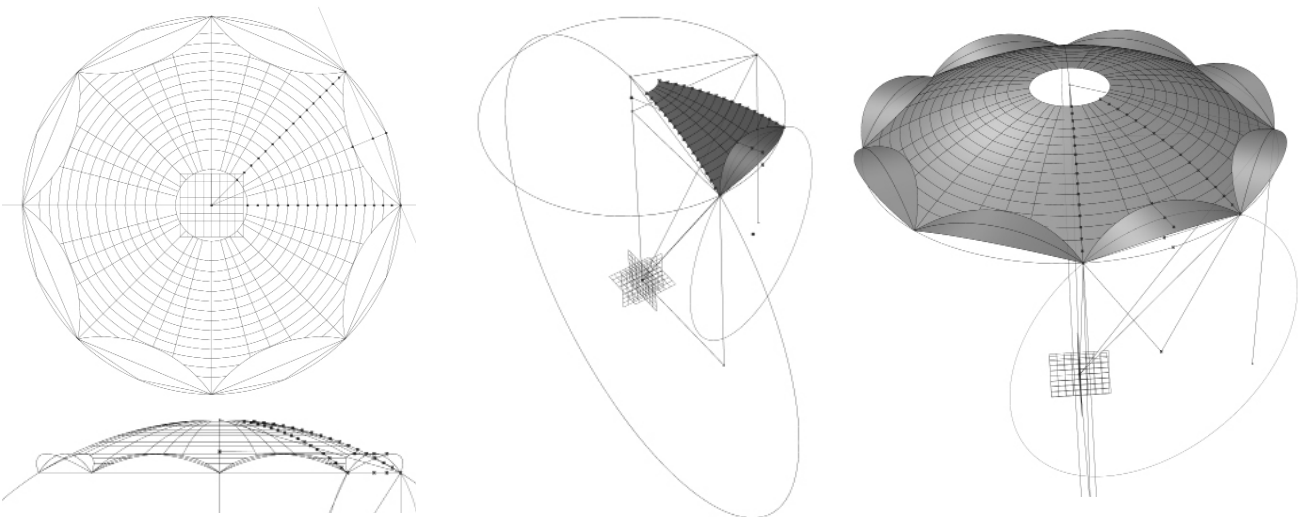
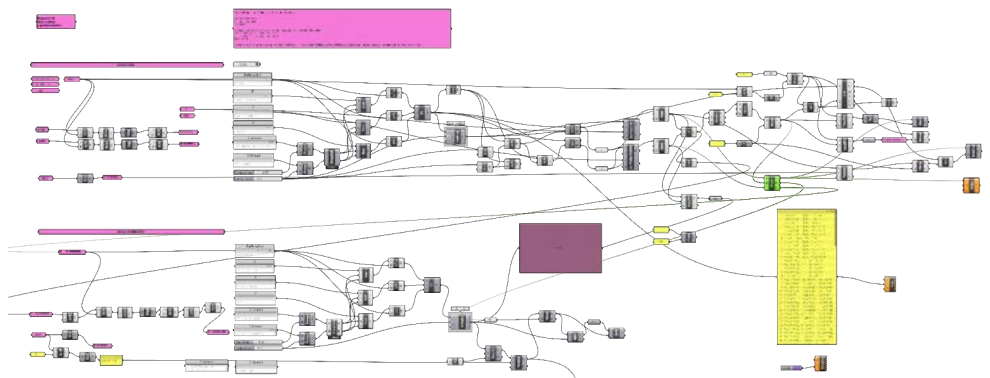
$$f(x): a * \cos u * \cos s$$

$$f(y): b * \cos u * \sin s$$

$$f(z): c * \sin u$$

$$s \in [0, 2\pi) \quad (\text{longitud})$$

$$u \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \quad (\text{latitud})$$



Elipsoide Formula

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Parametrizacion Elipsoide

$$f(x): a * \cos u * \cos s$$

$$f(y): b * \cos u * \sin s$$

$$f(z): c * \sin u$$

$$s \in [0, 2\pi] \quad (\text{longitud})$$

$$u \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \quad (\text{latitud})$$

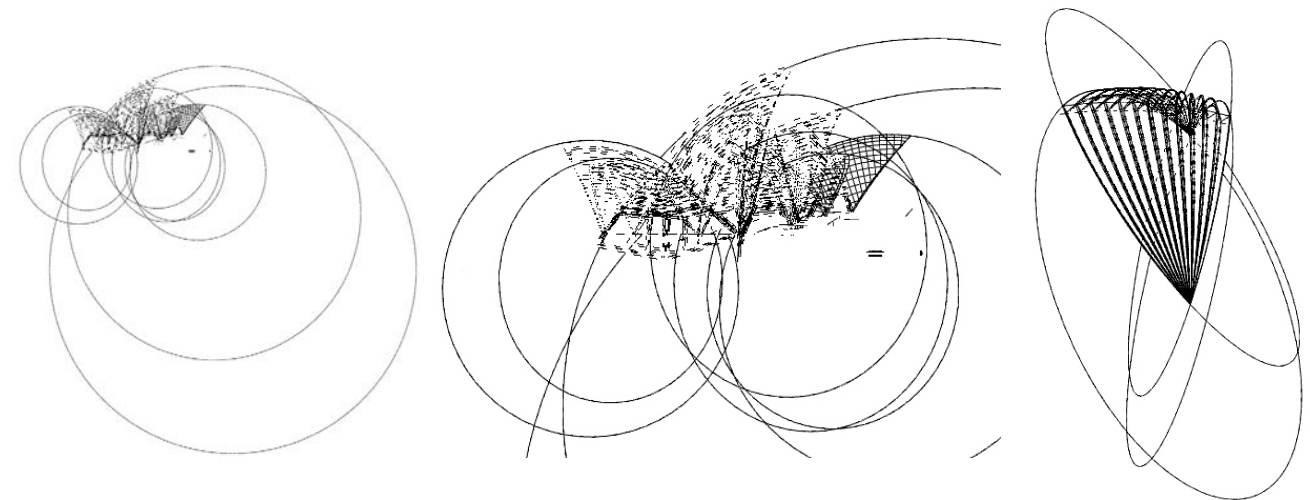
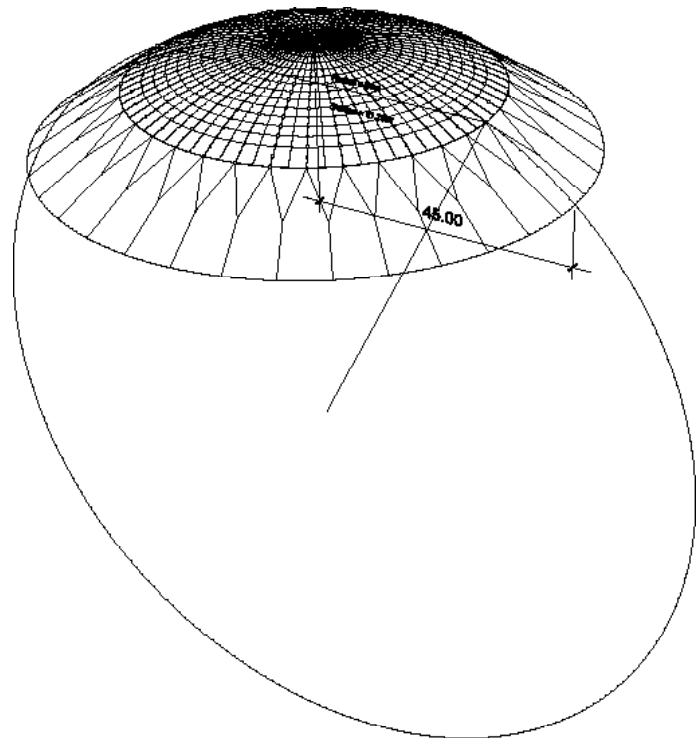
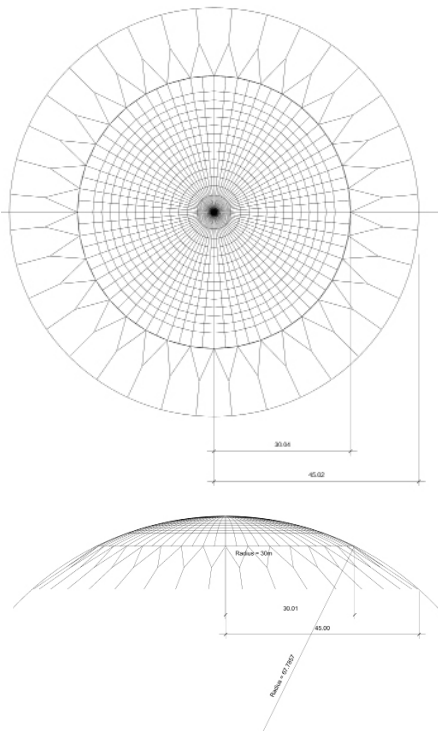
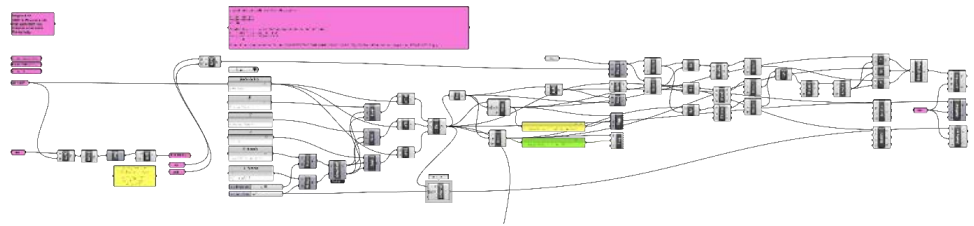


Fig. 3-1-17: Modelos paramétricos de cuatro proyectos generados mediante Grasshopper para Rhino. (Pagina Opuesta) Kresge Auditorio (1953), Mercado de Algeciras (1953), Pallazzo dello Sport (1960), Sydney Opera House (1975).


```
; (supm '(cuppol s (utrama s u) 0 pi2 0 9 240 90)
```

Incluir Formulación paramétrica de elipsoide del Mercado de Algeciras de 1933 (Torroja) utilizando Grasshopper para Rhino.

Formulación paramétrica de elipsoide del Kresge Auditorium de 1953 (Saarinen) utilizando LISP. Por Amadeo Monreal.

```
; funciones para generar la cupula de Saarinen.
(setq rsaar (* (/ sqr3 sqr2) 28))
(defun relipol (a b u)
  (sqrt (/ 1.0 (+ (expt (/ (cos u) (float a)) 2) (expt (/
(sin u) (float b)) 2)))))
)
(defun elipol (a b u)
  (prod (relipol a b u)
  (list (cos u) (sin u))
  )
)
(defun vora (r k u)
  (prod (gir2d (* 2 pip3 (pe (/ (+ u pip3) (* 2
pip3)))))
  (elipol (* r k) r (pers mpip3 pip3 u))
  )
)
; (corbap '(vora rsaar (/ 1.0 sqr3) u) 0 pi2 120)
(defun base (r k s u) (prod (* r s) (vora 1 (reglad
1.0 (float k) s) u)))

; (supm '(base rsaar (/ 1.0 sqr3) s u) 0 1 0 pi2 20
120)
(defun saarinen (r s u / bas xbas ybas)
  (setq bas (base r (/ 1.0 sqr3) s u) xbas (car bas)
ybas (nth 1 bas))
  (list xbas ybas (- (sqrt (- (* r r) (+ (* xbas xbas) (*
ybas ybas)))) (/ r sqr3)))
  )
; (supm '(saarinen rsaar s u) 0 1 0 pi2 20 120)
;|
(supm '(reglad (passa3dz0 '(vora rsaar (/ 1.0
sqr3)) s)
  (saarinen rsaar 1 s)
  u
  )
  0 pi2 0 1 120 10
)
;|
```

Propuesta de modelo geométrico para la cúpula del Glass Pavillon de Bruno Taut Contribución de Amadeo Monreal, 2015.

En este escrito se presenta una propuesta que pretende proporcionar un modelo verosímil de la estructura geométrica mediante la cual se organiza el diseño de la cúpula del Glass Pavillon, diseñado por Bruno Taut en 1914 para la Exposición de la Deutscher Werkbund celebrada en el Rheinpark de Colonia. La única información disponible es una colección de imágenes poco detalladas, por eso se describe el modelo como una propuesta verosímil, aunque, una vez obtenida la formulación, sería una tarea sencilla adaptar el modelo a las verdaderas medidas de la cúpula.

El volumen básico de la cúpula es medio elipsoide de revolución, con una base (ecuador del elipsoide) que es una circunferencia de radio r_0 y una altura h_0 que posteriormente se incrementa un poco hasta una altura h para presentar una cúspide más apuntada de la que resultaría del propio elipsoide. Sobre el elipsoide se construye un entramado de hélices constituido por una doble colección de las mismas, unas ascendiendo mientras giran en sentido antihorario y las otras haciéndolo en sentido horario, de modo que, al irse intersecando, producen un conjunto de “rombos” curvados. Una vez obtenidas las intersecciones, se discretizan las hélices, de modo que, entre dos intersecciones sucesivas, se sustituye el arco curvo de la hélice por un segmento recto. El último tramo de las hélices se substituye por un segmento recto dirigido a la cúspide. Para resolver el diseño, basta con formular las hélices, puesto que, con ellas, podemos obtener la lista de puntos de intersección a partir de la cual se podrán generar sin dificultad los “rombos”.

Para determinar los dos conjuntos de hélices, se parte de un tetradecágono regular (14 lados) inscrito en la circunferencia de la base. De cada vértice de dicho polígono parten dos hélices, una de cada conjunto, que van ascendiendo hasta la cúspide, cada una de un conjunto intersecándose con varias de las del otro conjunto.

Como las hélices, antes de discretizar, están sobre el elipsoide (después de discretizar, los puntos de intersección o vértices de los “rombos” siguen estando sobre el elipsoide, salvo el vértice de la cúspide, que queda un poco más elevado), para determinarlas basta con estudiar su proyección en planta, que tendrá, para cada una de ellas, el aspecto de una espiral que parte de un vértice del tetradecágono y tiende al centro de la base, girando de modo horario o antihorario según a qué conjunto pertenece. Si se consigue dar una formulación plausible de estas espirales (de hecho, basta conseguirlo para una sola de ellas, puestos que las demás se obtendrán de ésta por rotaciones de múltiplos de $\frac{360^\circ}{14}$ y por simetría), automáticamente se tendrán formuladas las hélices (hasta el

último vértice antes de la cúspide), utilizando la formulación cartesiana del elipsoide. En efecto, si $\vec{\sigma}(t) = (x(t), y(t), 0)$ es la formulación paramétrica de una espiral, como

la ecuación del elipsoide es $\frac{x^2}{r_0^2} + \frac{y^2}{r_0^2} + \frac{z^2}{h_0^2} = 1$, despejando la z , obtenemos que la

ecuación paramétrica de la hélice correspondiente es

$$\vec{\varphi}(t) = \left(x(t), y(t), h_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2(t)}{r_0^2} - \frac{y^2(t)}{r_0^2}} \right).$$

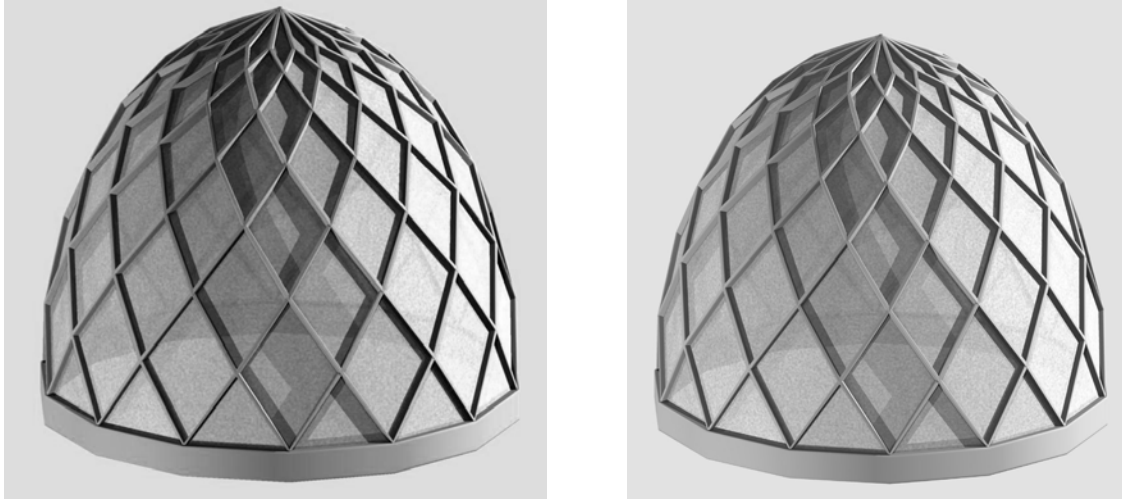


Fig.3-1-18: Modelamiento del proyecto Glass Pavilion de Bruno Taut.

Sólo falta por tanto, proporcionar una ecuación paramétrica para una espiral, que servirá de patrón.

Para fijar notación, se sitúa el tetradecágono centrado en el origen y con un vértice sobre el semieje positivo de las x 's, concretamente, en el punto $(r_0, 0)$, desde donde arranca la espiral patrón, que la tomaremos girando en sentido antihorario. Estudiando la escasa información gráfica de la que se dispone, se observa que la espiral describe un arco hasta llegar a un punto situado en el semieje positivo de las y 's, sea el $(0, r_1)$, con $r_1 < r_0$, desde donde sigue en línea recta hasta el origen de coordenadas (que es la proyección en planta de la cúspide de la cúpula). Los valores r_0 , r_1 , así como las alturas h_0 y h , se estiman a partir de las imágenes, pasando a ser parámetros de diseño que se podrán ajustar posteriormente sin dificultad, en caso de disponer de datos más precisos.

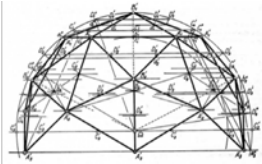
Así pues, la única tarea pendiente es formular el arco que va de $(r_0, 0)$ a $(0, r_1)$. A partir de algunas imágenes que resultaron engañosas, se intentó primero un arco de espiral de Arquímedes, pero resultó a simple vista incompatible con la cúpula real, porque las hélices arrancaban de la base con tangente inicial vertical, cosa que es obvio que no ocurre. Posteriormente se intentó un arco de circunferencia que arrancara, en el punto $(r_0, 0)$, tangente al polígono, pero ocurría lo mismo. Finalmente, un resultado plausible se encontró ajustando un arco de circunferencia que arrancara, en el punto $(r_0, 0)$, tangente a la circunferencia circunscrita al polígono. En tal caso, su centro está en un punto del semieje positivo de las x 's, sea el $(x_c, 0)$, con $x_c < r_0$, que equidista de

$(r_0, 0)$ y de $(0, r_1)$, y que se calcula sin dificultad: $x_c = \frac{r_0^2 - r_1^2}{2r_0}$. El radio de este arco es

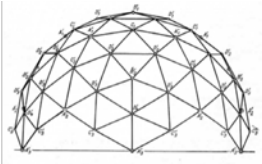
simplemente $\rho = r_0 - x_c$ y su rango angular va desde 0 hasta $\arccos\left(\frac{-r_1}{x_c}\right)$. Así pues, la

espiral se puede parametrizar como $\vec{\sigma}(t) = (x(t), y(t), 0) = (x_c + \rho \cos(t), \rho \sin(t), 0)$

para $t \in \left[0, \arccos\left(\frac{-r_1}{x_c}\right)\right]$.



3.1.2.e



CÚPULAS GEODÉSICAS

Fig. 3-1-19: Geometría base de las cúpulas geodésicas.

Las cúpulas geodésicas provienen de la Geodesia, que construye el estudio de la medida y la representación de la tierra. Las geodésicas podrían ser definidas como la representación de las rutas más cortas entre dos puntos contenidos en una superficie curva (incluidas las superficies esféricas), lo que permite representar esferas mediante líneas trazadas a lo largo de sus puntos de menor distancia. Son deducidas a partir de los grandes arcos, y requieren de métodos de cálculo basados en la trigonometría esférica.

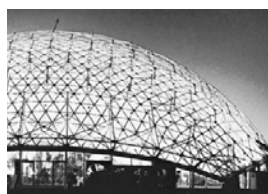
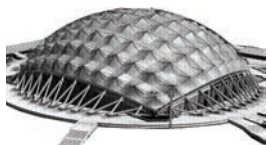
En lo referente a la disciplina arquitectónica, los esfuerzos por lograr construir formas de mayor resistencia con el mínimo de superficie, material, y peso, encontró su respuesta en las geodésicas. Estas estructuras fueron introducidas en la arquitectura desde 1922 para el Planetarium Zeiss 1, y se hacen más conocidas por el trabajo de Buckminster Fuller, quien utiliza geometrías platónicas en sistemas geométricos, estructurales y constructivos de alta sofisticación.

Basados en los volúmenes platónicos y en la triangulación, todos los casos de geodésicas estudiadas en los proyectos seleccionados se basan en el icosaedro. La familia de geodésicas estudiadas desarrollan un teselamiento mediante triangulación, construida por partes (miembros y nodos), por elementos similares repetidos en una malla en el espacio. A pesar de su apariencia regular y repetitiva, estas estructuras esconden complejas combinaciones de elementos similares pero disímiles, con fluctuaciones de tamaño significativas que se ajustan a adaptaciones continuas en la superficie.

1. 1923 Dyckerhoff y Widmann Walther Bauersfeld Zeiss I Dome.¹⁸
2. 1968 Candela, Palacio del Deporte
3. 1960 Murphy y Mackay, Climatron.
4. 1967 Fuller Montreal USA Pavilion

La cúpula de la Expo 67 de Montreal es una combinación de un triángulo regular de frecuencia 32 (Clase II, método 3) y alternado truncable de 16 frecuencia (Clase I, método 3).¹⁹

A continuación se desarrollan diversos métodos para deducir cúpulas geodésicas.



¹⁸ Consultar al respecto: Vinyes, Raül. Integrating Aesthetics And Statics: Study of a Geodesic Dome. Proyecto Tesina de Master Especialitat Estructures, RMEE, UPC. 2009. Pp.31-33.

¹⁹ Salsburg, J., and Clinton, J. "Geodesic Math." Design Scientist, n.d., Pp. 1–21.

Procedimiento para generar un modelo de cúpula geodésica.

Contribución de Amadeo Monreal, 2015.

En este escrito se describe brevemente un procedimiento algorítmico para generar un modelo de algunas de las cúpulas geodésicas existentes. Aunque no todas las cúpulas geodésicas se ajustan a este modelo, el concepto de algoritmo iterativo que aquí se presenta contiene ideas básicas comunes a otros modelos y, por tanto, fácilmente adaptables a otros casos.

El modelo se basa en el icosaedro regular centrado en el origen de coordenadas y consiste en un proceso iterativo de subdivisión de cada cara triangular en cuatro nuevas caras triangulares que substituyen a la anterior, tomando los puntos medios de cada lado, proyectándolos sobre la esfera circunscrita y generando los nuevos lados. En este modelo, se actúa sobre el icosaedro completo, de modo que se obtiene una “esfera geodésica”. La cúpula correspondiente se puede obtener más tarde tomando la parte de esfera que se requiera. Asimismo, se supone el icosaedro circunscrito en una esfera de radio 1 centrada en el origen de coordenadas; una vez generado el modelo, bastará con reescalarlo al radio que corresponda. También cabe resaltar que el hecho de partir del icosaedro se debe únicamente a que se pretende dar un modelo de cúpula geodésica, pero el algoritmo se puede adaptar a una colección inicial cualquiera de triángulos.

Procedimiento.

El procedimiento se basa en tres elementos principales:

1. Las colecciones de triángulos.
2. El algoritmo de subdivisión.
3. El módulo gráfico.

A partir de esta estructura, todo consiste en proporcionar como entrada una colección inicial de triángulos. A esta colección se le aplica el algoritmo de subdivisión y obtenemos como resultado de salida una nueva colección de triángulos. Siguiendo un típico proceso iterativo, esta nueva colección pasa a ser la colección de entrada de una nueva ronda de subdivisión y así sucesivamente, hasta que se decida detener el proceso; la colección obtenida después de la última iteración es el resultado final que se obtiene como salida del algoritmo. Sólo resta enviar esta colección de triángulos al módulo gráfico, que recorrerá la lista e irá generando en el software gráfico elegido cada uno de los triángulos. Queda simplemente concretar cómo se define y gestiona cada elemento.

1. Las colecciones de triángulos.

En este modelo, cada colección de triángulos, tanto la inicial como sus sucesivas iteraciones, se representan como una lista cuyos elementos son listas de tres puntos, que se interpretan como los vértices del triángulo. Si, como se ha comentado, los triángulos deben formar parte de una cúpula geodésica inscrita en una esfera de radio 1 centrada en el origen, debe garantizarse que todos los puntos de todas las listas se mantengan a distancia 1 del origen de coordenadas. En cada iteración, la lista anterior queda substituida por una nueva formada por los nuevos triángulos resultantes de subdividir los anteriores. En el caso que nos ocupa, la colección inicial contiene la lista de los 20 triángulos de un icosaedro, representados cada uno como una lista con tres puntos, cada punto dado por sus coordenadas cartesianas, calculadas previamente.

2. El algoritmo de subdivisión

Este algoritmo inicializa una lista nueva, en principio vacía, recorre la lista que se le suministra y, por cada elemento que encuentra (que formalmente será una lista con tres puntos) genera cuatro listas nuevas de tres puntos que añade a la lista nueva. Al final retorna esta lista nueva con todos los nuevos triángulos. Con más detalle, un elemento típico de una colección sería una lista como la siguiente:

((0, 0, 1) (0.894427, 0, 0.447214) (0.276393, 0.850651, 0.447214))

que, en este caso, es uno de los cinco triángulos del icosaedro inicial que tienen un vértice en el “polo norte” (punto (0, 0, 1)).

En general, cada triángulo será una lista del tipo (P_0, P_1, P_2) . A partir de ella, el algoritmo calcula tres nuevos puntos P_{01} , P_{02} y P_{12} , de modo que el punto P_{ij} es el punto medio entre el P_i y el P_j , posteriormente proyectado a la esfera unidad,

es decir, $P_{ij} = \frac{M_{ij}}{\|M_{ij}\|}$, donde $M_{ij} = \frac{1}{2}(P_i + P_j)$ y $\|M_{ij}\|$ significa la norma de

M_{ij} .

A continuación el algoritmo crea cuatro listas nuevas: (P_0, P_{01}, P_{02}) ,

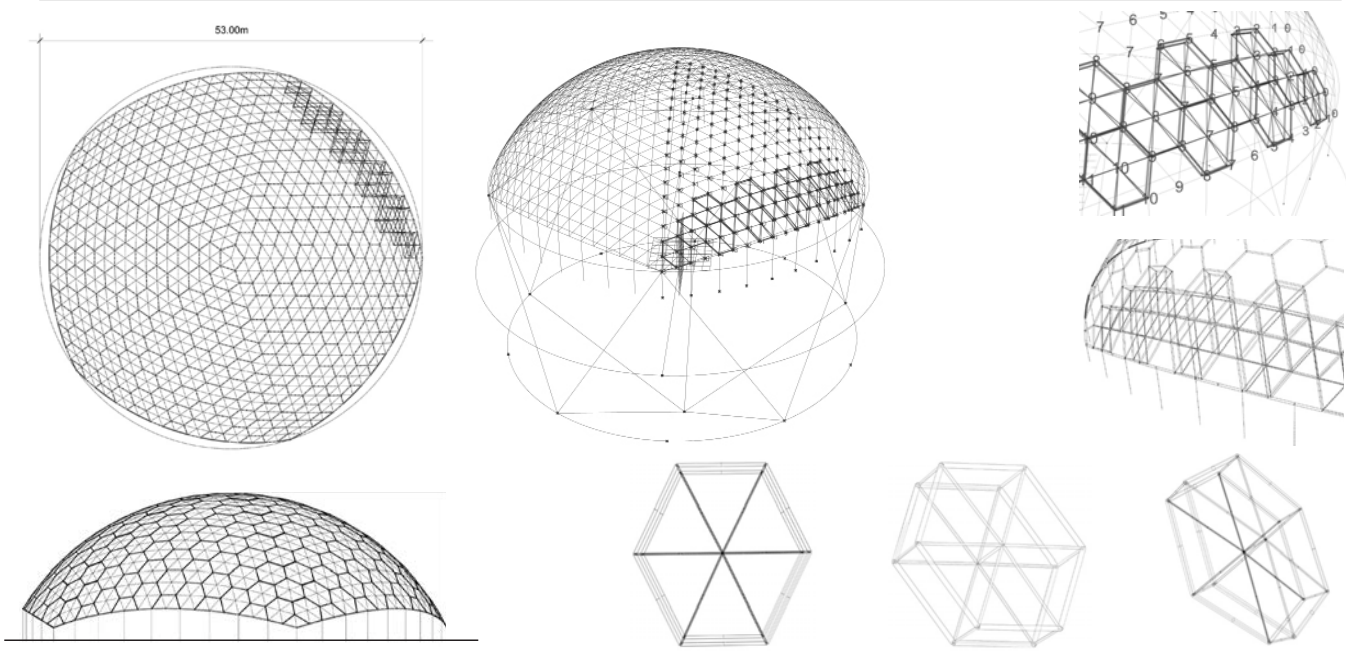
(P_{01}, P_1, P_{12}) , (P_{12}, P_{02}, P_{01}) y (P_{02}, P_{12}, P_2) , que corresponden a los cuatro

triángulos en que ha quedado subdivido el inicial y que añade a la lista nueva que había inicializado. Cuando termina el ciclo, se obtiene una lista que contiene todos los nuevos triángulos y sólo ellos. A esta nueva lista, como tiene el mismo formato que la anterior, se le puede volver a aplicar el algoritmo de subdivisión y así sucesivamente. Un programa adicional, que es el que invocará el usuario, pedirá como *input*, la lista inicial y el número de iteraciones, aplicara este número de iteraciones a la lista y devolverá la lista final, que pasa a...

3. El módulo gráfico.

Este módulo simplemente recorre la lista que se le proporciona y va generando todos los triángulos que “lee”. Según el software elegido, los dibujará como una cara 3D, como una polilínea, como tres líneas independientes, les podrá dar grosor o no, etc.

Formulación paramétrica de cúpulas geodésicas del Climatron de 1960 utilizando Grasshopper para Rhino.



```

Special Functions - Definition - Parametric Equation
a = semimajor axis
b = semiminor axis
c = height
Functions for u, v, z, where u is [0, 2pi] longitude and v is [0, pi/2, pi/2] latitude.
r = a * cos u / cos v - b * sin u / cos v
z = c * tan v
r = c * tan v

```

Fuente: Amador Manuel Pujadas. PARAMETRIZADO DE CONIGUES I QUADRIQUES. DEA Dept. #Estructuras e F. Arquitectur. ETB&B. UPC. Pag. 4.

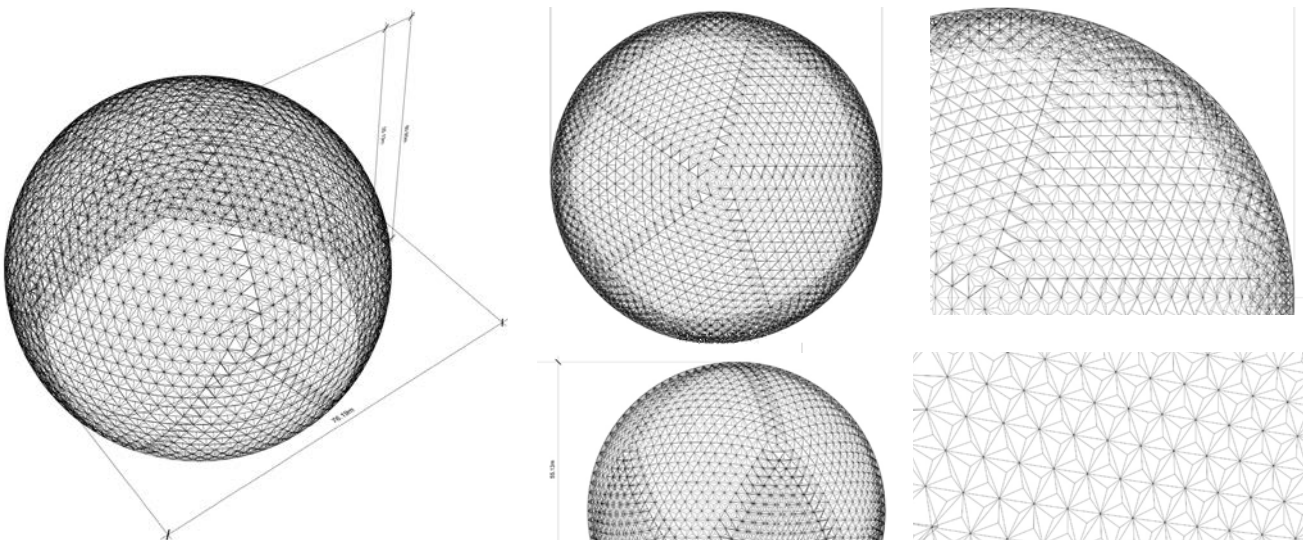
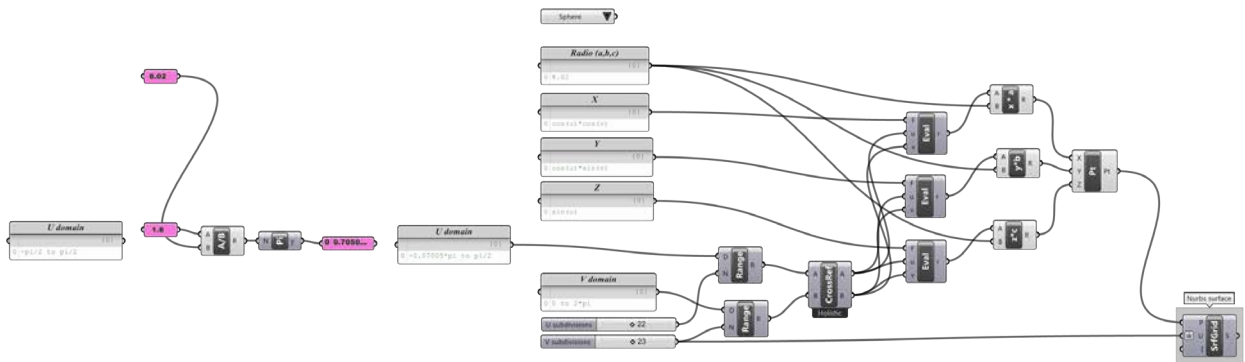


Fig. 3-1-20: Modelos paramétricos de 3 proyectos generados mediante Grasshopper para Rhino. (Arriba) Climatron (1960), (Mitad) Palacio de Deportes (1968) y Zeiss 1 (1922). 113

Formulación paramétrica de Geodésicas de la cúpula Zeiss I Dome de 1923 (Dyckerhoff y Widmann Walther, Bauersfeld) utilizando LISP. Por Amadeo Monreal.

```

; funciones para producir cupulas geodesicas
;|
datos iniciales
cosico y sinico = coseno y seno del angulo (desde el
centro de la esfera circunscrita)
entre dos vertices adyacentes del icosaedro.
apent=2Pi/5=angulo de una "porcion" de pentagono
regular
;|
(setq cosico (/ 1 (sqrt 5)) sinico (/ 2 (sqrt 5)) apent (/ pi2
5))
; lista de vertices de un icosaedro: n=norte, s=sur. Radio
circunscrito=1
(setq pn0 eee3
  pn1 (list sinico 0 cosico)
  pn2 (prod (gir3dz apent) pn1)
  pn3 (prod (gir3dz (* 2 apent)) pn1)
  pn4 (prod (gir3dz (* 3 apent)) pn1)
  pn5 (prod (gir3dz (* 4 apent)) pn1)
  ps0 (prod -1 pn0)
  ps1 (prod -1 pn3)
  ps2 (prod -1 pn4)
  ps3 (prod -1 pn5)
  ps4 (prod -1 pn1)
  ps5 (prod -1 pn2)
)
; coleccion de triangulos de un icosaedro=coleccion
inicial
(setq colec0
  (list (list pn0 pn1 pn2)
        (list pn0 pn2 pn3)
        (list pn0 pn3 pn4)
        (list pn0 pn4 pn5)
        (list pn0 pn5 pn1)
        (list pn1 ps1 ps2)
        (list ps2 pn2 pn1)
        (list pn2 ps2 ps3)
        (list ps3 pn3 pn2)
        (list pn3 ps3 ps4)
        (list ps4 pn4 pn3)
        (list pn4 ps4 ps5)
        (list ps5 pn5 pn4)
        (list pn5 ps5 ps1)
        (list ps1 pn1 pn5)
        (list ps0 ps2 ps1)
        (list ps0 ps3 ps2)
        (list ps0 ps4 ps3)
        (list ps0 ps5 ps4)
        (list ps0 ps1 ps5)
  )
)
; funcion para subdividir un triangulo esferico cualquier
era en cuatro
; tri ha de ser una lista de tres puntos 3d, de norma 1.
; la funcion vn1 normaliza a 1 la norma de un vector.
(defun subdivtr (tri / pun0 pun1 pun2 pun01)
  (setq pun0 (nth 0 tri) pun1 (nth 1 tri) pun2 (nth 2 tri))
  (setq pun01 (vn1 (prod 0.5 (summat pun0 pun1)))
        pun02 (vn1 (prod 0.5 (summat pun0 pun2)))
        pun12 (vn1 (prod 0.5 (summat pun1 pun2)))
  )
  (list (list pun0 pun01 pun02)
        (list pun01 pun1 pun12)
        (list pun12 pun02 pun01)
        (list pun02 pun12 pun2)
  )
)
; ejemplo: (subdivtr (list pn0 pn1 pn2))
; funcion para dibujar una coleccion de triangulos
(defun dibcolectri (colectri / lcol icol tri)
  (setq lcol (length colectri) icol -1)

```

```

(versa0)
(repeat lcol
  (setq tri (nth (setq icol (1+ icol)) colectri))
  (command "_3dpoly" (nth 0 tri) (nth 1 tri) (nth 2 tri) "c")
)
(versant)
)
; ejemplo, la subdivision de un triangulo:
; (dibcolectri (subdivtr (list pn0 pn1 pn2)))
; funcion para subdividir una vez todos los triangulos de
una coleccion.
; devuelve la nueva coleccion de triangulos, sin la antigua.
(defun subdivcol1 (col / colant colnov lcol ncol)
  (setq colant col colnov nil lcol (length col) ncol -1)
  (repeat lcol (setq colnov (append colnov (subdivtr (nth
    (setq ncol (1+ ncol)) colant))))
    colnov
  )
)
; ejemplos
; (subdivcol1 colec0)
; (dibcolectri (subdivcol1 colec0))
; funcion para iterar n veces la subdivision de una coleccion
de triangulos
(defun subdivcoln (col n / colnova)
  (setq colnova col)
  (repeat n (setq colnova (subdivcol1 colnova)))
  colnova
)
;|
; ejemplo, el propio icosaedro (0 iteraciones de subdivision):
(dibcolectri colec0)
; ejemplos, de 1 a 5 iteraciones de subdivision
(dibcolectri (subdivcoln colec0 1))
(dibcolectri (subdivcoln colec0 2))
(dibcolectri (subdivcoln colec0 3))
(dibcolectri (subdivcoln colec0 4))
(dibcolectri (subdivcoln colec0 5))
;|
; una esfera al 95% del radio para facilitar la vision de las
"barras" de la cupula
; (supm '(velip 0.95 0.95 0.95 s u) 0 pi2 mpip2 pip2 120 89)
;|
;|
pruebas de mejora
(setq colec1
  (list (list pn0 pn1 pn2)
        (list pn0 pn2 pn3)
        (list pn0 pn3 pn4)
        (list pn0 pn4 pn5)
        (list pn0 pn5 pn1)
  )
)
(defun dibcolectri4 (colectri / lcol icol tri ii)
  (setq lcol (length colectri))
  (versa0)
  (cond
    ((= lcol 1)
     (progn
      (setq tri (nth 0 colectri))
      (command "_3dpoly" (nth 0 tri) (nth 1 tri) (nth 2 tri) "c")
     )
    )
    ((= lcol 4)
     (progn
      (setq tri (nth 2 colectri))
      (command "_3dpoly" (nth 0 tri) (nth 1 tri) (nth 2 tri) "c")
     )
    )
    (t
     (progn
      (setq icol -1)
      (repeat (/ lcol 16)
        (setq icol (1+ icol) ii (+ 2 (* 16 icol)))
        (setq tri (nth ii colectri))
        (command "_3dpoly" (nth 0 tri) (nth 1 tri) (nth 2 tri)
          "c")
      )
      (setq tri (nth (+ ii 4) colectri))
      (command "_3dpoly" (nth 0 tri) (nth 1 tri) (nth 2 tri)
        "c")
    )
  )
)

```

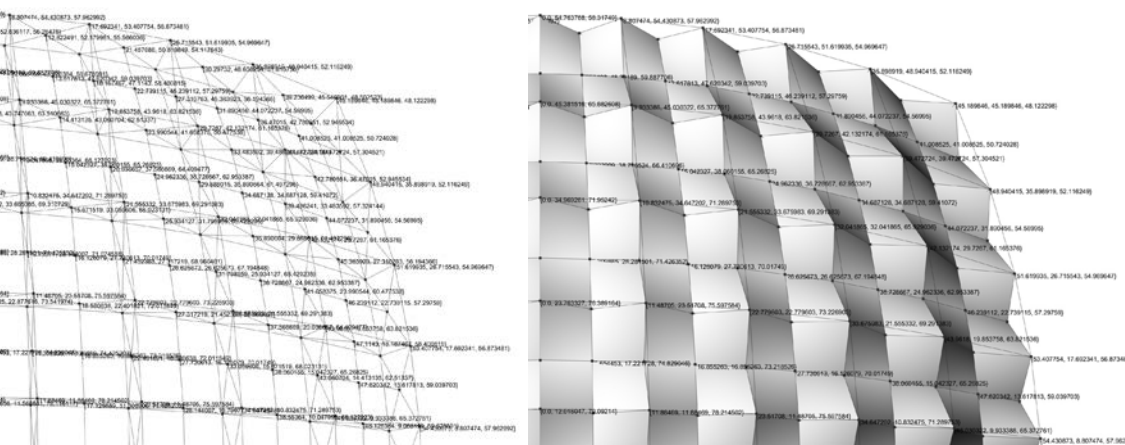
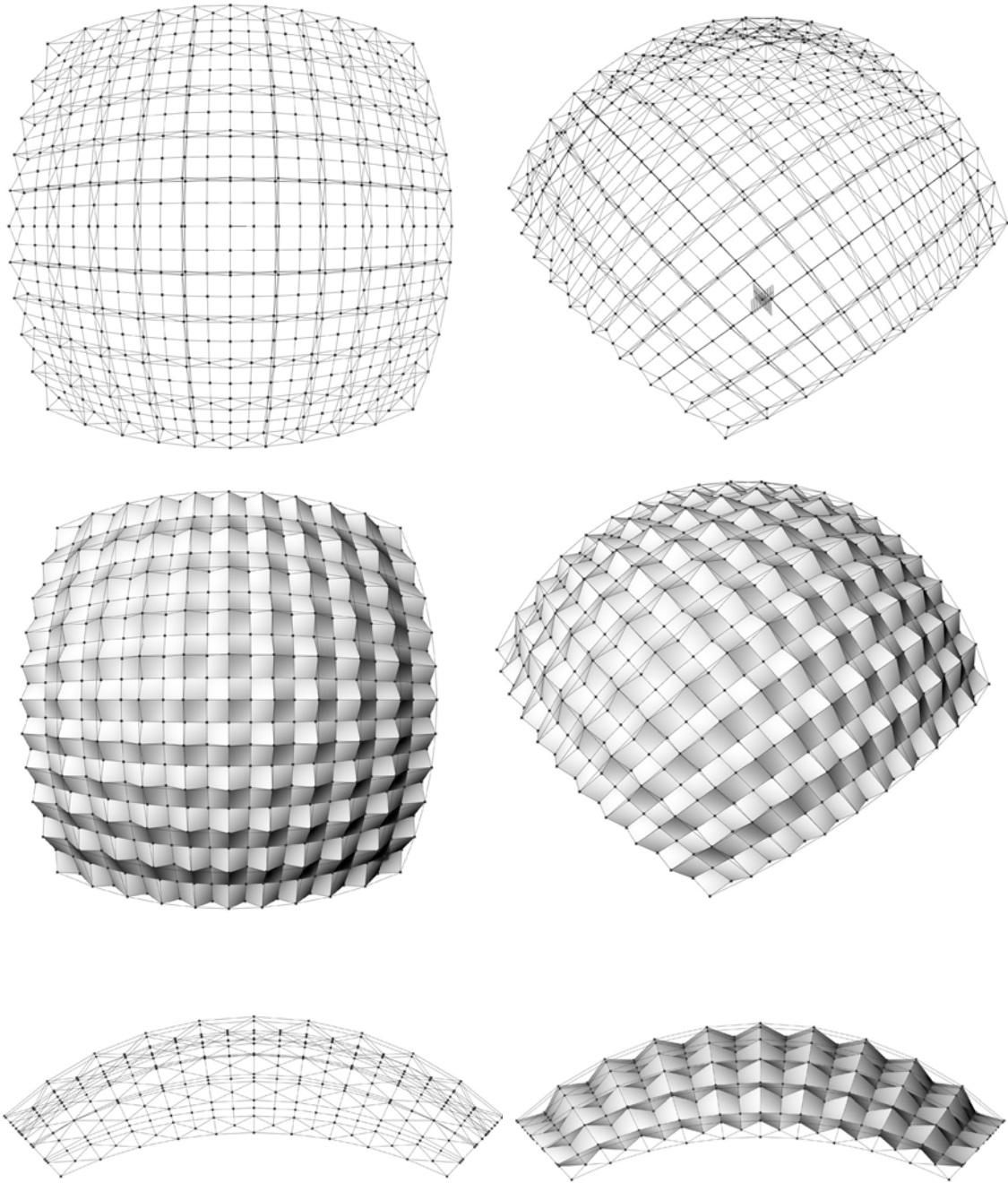



Fig. 3-1-21: Modelos paramétricos generados mediante Grasshopper para Rhino. Palacio de Deportes (1968).



RESULTADOS

Este capítulo ha explorado el uso de las lógicas matemáticas en un grupo de proyectos, con los siguientes resultados:

1. Familias geométricas:

Es posible confirmar que los proyectos estudiados fueron concebidos mediante geometrías relativamente simples, y generados utilizando formulas matemáticas a partir de algoritmos conocidos. Se aprecia el uso de las siguientes familias geométricas: paraboloides hiperbólicos (18%), otras superficies regladas (16%), elipsoides (14%), cilindros parabólicos (11%), geodésicas (9%), hiperboloides (9%), paraboloides elípticos (7%), planos plegados (4%), catenarias (4%).

Si bien algunas de estas geometrías se han catalogado dentro de las geometrías no-euclidianas, se ha comprobado que los métodos de cálculo implementados permitían que fuesen deducidas mediante formulas dentro de los confines de la geometría euclidiana. Permitían además, ser construidas físicamente basándose en simples líneas y puntos.

2. Deducciones paramétricas:

Es importante establecer que existen algunos conceptos claves referente a las matemáticas: formulación paramétrica, y el uso de parámetros.

Las geometrías utilizadas pertenecen en su mayoría al mundo de las superficies cuádricas, las que se caracterizan por su facilidad de ser deducidas mediante cálculos simples a partir de formulas que pueden ser fácilmente formuladas en con su formula paramétrica, y por tanto, ajustadas de acuerdo a parámetros cambiantes. El uso sistemático esta estrategia facilita enormemente la definición de la geometría general de los proyectos, así como el dimensionamiento de cada una sus partes. Para ello, se identifican los parámetros relacionados con las formulas, donde las funciones dependientes $x(s,t)$, $y(s,t)$, $z(s,t)$, proporcionan puntos en el espacio que definirán las superficies.

Los parámetros son los elementos que proporcionarían datos específicos de cada proyecto, como luz, altura, radios, apoyos, flechas, etc., se expresan en valores (a,b,c) , o bien con planos u & v .

Es importante aclarar que, debido a que los proyectos se encuentran comúnmente documentados mediante sistemas de representación ortogonal, los datos obtenidos son reducidos y se limitan a medidas generales (ancho, largo, altura). Para el uso de este tipo de geometrías, resulta indispensable proporcionar mas detalles, como radios, ángulos, particiones intermedias, y una descripción geométrica específica.

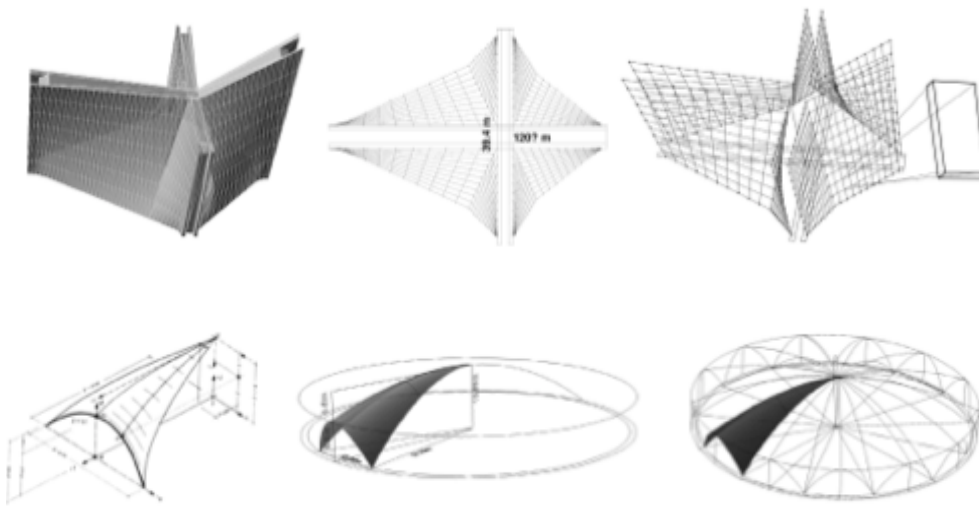


Fig. 3-1-22: Modelos paramétricos de 2 proyectos: (1) Top: K. Tange's St. Mary's Cathedral Church, Tokyo, (1963), and (2) Bottom: L. Simon & A. Morisseau's Royan Market (1955), (Bravo, 2013).

3. Discretización o subdivisión:

Una vez establecida la geometría subyacente y su formulación matemática, se procede a la subdivisión de las superficies en componentes más pequeños, en un proceso que consiste en la definición de partes a partir del todo, denominado discretización. Estos sistemas de partición establecen el número de componentes, constituyéndose en sistemas basados en repetitivas iteraciones, los que han sido también descritos como teselaciones. Las repetitivas iteraciones de un número de componentes del conjunto, aparecen en forma de retículas, triangulaciones, particiones radiales, hexagonales, etc.

Se detectan las siguientes estrategias:

1. Subdivisión a partir de geometría base;
2. Partición como un sistema geométrico independiente a la geometría base (subsistema);
3. Formulación de un sistema geométrico híbrido de subdivisión;
4. Uso de arrays (polares o en grillas), como estrategia estabilizadora de la forma;

Se aprecia un uso fluctuante del número de componentes base, el que está comúnmente definido geoméricamente como la unidad básica de partición o subdivisión de una superficie, y las estrategias básicas de subdivisión definidas son: el cuadrilátero (20%); bóvedas de cañón (20%); triangulación (15%); lineales (10%); costillas (10%); e irregular (5%).

Es importante aclarar que el establecimiento del módulo base no solo

obedece a factores matemáticos o estéticos, sino que se encuentran fuertemente condicionados por otras consideraciones de aspectos constructivos, estructurales, o de materialidad, ya que supone un proceso o método de optimización de algún criterio específico. En el caso de Nervi, se asocian dos parámetros precisos: curvatura y elementos prefabricados de ferrocemento con limitantes de tamaño en su producción, y su comportamiento estructural. En el caso de Shukhov, por el largo y sección de los perfiles metálicos. Para Arup en el Sidney Opera House, fue el tamaño de las costillas prefabricadas que debían de ser posicionadas mediante grúas telescópicas. Estas consideraciones se convertirían en preocupaciones de gran repercusión en los proyectos, las que serán abordadas en los capítulos siguientes.

4. Secuencia de trabajo:

El proceso de deducción de formas, desde la aplicación de ciertas geometrías, la definición de sus formulas a partir de parámetros específicos, y la subdivisión de sus partes, permite establecer una clara secuencia de trabajo. El encadenamiento de la información resulta crítico, porque permite que con tan solo unos datos básicos, se puedan deducir formas de cierta complejidad geométrica, a la vez que se posibilita su precisa descripción numérica. Estas secuencias de instrucciones, que si bien en muchos casos podrían ser organizadas de varias maneras, deben de cumplir con ciertos protocolos en su formulación, y por tanto resulta esencial su formulación, organización, secuencia y manejo de datos.

5. Parametrización como estrategia formal del proyecto:

Estos protocolos posibilitan además, que con tan solo cambiar ciertos parámetros, se puede ajustar la totalidad de la morfología. Este proceso resulta clave para ciertos autores, porque varios proyectos pueden de ser deducidos con las mismas formulaciones paramétricas, como es el caso de las torres de Shukhov, los paraboloides hiperbólicos de Candela, o la serie de cáscaras que confirma el Sydney Opera House. Dentro de los confines de este estudio, en algunos casos incluso se han podido utilizar las mismas definiciones paramétricas para deducir formas de distintos proyectos.

A continuación se discuten estos resultados en las conclusiones.

EL DISEÑO MATEMÁTICO DE LAS FORMAS

“La matemática es un lenguaje pero no solo eso. También es herramienta y método, aunque eso tampoco es todo. Nace en el interior de una mente en particular pero es universal, como la música. Su estructura tiene una belleza y una coherencia sublimes, pero no es arte ni es ciencia. La matemática calcula, resuelve, cuenta, ordena, clasifica, organiza, comprende, describe, conjetura, demuestra, deduce, induce, abstrae, concreta, generaliza, analiza, sintetiza, pregunta, responde, anticipa, registra, simula, proyecta, transforma, ilustra, intuye, instruye, juega, deleita,... todo eso hace la matemática”

Wagensberg, Jorge. La matemática en aforismos, 2014.

Este capítulo ha confirmado que la búsqueda de una variedad de formas arquitectónicas durante el Siglo 20, encuentra en las matemáticas un territorio fértil de experimentación, por una serie de razones.

En primer lugar, las matemáticas habían desarrollado una variedad de formas que fácilmente se podrían definir mediante cálculo simple, a través de una serie de fórmulas y algoritmos basados en el conocimiento antiguo de la geometría, que proporcionaron una clara metodología y secuencia de instrucciones. En segundo lugar, estas formas matemáticas pueden ser parametrizados y ajustarse fácilmente al tamaño de cada proyecto con solo enunciar unos parámetros básicos. En tercer lugar, muchas de estas formas podrían ser subdivididas en elementos numéricos más pequeños en un proceso llamado discretización, lo que hizo su aplicación a escala arquitectónica altamente factible, ya que facilitaba el cálculo y la definición de partes más pequeñas que se relacionaban fácilmente con elementos constructivos. Por último, las formas matemáticas ofrecían curvaturas que mostraron mayor resistencia estructural, y presentaron una admirable oportunidad para la búsqueda de una economía y una mayor eficiencia en el uso de material.

Sin embargo, el proceso de traslación desde las matemáticas a la arquitectura en los proyectos seleccionados durante el Siglo 20 se manifiesta con ciertas ambigüedades, conflictos y debilidades, las que se exponen a continuación.

En los proyectos analizados, la definición matemática ha demostrado ser fuertemente decisiva para la implementación y la definición de la mayor parte de los componentes del proyecto. Este estudio confirmó que el primer paso necesario para derivar correctamente la reconstrucción digital de

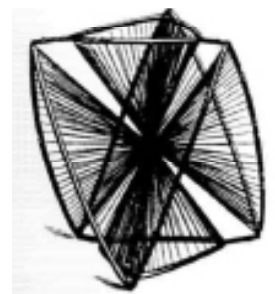


Fig. 3-1-23: Tres ilustraciones de modelos matemáticos de un catálogo alemán en la biblioteca personal de Le Corbusier. Fuente: Treib, Marc. Space Calculated in Seconds: The Philip Pavilion Le Corbusier. Esdar Varesse. Pag.22.

los proyectos es la formulación de una correcta descripción matemática.

La relevancia de las matemáticas fue enunciada repetidamente por varios de los arquitectos e ingenieros autores.

Torroja insistía en la necesidad de utilizar las matemáticas para definir los puntos en las superficies, debido a los problemas de representación inherente a las formas que debían de ser descritas mediante dibujos en planos.

Candela creía que la clave del diseño y la construcción de cascarones residía en complicados cálculos matemáticos, que intento comprender y dominar, a tal punto de conseguir una beca para trasladarse a Alemania a estudiarlos ²⁰. Candela utiliza extensamente la geometría de los paraboloides hiperbólicos, cuya particular facilidad de construcción a partir de líneas rectas definió gran parte de su obra. Existen testimonios que confirman que el mismo desarrollaba los cálculos matemáticos durante largas horas, llegando incluso a utilizar los primeros computadores en la década de 1960. ²¹

Le Corbusier sería quien ha identificado la relevancia de las matemáticas aplicadas a la arquitectura, cuando en 1956 le escribe al Director del Federal Technical Institute en Zurich para solicitar su amable asistencia y sugerir libros que ilustren representaciones tridimensionales de funciones matemáticas, del que un arquitecto podría consultar un “catálogo de formas” y hacer una elección sin ninguna preocupación de su sofisticación matemática. ²² El Director responde sugiriendo el libro Eugen Jahnke and Fritz Emde, *Tables of Functions with Formulae and Curves*. ²³ En la biblioteca personal de Le Corbusier se han encontrado también otros importantes libros sobre matemáticas.

Pero sin lugar a dudas, fue en el proyecto del Sydney Opera House donde la ausencia de una definición matemática alcanzo su máxima repercusión. El arquitecto Jorn Utzon y la ingeniería de Ove Arup demoran hasta 2 años en evolucionar desde el modelo original presentado en el concurso hasta el modelo matemático final. La inviabilidad del diseño de cascarones con espesor constante que fueron dibujados a mano alzada para el concurso se hizo evidente, lo que obliga a considerar perfiles parabólicos y elipsoidales, los que posteriormente fueron rechazados por la complejidad de sus encofrados, hasta finalmente llegar al conocido esquema de segmentos esféricos a partir de un radio constante. Solo cuando la geometría esférica fue claramente enunciada, se posibilita la construcción del proyecto, ya que proporcionaba un gran control que permitió subdividir los cascarones en componentes que pudieron ser producidos a máquina bajo un estricto control de dimensiones y de calidad.

Las matemáticas se convierten en una herramienta que proporciona modelos “abstractos”, que permitieron proliferar una lógica a partir de una sólida base científica, permitiendo variaciones en base a parámetros cambiantes. Si bien las lógicas matemáticas proporcionaron una base sólida desde donde operar, estas estrategias geométricas no aparecen del todo coherentes en algunos proyectos, porque mientras algunos autores apr-

20 Cassinello Plaza, Ma. Josefa. *Félix Candela : Centenario 2010 : La Conquista de La Esbeltez*. Madrid : Fundación Juanelo Turriano, 2010. p. 10.

21 *Félix Candela : Dorothy Candela*. Princeton University Art Museum. 2008 [viewed June 13, 2015]. Available from: <http://artmuseum.princeton.edu/legacy-projects/Candela/dorothy.htm>

22 Treib, Marc. *Space Calculated in Seconds: The Philip Pavilion*. Princeton, [NJ] : Princeton University, 1996. p. 22.

23 Jahnke, Eugene; Emde, Fritz. *Tables of Functions with Formulae and Curves*. New York : Dover Publications. 1945.

ovechan las ventajas intrínsecas de ciertas geometrías, estos beneficios aparecen como oportunidades tristemente desaprovechadas en otros casos. Por ejemplo, el predominio de superficies regladas es evidente cuando se asocia a la construcción de hormigón, debido a las ventajas que expone para su encofrado de ser construido a partir de líneas rectas, una estrategia reiterada en varios proyectos de Candela. O bien en la implementación de geodésicas, que se construyen a partir de elementos lineales estandar. Sin embargo, en otros casos, las condiciones ventajosas desde una perspectiva matemática no aparecen reflejadas en sus sistemas estructurales o constructivos, como el caso de las superficies regladas de doble curvatura de Tange (St. Mary Cathedral), Pei (Luce Chapel), las que tienden al uso de curvas y por tanto dificulta enormemente su construcción.

A su vez, los proyectos tendían hacia una cierta estandarización y regularización de las superficies, lo que se entiende bajo limitaciones y estrictas consideraciones constructivas de su tiempo. En este sentido, sería conveniente profundizar en las estrategias matemáticas utilizadas en cada familia de proyectos. Se aconseja revisar las bases geométricas con herramientas computacionales, para detectar si es posible optimizar ciertas soluciones, y verificar que la respuesta geométrica fue la mas acertada en su resolución.

A partir del Siglo 19 y a lo largo del Siglo 20 se inicia una búsqueda de formas singulares con curvaturas y plegados, que evidencian la posibilidad de incorporar un repertorio de formas con mayor resistencia y eficiencia. Si bien este no es un problema nuevo para la arquitectura, que posee una larga historia con los abovedamientos de cúpulas y bóvedas, la singularidad de estos acontecimientos residió en la búsqueda de superficies activas que pudiesen trabajar a compresión o tensión según su curvatura, lo que permite optimizar tanto los esfuerzos a los que esta sometido, la distribución eficiente del material, y el posicionamiento de las armaduras en hormigón armado. Esta estrategia ha sido explorada ampliamente en varios proyectos, y encontraría respuestas sorprendentes.

Algunos arquitectos e ingenieros enuncian las ventajas de las formas de manera explícita. Candela explora el uso de superficies curvas porque afirma que serán siempre las mas resistentes, y argumenta que esa es la razón porque los caracoles son curvos o las carrocerías de los automóviles son mas seguras si se diseñan con piezas de metal curvas. Asimismo, Freyssinet implementa nuevas configuraciones formales con láminas de hormigón armado, introduciéndoles ondulaciones o plegaduras con el fin de obtener la rigidez necesaria a flexión para conseguir grandes luces, transformando en doble curvatura lo que convencionalmente hubiera sido una lámina de curvatura simple reforzada por nervios. También aparecen estrategias como la intersección de diversas superficies con curvatura, con el propósito de estabilizar o reforzar la forma, como en el caso de Torroja.

Las superficies con curvaturas asociadas a su comportamiento estructural permiten su clasificación en anticlásticas, sinclásticas, y monoclásticas.

Este proceso se inicia mediante la identificación de una familia geométrica, con su fórmula matemática asociada, la que se comprueba mediante el uso de scripts que incorporan las dimensiones de cada proyecto. Rápidamente se hace evidente que algunos proyectos comparten una geometría de base, y que algunas familias son utilizadas mas frecuentemente.

La selección y agrupación de los proyectos según familias geométricas ha permitido la identificación y el enunciado de las formulas matemáticas utilizadas por los autores en cada proyecto, basados en algoritmos conocidos.

Su implementación en proyectos específicos supone una cierta familiaridad con un pensamiento deductivo algorítmico, y ha representado cierta dificultad para el proceso de reformulación de los proyectos. La deducción de parámetros se ha realizado a partir de datos generales existentes en puntos críticos (altura, vértices, luces), con la dificultad que gran parte de estos proyectos no cuentan con planimetría disponible que permita deducir información precisa sobre sus parámetros geométricos.

Es importante señalar que a pesar del hecho de que muchas de las formas de estos proyectos se consideran como geometrías no euclidianas, la totalidad de los cálculos en esta tesis han sido deducidos mediante el uso de fórmulas en el sistema euclidiano de cálculo, porque era el sistema comúnmente utilizado en su época, o porque se ha verificado su uso en algunos cálculos originales. A este respecto, es importante considerar que en la actualidad existen formulaciones matemáticas más eficientes y sofisticadas para su cálculo y optimización, lo que ofrece un interesante campo para futuras investigaciones.

Las fórmulas matemáticas más recurrentes fueron los paraboloides hiperbólicos y los hiperboloides, una situación que puede ser explicada por sus capacidades inherentes al ser generadas por líneas rectas, lo que facilitó en gran medida su construcción. Las cúpulas geodésicas también aparecen como mallas tridimensionales que se construyeron por líneas con la menor cantidad de material posible. Se evidencia también el uso predominante de elipses, cilindros parabólicos, paraboloides elípticos, planos plegados, y catenarias, aunque presentan algunos desafíos en su implementación. Se utilizaron en un menor grado las sinusoides. Más importante aún, estas formas permitían su construcción sencilla físicamente basado en líneas y puntos, lo que resulta crítico para su implementación constructiva, como también las consideraciones de materialidad, y las configuraciones de sus elementos constructivos.

El uso de algoritmos matemáticos permitió implementar la continua optimización de una solución, mediante el manejo de los datos para determinar la forma y controlar sus partes constituyentes, reposicionando las matemáticas en un lugar protagónico dentro del diseño arquitectónico.

Las ecuaciones paramétricas ocurren en el espacio cartesiano de 3 dimensiones, donde los puntos $x(s,t)$, $y(s,t)$, $z(s,t)$, describen el recorrido (trayectoria) de una curva, lo que comúnmente se describe dentro de un espacio vectorial euclidiano definido por vectores con magnitud y dirección.

En los proyectos estudiados, las formulaciones paramétricas se han basado mayoritariamente en construcciones euclidianas, las que exhiben un prolífico uso de la trigonometría, enunciada en base a planos de referencia, líneas y puntos.

Durante la etapa de desarrollo de enunciados matemáticos para cada proyecto, las formulaciones paramétricas han permitido utilizar un mismo algoritmo para deducir varios proyectos con tan solo cambiar ciertos parámetros o variables.

La definición de parámetros claros y precisos trabajando con intervalos, ha proporcionado un sentido de límites o "áreas de trabajo", los que se relacionan con el valores de luces (diámetros o radios), alturas, y a la construcción de puntos de referencia. Esta estrategia ha permitido el ajuste de acuerdo con la modificación consecutiva de sus parámetros. También ha permitido subdividir ciertas partes en componentes más pequeños, en un fenómeno

llamado discretización, lo que resulta una ventaja para definir el correcto tamaño de los miembros acorde a los sistemas de producción de partes para su construcción.

Las formulaciones algorítmicas proporcionan al mismo tiempo una lógica consistente, una secuencia de trabajo, una clara metodología, y una correlación entre elementos interdependientes, que permiten trabajar dentro de un sistema de parámetros cambiantes que permitía ser general, y a la vez, altamente específico.

La búsqueda de geometrías radicales en las matemáticas también se relacionaron con el estudio y el entendimiento del espacio, porque la aparición de la geometría no euclidiana propone la exploración de un espacio cambiante que se construye mediante el continuo movimiento dependiendo del punto de vista del espectador, donde las formulaciones paramétricas permiten describir puntos en el espacio dentro de un encadenamiento continuo. Las matemáticas proporcionaron una herramienta eficiente para la exploración del espacio, porque se ha argumentado que si la arquitectura había estado preocupada con la creación del espacio, las matemáticas se han enfocado a su descripción y su definición (Burry & Burry, 2010).²⁴

La belleza de las formas abstractas dan testimonio de la solidez de las estructuras matemáticas, donde las relaciones entre elementos son regidas por principios inmutables, lo que ejerció una notable y prominente influencia dentro de la experimentación que se llevo a cabo durante este periodo. Algunos de los proyectos estudiados poseen una calidad escultórica de gran expresividad que se presenta desprovista de ornamento y de expresiones iconográficas, y se fundaban en la creencia de una perfección y eficiencia de la forma a través de la geometría. Existe una indiscutible voluntad en crear un volumen único, limpio, y monumental, "una estructura que nace de la tierra y se proyecta al espacio infinito"²⁵ como afirma Niemeyer. Esta estrategia también propone la exploración de la relación entre tiempo y espacio, ya no determinada por un espacio estático, sino que en busca de la cuarta dimensión, definida por una noción continua de experiencias simultáneas.²⁶

Este capítulo ha evidenciado que las matemáticas proporcionaron un renovado repertorio formal de extrema coherencia para experimentar y teorizar a escala arquitectónica, y también proporcionaron un método para la correcta definición y descripción de sus partes. Pero sobre todo, las matemáticas ofrecieron una herramienta sólida para explorar dos preocupaciones específicas subyacentes en este momento de la historia: la exploración del espacio y del tiempo.

La contribución de estos proyectos no solo radica en proponer nuevas formas geométricas, sino que en muchos casos han revolucionado los sistemas formales, estructurales y constructivos de su época. Por lo tanto, los proyectos necesitaron de otras lógicas claves para su formulación, en paralelo con un conocimiento artístico, científico y constructivo. En los siguientes capítulos se exploran algunas nociones de resistencia mediante la forma, así como aspectos constructivos acorde a los requerimientos de los nuevos materiales y técnicas de producción, ensamblaje y construcción.

24 Burry, M and Burry J.: 2010. *The New mathematics of architecture*, London: Thames & Hudson, pp. 37-39.

25 Botey, Josep. *Oscar Niemeyer : Obras y Proyectos, Works and Projects*. Barcelona : Gustavo Gili, 2002. Pp. 164-170.

26 Heynen, Hilde. *Architecture and Modernity: A Critique*. Cambridge, [MA] : MIT Press, 1999. Pp. 38-41.

MODELOS FISICOS

“La superiorità del metodo sperimentale, per la ricerca del reale comportamento (statico o dinamico) di una struttura spaziale, su qualsiasi pensabile procedimento teorico appariva, non solo a Nervi ma anche a molti di noi professori, di una evidenza estrema.”

“La superioridad del método experimental, por la búsqueda del comportamiento real (estático o dinámico) de una estructura espacial, aparecía de una evidencia extrema muy por sobre cualquier otro método teórico concebible, no sólo en Nervi, sino que también para muchos de los profesores.”

Guido Oberti, 1960 (traducción de Mathilde Marengo).

La búsqueda de nuevas formas constituye uno de los tópicos más recurrentes, y tal vez uno de los más relevantes en la historia de la arquitectura, lo que se ha manifestado con la introducción de nuevas formas, como arcos y bóvedas de cañón en el periodo romano, o el prolífico uso de cúpulas durante el renacimiento, o incluso el magistral uso de bóvedas nervadas en piedra durante el gótico.

A lo largo del Siglo 20 se introduce un repertorio formal inexplorado hasta entonces en la arquitectura, caracterizado por la implementación de estrategias geométricas deducidas mediante algoritmos matemáticos, los que proporcionaron valiosos instrumentos para la precisa definición de curvas y superficies, como se ha expuesto en el capítulo anterior. Sin embargo, se ha evidenciado que algunas formas han presentado numerosas limitantes cuando han sido utilizadas a escala arquitectónica, como las dificultades de ser representadas mediante sistemas tradicionales de proyección ortogonal, o por la impredecible respuesta a ciertos esfuerzos estructurales, o por la incapacidad de los métodos de cálculo para deducir fuerzas físicas y mecánicas, entre otros factores.

Para subsanar algunas de estas dificultades, y considerando el dado al alto grado de experimentación de estas propuestas, así como las limitantes tecnológicas de su tiempo, se hizo necesario acudir a ciertos ensayos o simulaciones para comprobar ciertos aspectos relacionados con sus propiedades y características.

La tesis que sustenta este capítulo propone que el uso de maquetas físicas resultara decisivo en el proceso de generación de formas, al aparecer como un instrumento fundamental para facilitar la conceptualización, el entendimiento, y la formulación de formas singulares en un grupo de proyectos bajo estudio. Es importante aclarar que se utilizara el término de “modelo”

en esta tesis, por el sentido amplio de la palabra, el que incluye maquetas físicas, digitales, prototipos, y simulaciones.

Este capítulo pretende examinar la aparición de maquetas físicas en los proyectos seleccionados, los que se documentan a partir de imágenes y descripciones, para luego agruparlos según los propósitos específicos para los que fueron formulados y utilizados, revelando su importancia, objetivos y metodologías propuestas. Se intentara demostrar la manera en que las maquetas físicas sirvieron como instrumentos activos de experimentación, y tuvieron un rol decisivo en la formulación de estos proyectos porque proporcionaron valiosos conceptos metodológicos, técnicos y teóricos.

Este capítulo proporciona una recopilación de los proyectos donde se detecta la utilización de maquetas físicas, documentándose los siguientes aspectos:

1. Una revisión histórica acerca de precedentes del uso de maquetas físicas para estudiar la forma arquitectónica que fueron importantes referentes para sus autores;
2. La identificación de proyectos seleccionados utilizando maquetas físicas como parte integral del proceso de búsqueda de la forma arquitectónica. Los criterios de selección de proyectos se basa en la disponibilidad de documentación de los modelos, su escala y los métodos escogidos;
3. El desarrollo de fichas de trabajo por proyecto incluye información referente al lugar donde se realiza el modelo, así como identificar sus autores, su escala, y material. Se enuncian también los comportamientos a analizar y las prueba de cargas estáticas; las cargas dinámicas (Viento, sísmico, vibración) que requieren pruebas/métodos especiales (mesas vibratorias, o aplicación de fuerzas laterales), o por gravedad (los polígonos funiculares).
4. Finalmente se analizan los resultados y se extraen conclusiones.

3.2.2



EL CONOCIMIENTO DE LOS MODELOS

La condición esencial de la arquitectura como objeto tridimensional construido ha encontrado numerosas dificultades a través de la historia para su representación, diseño, y definición. Una temprana preocupación se refiere a la profunda disociación que surge entre el uso de sistemas de representación comúnmente utilizados en la arquitectura, denominados “proyecciones ortográficas”, que se refieren a vistas ortogonales representando objetos tridimensionales, pero que presentan ciertas dificultades para representar geometrías mas complejas como superficies curvas, planos in-

clinados, etc. La maqueta física aparece como instrumento efectivo para resolver estos conflictos, como una herramienta altamente efectiva para la representación a escala, una especie de replica del objeto original, la que ha facilitado enormemente el entendimiento y el estudio de proyectos. Su uso se comenzara a evidenciar desde antaño en la arquitectura, pero su énfasis y objetivos presentan fluctuaciones considerables durante la historia.

León Batista Alberti declara la necesidad de incorporar la maqueta física como una antigua y buena costumbre de los arquitectos que edifican bien. Alberti declara que los arquitectos “no solamente debemos pensar con escritura y pintura, sino también con modelos construidos con cualquier material, y poniendo atención a las medidas de todas las partes y todo.”, porque la maqueta permite apreciar la “redondez” del espacio, el número y el orden de las partes. “La maqueta sirve como un modelo de trabajo sin acabar que sin reprehensión puede añadir, disminuir, mudar, innovar, y pervertirlo de todo punto hasta que todas las cosas convergen muy bien y se comprueben. (...) Por lo cual querría se diesen los modelos no acabados con perfecto artificio, y no limpios, esclarecidos, sino desnudos y sencillos, en los cuales se apruebe el ingenio del inventor, y no la mano del artífice. (...) enseña los espacios y figuras de cada frente y lados en otra parte con líneas constantes y verdaderos ángulos, como quien quiere que sus cosas no sean imaginadas con vistas aparentes, sino notadas con ciertas y firmes medidas, y así conviene hacer los semejantes modelos y examinarlos consigo mismo, y juntamente comunicarlos con otros muchos, y reconocerlos una vez y otra, de manera que no haya ninguna cosa aun muy pequeña en la obra.”¹

Los postulados de Alberti encontrarían eco algunos siglos más tarde, cuando el uso de maquetas físicas experimentaría una singular y magnífica evolución durante el Siglo 20, representado claramente por un grupo de proyectos seleccionados en este estudio. La maqueta irrumpe de manera categórica e inesperada, diversificando su rol, expendiéndose, y gravitando desde una representación objectual de la arquitectura; a una representación del espacio tridimensional o matemático; hasta convertirse en instrumento de simulación de la realidad; o incluso donde el modelo desaparece ya para convertirse en parte del proyecto con prototipos; hasta convertirse en una herramienta activa para deducir la forma arquitectónica.

Los objetivos de los modelos físicos han sido entonces variados, y diversas estrategias han sido utilizadas, las que se evidencian en 5 tipos de maquetas:

1. Representación;
2. Matemáticas;
3. Simulación;
4. Generativo;
5. Digital;

A continuación se revisaran cada una de estas estrategias.

¹ Alberti, Leon Batista. *The Architecture of Leon Batista Alberti in Ten Books*. London: Edward Owen, 1755. Pp.54-57.

MODELOS DE REPRESENTACIÓN

Una primera postura aparece vinculada a la definición tradicional de “maqueta arquitectónica”, donde su uso obedece a un objeto a escala que intenta representar la realidad con un fuerte sentido escultórico. Es posible identificar numerosos precedentes, como por ejemplo cuando Michelangelo representa la cúpula de San Pedro en 1558-61 en un modelo de arcilla que luego se realiza en madera (Fig. 3-2-1 y 3-2-2). Estos precedentes develan una fuerte voluntad de transición desde el plano al modelo.

El trabajo de los constructivistas rusos de inicios del Siglo 20 se encuentra magistralmente representados por Tatlin y Ródchenko, quienes utilizan el modelo como un instrumento para el estudio y la construcción del espacio. Las construcciones espaciales de Ródchenko exploran un sentido del espacio cambiante, dinámico y abstracto (Fig.3-2-4 y 3-2-5). Extremadamente influyente es el modelo realizado para la 3ª Internacional por Tatlin (Fig.3-2-3), que se convierte en todo un símbolo de la arquitectura del Constructivismo Ruso de principios del Siglo 20. Estos precedentes proponen la transición del modelo al espacio abstracto.

Numerosos arquitectos continuaron utilizando el modelo físico como herramienta de representación del espacio, que alcanza un punto notable cuando Federik Kiesler desarrolla modelos altamente influyentes para el Endless House (Kiesler, 1959), al construir modelos físicos con sus propias manos en concreto con una malla metálica, trabajando el objeto arquitectónico como una verdadera escultura (Fig. 3-2-6 y 3-2-7).

Estos modelos físicos presentan un paradigma inexplorado anteriormente, al manifestarse como un instrumento activo en la creación del espacio, una especie de escultura viva y adaptable. El modelo físico se presenta aquí como el resultado de la coexistencia entre modelo y espacio.

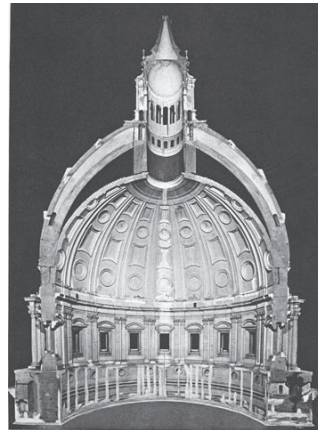
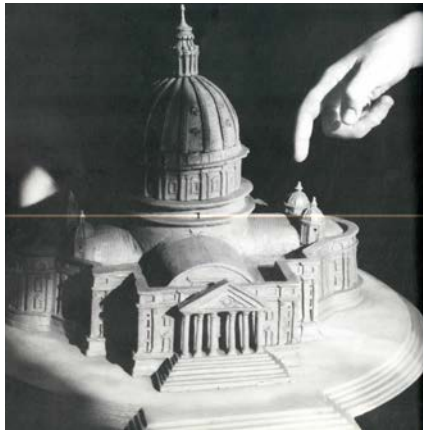


Fig 3-2-1: Reconstrucción de la primera maqueta realizada por Miguel Angel.

Fig 3-2-2: Michelangelo, St. Peter. Maqueta de autor desconocido en madera. 1558-61.



Fig 3-2-3: Vladimir Tatlin. Monumento a la Tercera Internacional, 1919.

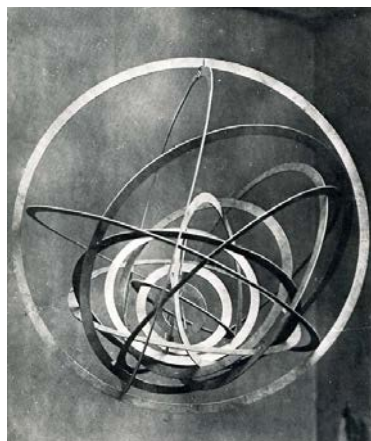
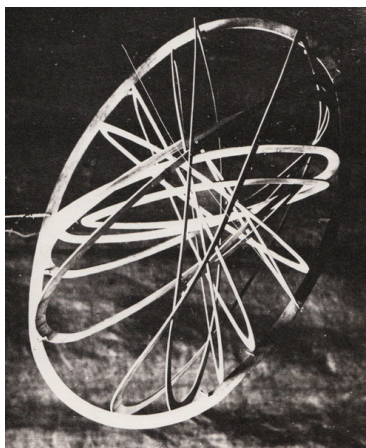


Fig. 3-2-4, 3-2-5 : Ródchenko. Spatial Constructions, 1918-1921.



Fig. 3-2-6 y 3-2-7: Frederick Kiesler, Endless House, 1959.

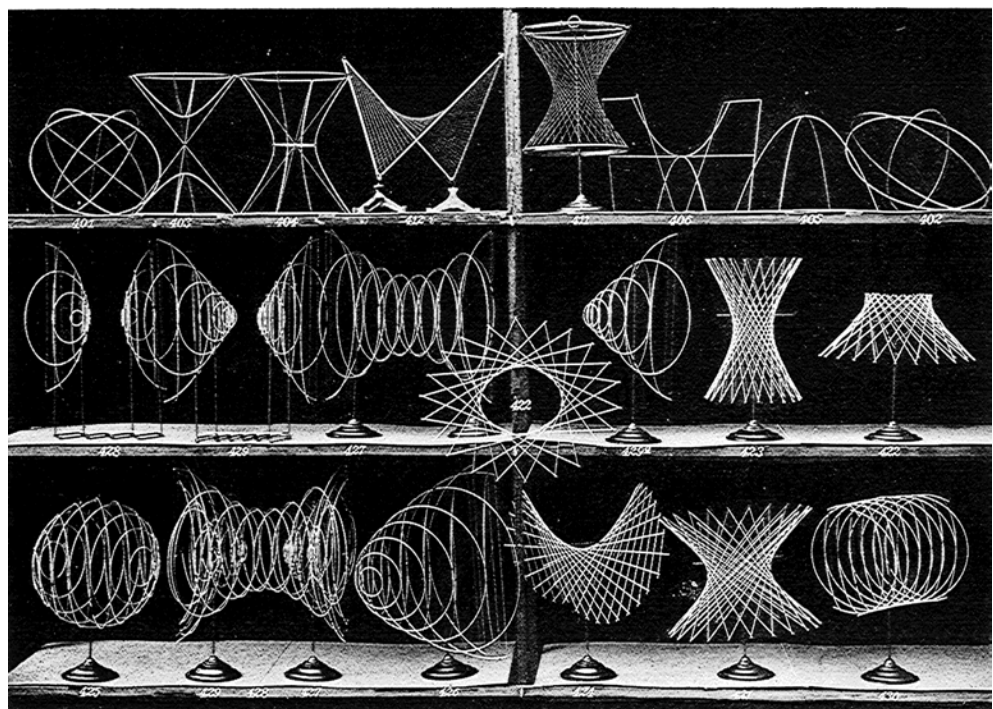
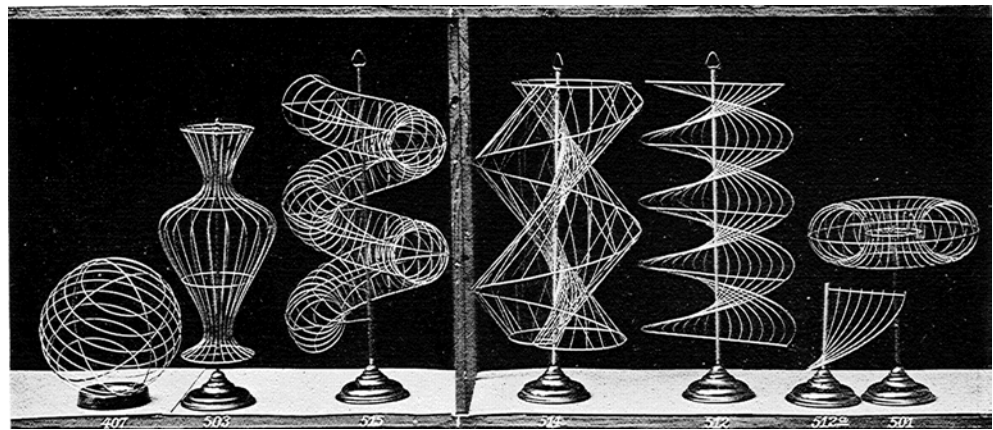
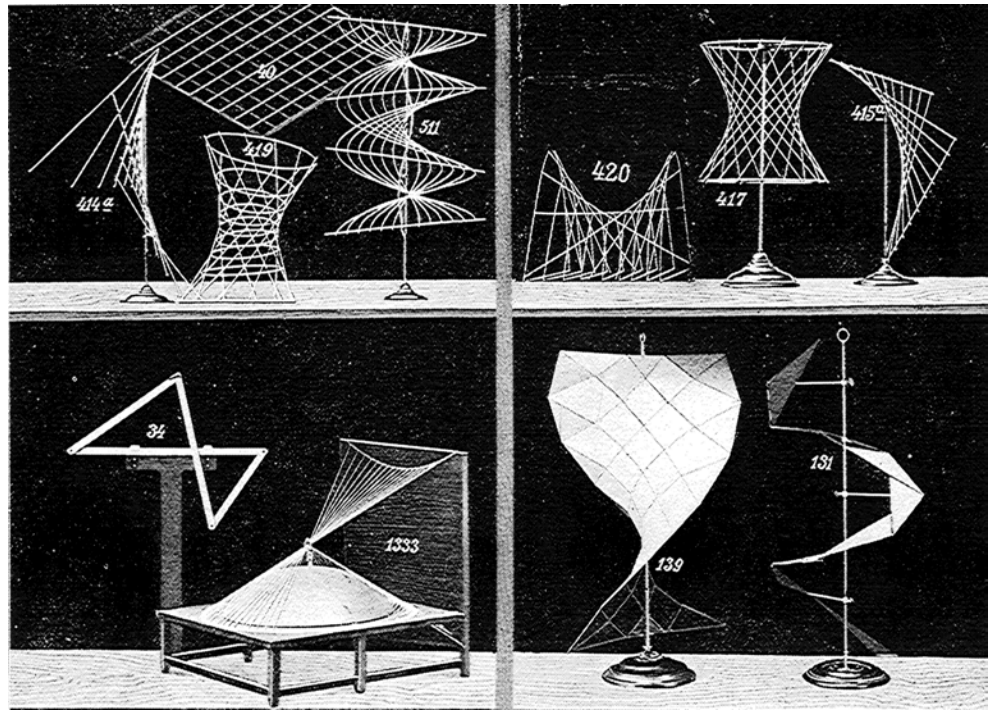
MODELOS MATEMATICOS DE CABLE

Las matemáticas fueron incorporadas en el curriculum del arquitecto en la "Ecole Polytechnique" bajo la dirección del matemático Gaspard Monge, quien introduce materias como la geometría descriptiva en la malla curricular. Si bien las matemáticas ofrecieron un fértil repertorio de formas donde experimentar en la arquitectura, las evidentes limitantes en cuanto a su representación tridimensional impulsaron la exploración de maquetas físicas durante fines del Siglo 18 y principios del 19. Para facilitar el entendimiento de ciertas formas matemáticas, aparecen las maquetas físicas denominadas "String models" o "modelos de alambre" a fines del 1800 (Fig. 3-2-8 a 3-2-11), consistentes en modelos que representan formas matemáticas a partir de sus generatrices en cable, que proporcionan un método sólido de exploración de las formas, y aparecen una serie de publicaciones ejemplificando algunos modelos matemáticos, los primeros de ellos en Leipzig, Alemania en 1872, para luego diseminarse incluso hasta USA ². El impacto que ejercieron estos modelos en algunos autores es difícil de precisar, aunque este estudio ha identificado que una serie de proyectos trabajan con formas matemáticas y se aplican a escala arquitectónica. Muchas veces la traslación resulta tan directa, y la apropiación tan evidente, que podría entenderse como la implementación de una extrema literalidad.

Un ejemplo relevante son los modelos matemáticos de cable existentes en el Museo de la Sagrada Familia, y del Parque Güell, donde se encuentran maquetas de hiperboloides, y de paraboloides hiperbólicos, los que sirvieron de base para el proceso de deducción de las formas utilizadas por Gaudí.

2 De Lagrange, M. Fabre. *A Catalogue of a Collection of Models of Ruled Surfaces*. New York : HardPress, 2012. Pp.111-112.

Fig 3-2-8 a 3-2-11:
Modelos matematicos
de alambre.



MODELOS DE SIMULACIÓN

La tradición de utilizar la maqueta física como modelo de simulación y de prototipo se remonta a la antigüedad. Notables figuras como Galileo, Kepler, Copernicus, Descartes, Leibniz and Newton, desarrollaron una aproximación científica que se basaba en la tradición racionalista que había comenzado con Pitágoras y Platón.³

Galileo aborda un razonamiento inductivo en el libro *Dos Nuevas Ciencias* (Galileo, 1638), mediante la implementación de pruebas experimentales para explorar la resistencia mecánica de materiales. Para ello, establece un sistema de relaciones entre parámetros provenientes de la forma, la materialidad y los esfuerzos, los que se demuestran en columnas y vigas sometidas a cargas estáticas (Fig. 3-2-12 y 3-2-13). Su propósito era desentrañar ciertos principios generales a partir de fenómenos observados en la naturaleza que rigen el comportamiento de la forma, para develar ciertas leyes matemáticas, mecánicas y físicas. Esta preocupación ha estado al centro de la discusión para determinar la relación entre forma, estructura y materialidad, lo que se demuestra en estos rudimentarios modelos de experimentación.

A partir de principios del Siglo 20, este tipo de experimentos se denominó "modelos estructurales" o "structural-model-testing", los que fueron ampliamente implementados en diversas escalas, condiciones, y lugares. Las formas con curvaturas o plegados adquieren un inusitado interés por sus intrínsecas capacidad de resistencia, lo que impulsa peculiares procesos de búsqueda de formas que habían sido previamente inexplorados. Estos modelos de simulación permitieron comprobar los esfuerzos a los que están sometidos estas formas, y fueron aplicados extensamente porque posibilitan demostrar que mediante estas estrategias era posible obtener mayor resistencia, como lo representa el modelo de una maqueta en plástico de una superficie de doble curvatura capaz de resistir 30 veces más la carga que la de una superficie plana.

Un ejemplo notable es el uso de maquetas físicas en el trabajo sobre estructuras laminares en ladrillo que Guastavino desarrolla a principio del Siglo 20. Guastavino implementa sofisticados modelos de simulación para verificar cargas en sus estructuras a partir de sencillos instrumentos de la estática gráfica, enfocándose a la formulación de un método de cal-

³ Tessmann, Oliver. *Collaborative Design Procedures for Architects and Engineers*. Norderstedt : BoD Books on Demand, 2008, p. 30.

culo y a la construcción de diversas y complejas estructuras abovedadas. Consciente de la necesidad de conferir máxima confianza a su sistema de construcción que se implementaría en USA, en 1887 Guastavino ya había realizado rigurosos ensayos de las bóvedas para demostrar sus excelentes condiciones de resistencia e incombustibilidad.⁴ Las imágenes muestran los ensayos realizados en 1901 de las bóvedas tabicadas de 3,65 metros de luz, sometidas a cargas de 51 toneladas de lingotes de hierro (Fig. 3-2-15, 3-2-16:).

Un espíritu similar se evidencia en el trabajo de los ingenieros Dischinger-Finsterwalder en 1932 en Suiza, donde se realiza un experimento de una cáscara de hormigón de doble curvatura de 7,3 m x 7,3 m de dimensión, con solo 1,5 cm de espesor reforzada por una malla metálica de 3mm, sometidas a la carga de 50 personas de pie.

Las maquetas físicas se utilizan como modelos de experimentación que llegan a constituirse en elementos participes en la generación de formas, impulsando a arquitectos e ingenieros a utilizar la maqueta física como un elemento esencial dentro del proceso de diseño. De esta manera, las leyes de la forma y del espacio están fuertemente ligadas al comportamiento físico y mecánico de la estructura y de los materiales. Se reposiciona el entendimiento de las formas como un sistema íntimamente entrelazado a la lógica de los sistemas estructurales, y a la mecánica de los materiales. "Para seguir avanzando será preciso observar el comportamiento del material en el transcurso del tiempo, su fatiga, sus deformaciones y su durabilidad. Después de cincuenta años, aún desconocemos la eficacia de la protección del hormigón a las armaduras. Para acelerar el paso del tiempo, intentamos sondear el futuro mediante costosos ensayos dinámicos, no siempre representativos. Es el pretérito el mejor laboratorio de ensayos a largo plazo. Los técnicos debemos estudiar [la] historia."⁵ La maqueta se convierte en el instrumento mas efectivo para representar esta relación.

La utilización de modelos físicos como herramienta activa para el estudio de la relación entre forma y resistencia, se evidencia en un conjunto de proyectos seleccionados, las que se exploran a continuación.

4 García-Gutiérrez, Javier; Huerta, Santiago. *Las Bóvedas de Guastavino en América*. Madrid : Ministerio de Fomento. 2001. P. 290.

5 Páez, Alfredo. Cincuenta años de hormigón armado en España. *Revista de Obras Públicas*, 1956, no. 5, Vol. CIV (2892), p. 209.

MODELOS GENERATIVOS

Tal vez uno de los referentes más conocidos de la maqueta física como modelo generativo es la maqueta invertida que Gaudí utiliza para deducir la forma de la Colonia Güell. Sin embargo, se han evidenciado relevantes y significativos orígenes de estas prácticas, los que deben de ser precisados.

El descubrimiento de los modelos invertidos se basan en la teoría de los polígonos funiculares desarrollados alrededor del Siglo 17 con el trabajo de Robert Hooke (O'Dwyer 1999), quien enuncia la teoría de elasticidad conocida como la Ley de Hooke. El descubrimiento de colgar una cadena y generar una geometría que resulta eficiente para resistir las cargas porque logra completa tensión sin momento de flexión ni deformaciones de corte, ya que actúa en tensión axial pura. Como se identificó por primera vez en la segunda ley de Hooke, si la geometría de la cadena se congela y es invertida, es posible describir la forma de un arco en compresión axial puro.⁶

El matemático francés Pierre Varignon introduce el polígono funicular y el polígono de fuerzas en su trabajo *Nouvelle Mécanique ou Statique* (Varignon, 1725)⁷, donde presenta la ley de composición de las fuerzas y el teorema de los momentos. La aportación de Varignon es lograr representar gráficamente una cuerda con pesos (Fig. 3-2-17), cuya forma poligonal resulta de la acción puntual de pesos que definen vértices, lo que dio paso a los conocidos métodos de cálculo de la estática gráfica que proliferaron durante el Siglo 19, y que tenían como principio la relación recíproca entre la fuerza poligonal y el polígono funicular (Fig. 3-2-18). La estática gráfica se convierte en un método de cálculo, donde la exactitud de las formulaciones matemáticas dependían de la escala y de la inclinación de los instrumentos para construirlos.⁸ Cabe destacar que, el método gráfico de cálculo aun se utiliza en el análisis estructural de elementos.

Un primer ejemplo aplicado a escala arquitectónica de la cadena colgante se remonta a Poleni, quien desarrolla un modelo colgante para verificar la

6 Davis, Lara. *Applied Structures I : Sudu Design | Building, 2010*. [viewed 28 October 2015]. Available from: <https://sudu1construction.wordpress.com/2010/11/12/applied-structures-i-%E2%80%93-sudu-design/>

7 Varignon, Pierre. *Nouvelle Mécanique Ou Statique : Dont Le Projet Fut Donné*. In: *M. DC. LXXXVII, Volume 2*. Paris: Jombert, 1725.

8 Allen, Edward. *Form and Forces : Designing Efficient, Expressive Structures*. Hoboken, N.J. : John Wiley & Sons, 2010.

Fig. 3-2-12 y 3-2-13:
Galileo Galilei, Dia-
logues Concerning Two
New Sciences.

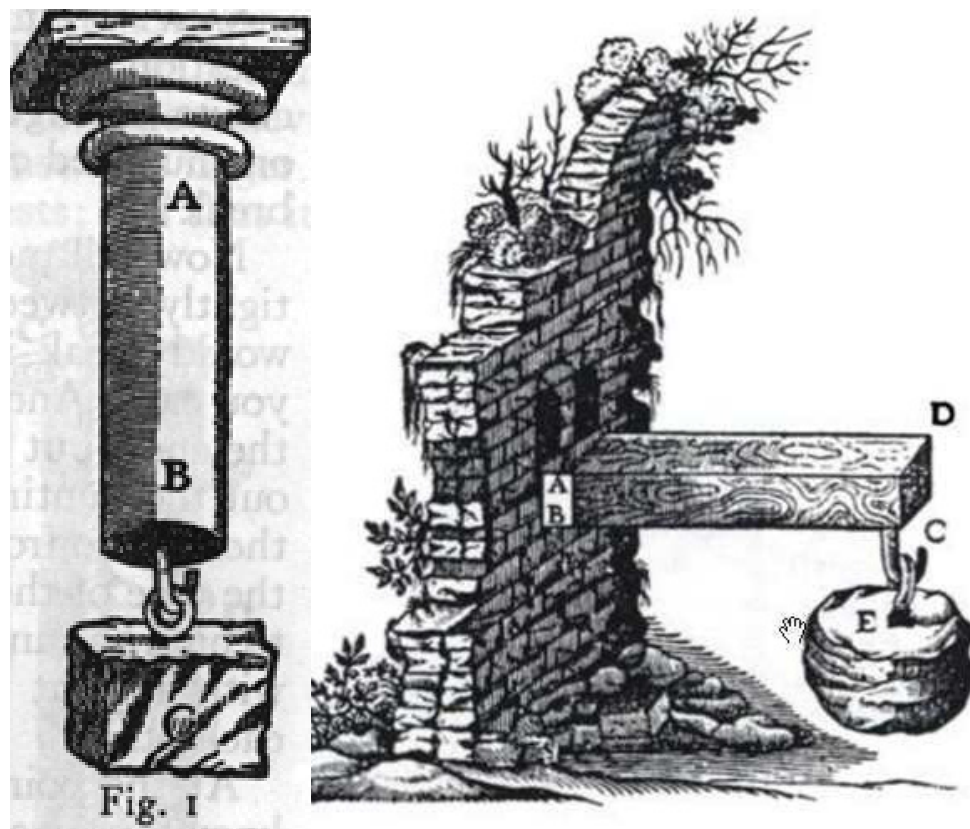


Fig 3-2-14: A load test
(50 people standing on
the roof) in a double
curved square shell (7,3
m x 7,3 m) with a thick-
ness of only 1,5 cm and
reinforced with a steel
net of 3 mm (Dischinger-
Finsterwalder,1932).

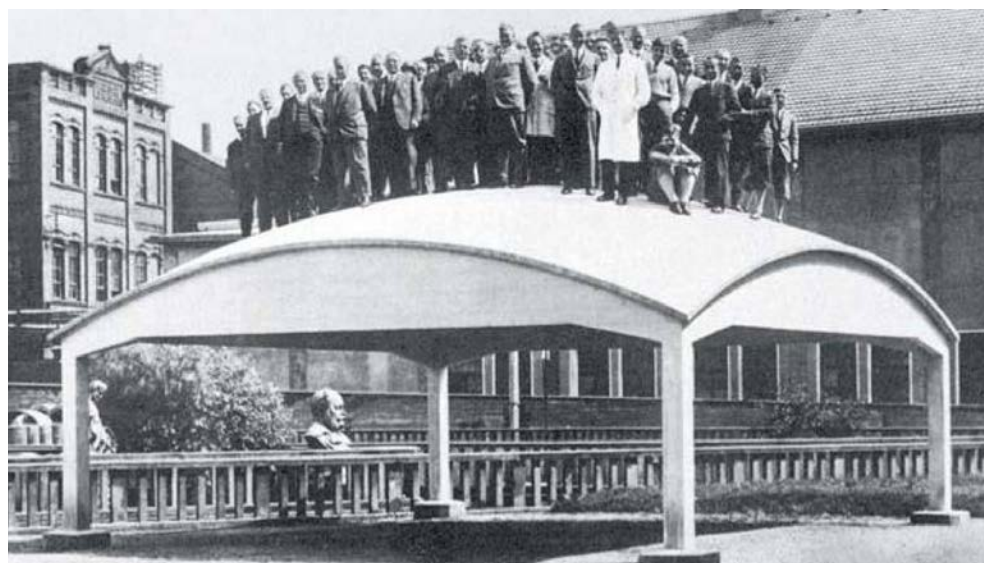
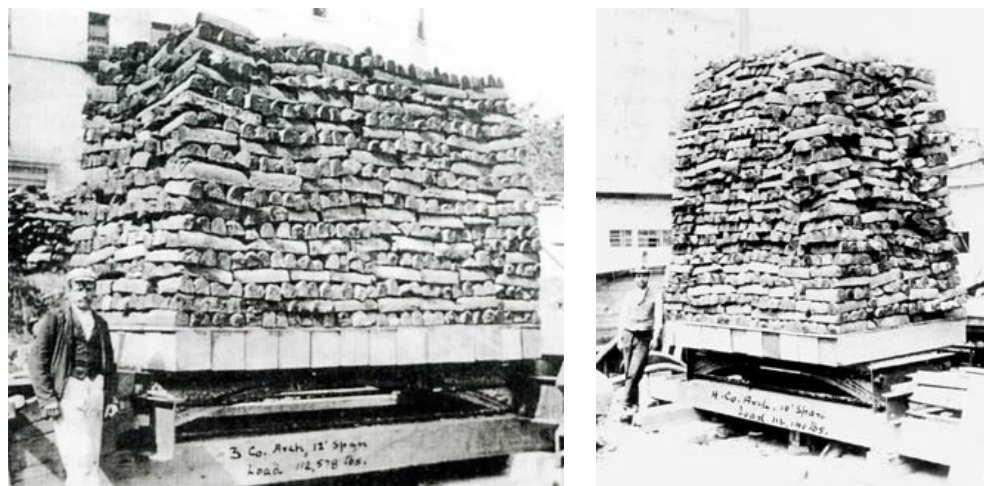


Fig. 3-2-15, 3-2-16:
Prueba de resistencia
de una bóveda tabicada.
La bóveda de tres hoja,
con una luz de 3,65
metros, casi no se ve
debajo de la carga de 51
toneladas en lingotes de
hierro (23 de mayo de
1901).



estabilidad de la cúpula de San Pedro en 1748. (Fig. 3-2-19). Se aplicaron 32 cargas de igual tamaño en la cadena colgante, resultando en una forma de arco, y esta forma se superpuso a la sección de la cúpula, verificando que se encontraba dentro del perímetro de su sección, lo que asegura que no hay trizaduras ni fracaso estructural.⁹

El trabajo de Hooke, Varignon y Poleri será crítico para extraer principios formales a partir de consideraciones estructurales, clarificando una clara correspondencia entre forma y comportamiento estructural.

Antonio Gaudí utiliza el modelo colgante invertido del Polígono Funicular para estudiar el comportamiento estructural a tensión de la Capilla Güell de Sta. Coloma (Gaudí, 1916). Mediante un simple sistema de sacos rellenos con arena atados con una cuerda, mezclado con elementos textiles para las superficies, se representan los principios estructurales del proyecto (Fig. 3-2-20). La compleja maqueta a escala 1:10 intentaba ser un fiel reflejo de las cargas a las que estaría sometida la estructura (también a escala). Es importante comentar que el modelo invertido de la capilla de Santa Coloma, de arcos catenarios invertidos fue usado durante la construcción midiendo directamente el modelo físico para construir el edificio.¹⁰

La aportación de Gaudí consiste en generar un conjunto interrelacionado de elementos para representar un sistema estructural, formal y espacial, y en trabajar el modelo como una gran estructura viva en continua transformación, intentando entender las fuerzas de la naturaleza y aplicarlas en un espacio arquitectónico tridimensional (Fig. 3-2-21). En 1983, el modelo invertido de Gaudí fue reconstruido por el Institut für leichte Flächentragwerke (IL) de Stuttgart en cooperación con el grupo de investigación Gaudí del Delft University, a cargo de Rainer Graefe, Frei Otto, Jos Tomlow and Arnold Walz con un grupo de estudiantes.¹¹ (Fig. 3-2-22)

Además de estas maquetas conceptuales, Gaudí utiliza un gran número de maquetas físicas para trabajar detalladamente sobre el proyecto de la Sagrada Familia, gracias a las cuales se ha permitido llevar a cabo su reconstrucción como facilitador de un pensamiento tridimensional. La maqueta física se convierte no solo a un medio de representación, sino también constituye un método imprescindible en el proceso de diseño de investigación dinámica, interactiva, y por ende, productora y generadora de formas. Pero quizás el aspecto más relevante en el contexto de esta investigación, lo constituye la utilización de maquetas físicas como medio de investigación de formas experimentales.

El uso de maquetas físicas para deducir la forma a partir del comportamiento de materiales aparecería en la escuela Bauhaus tempranamente en

9 Gohnert, M; Fitchett, A; Bulovic, I; Bhlkhoc, N. *Structurally Efficient Housing Incorporating Natural Forms*. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2013, 55 (3), pp. 96-102.

10 Larsen, Olga; Tyas, Andy. *Conceptual Structural Design: Bridging the Gap Between Architects and Engineers*. London : Thomas Telford, 2003. P. 63.

11 Tomlow, J. La evolución de la innovación estructural de Gaudí : Los proyectos de la sede de la Misión Franciscana, la iglesia de la Colonia Güell y el templo de la Sagrada Familia. *OP Ingeniería y Territorio*, 2002, no. 59, p. 48-57.

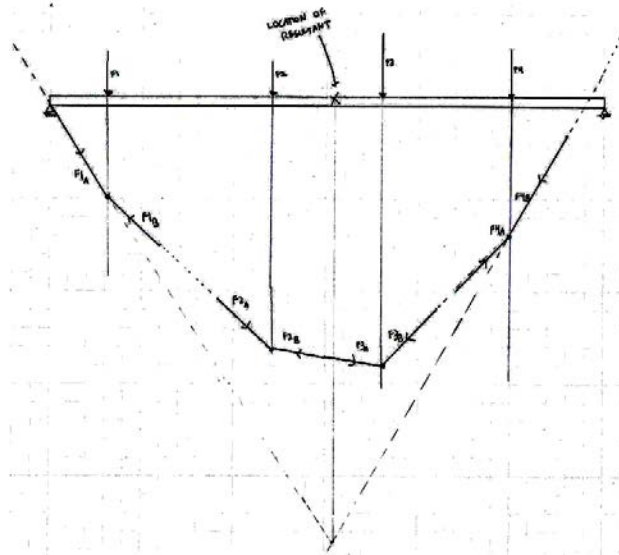
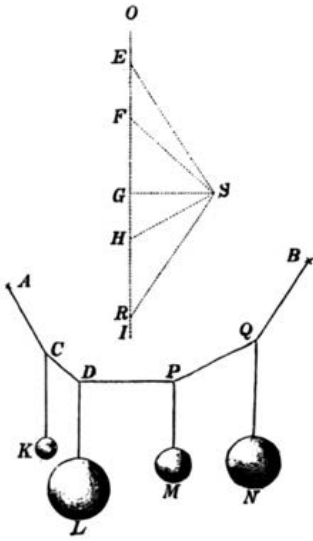


Fig.3-2-17: Funicular Polygon, Pierre Varignon (1725).

Fig. 3-2-18: Polígono funicular utilizado para el calculo gráfico de las estructuras.

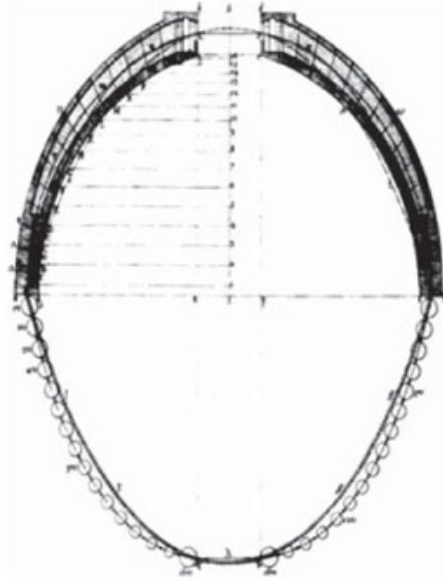
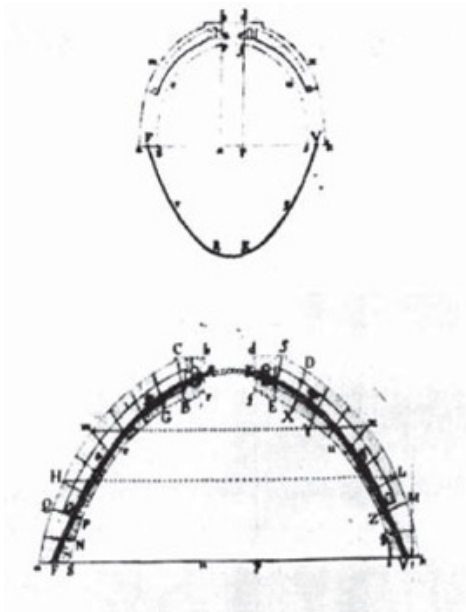


Fig. 3-2-19: Modelo Colgante de Poleni para verificar la estabilidad de la cúpula de San Pedro según el 2º. principio de la ley de Hooke (1748).

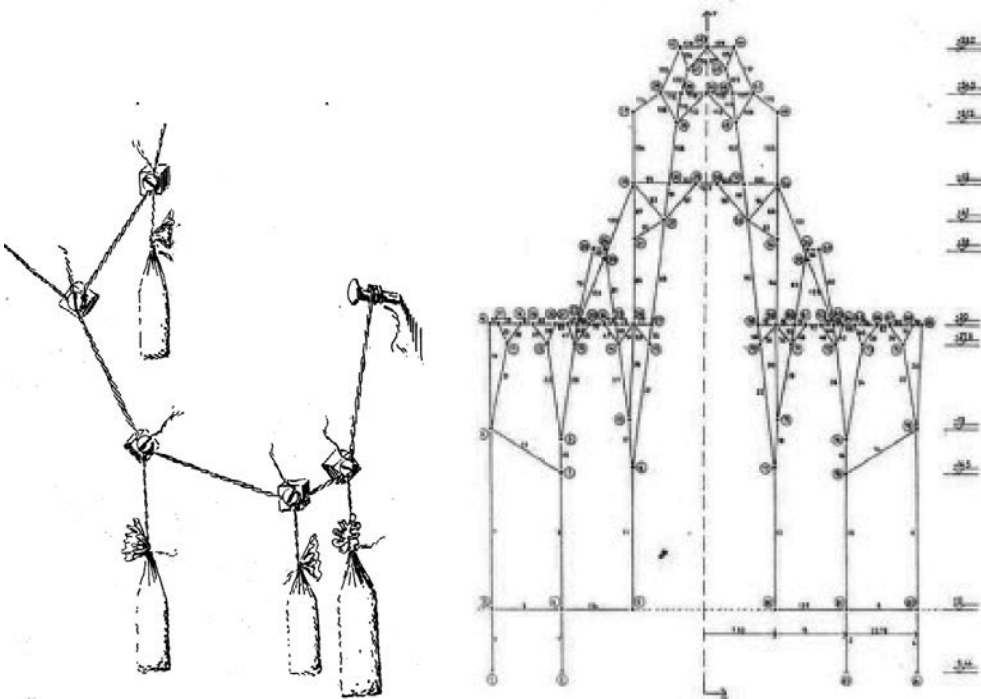
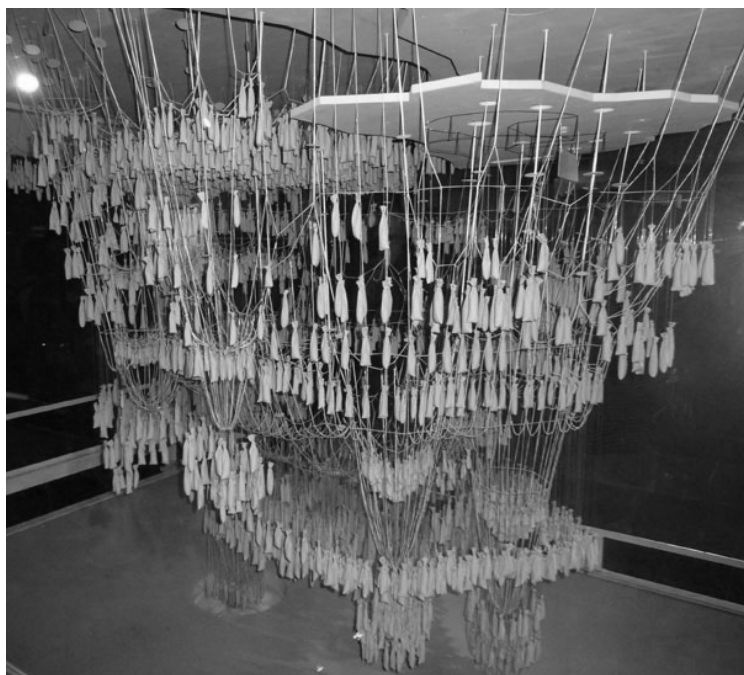
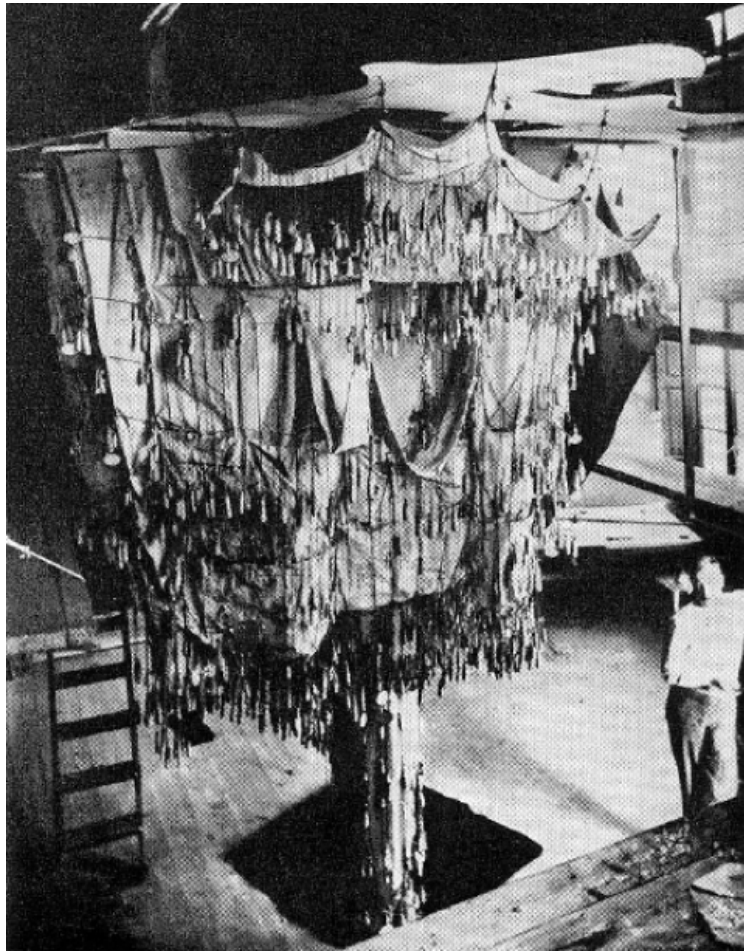


Fig.3-2-20: Sacos colgantes en modelo de estudio de Gaudí.

Fig. 3-2-21, 3-2-22:
(Arriba) original Hanging
Model of Colonia Güell,
Antonio Gaudí (1916).
(Abajo) Reconstrucción
por equipo Frei Otto
(1983).



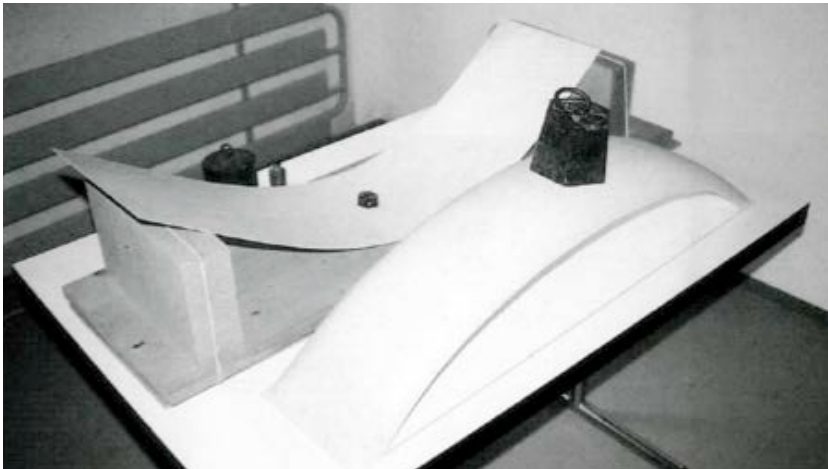


Fig 3-2-23: Demostración de la eficacia de una lámina de doble curvatura hecha de plástico delgado, en comparación con una lámina plana de la misma luz. La carga en la cáscara con curvatura es de 30 veces la carga en la hoja plana.



Fig. 3-2-24 y 3-2-25: Joseph Albers con sus alumnos en la Bauhaus, utilizando modelos físicos para explorar las técnicas de curvas y los pliegues para dar estabilidad a las formas.



los años 1920, cuando Josep Alberts aborda el diseño a partir de un objetivo básico: la búsqueda de formas eficientes para optimizar una respuesta estructural. Esta agenda alcanza el ámbito académico con el estudio de la relación entre material y forma, identificando el comportamiento del material como la expresión en el tiempo y el espacio, siendo la economía una de las consideraciones más primordiales dentro de un proceso de diseño. Alberts confronta a sus estudiantes con las capacidades inherentes de los materiales, en ejercicios más abiertos, que buscaban utilizar la menor cantidad posible de material con el mínimo deshecho (Wick 2000), buscando el trabajo eficiente con formas que trabajen a compresión y tensión con la mayor liviandad (Fig. 3-2-24 y 3-2-25).¹² Las técnicas de curvas y plegados utilizadas por Alberts volverían a aparecer en el trabajo de importantes ingenieros y arquitectos pioneros durante el Siglo XX (Songel, 2010).¹³

En una línea metodológica similar a Gaudí, Frei Otto utiliza maquetas físicas de catenarias invertidas como una estrategia metodológica esencial en su trabajo, para la generación y deducción de la forma arquitectónica. El trabajo de Otto se enmarca dentro de una notable continuidad disciplinar, cuando comienza por extraer principios geométricos relacionados con la formación de catenarias de los modelos invertidos. El estudio cuidadoso desglose de las lógicas inherentes a esta metodología permite su aplicación a modelos de estudio de estructuras elementales en la historia de la arquitectura, como por ejemplo el Panteón de Roma (Fig. 3-2-26), la Colonia Güell y varios estudios de cúpulas catenarias (Fig.3-2-27).

Otto continúa la investigación de los modelos invertidos de manera sistemática en diversos cursos y conferencias a través de su extensa y fructífera carrera académica, y en la implementación en proyectos arquitectónicos. Cabe destacar que esta metodología se utilizó sistemáticamente como herramienta educativa fundamental dentro de sus enseñanzas, el que está siendo continuado en el Institute for Lightweight Structures en Stuttgart, Alemania. Otto ha perfeccionado la técnica para estudiar estructuras de cables a tensión en complejas estructuras, las cuales alcanzan una notable expresión en el proyecto del Estadio Olímpico de Munich.

Otto explora procesos de búsqueda de las formas a partir de fenómenos dependientes de fuerzas presentes en la naturaleza, como es el caso de las pompas de jabón. Otto se basa en una técnica que había sido ya iniciada alrededor de 1830 por Joseph Plateau, quien realiza una serie de experimentos para detectar las leyes que gobiernan la formación de film laminar, utilizando un "liquide glycérique" (una mezcla de agua, jabón y glicerina)¹⁴, y cerca de 80 figuras en alambre (Fig. 3-2-29). Plateau comprueba que la superficie de jabón ejerce fuerza en sus límites porque intenta reducir su tensión al reducir su área de superficie al mínimo, generando formas que pueden ser comprobadas matemáticamente. Estos experimentos po-

12 Songel, J. *Form and structure in engineering and visual arts*. In: Cruz (Ed.). *Structures and Architecture*. London : Taylor & Francis Group, 2010. Pp. 652-658.

13 Ibid.

14 Joseph Plateau : Liquide Glycérique. Museum voor de Geschiedenis van de Wetenschappen [webpage], 2015. [viewed 7 October 2015]. Available from: <http://www.mhsgent.ugent.be/engl-plat10.html>

seen una delicada belleza, le permiten extraer ciertas reglas: cada borde de alambre admite una película; en un borde líquido no más de 3 películas pueden reunirse y forman ángulos de 120° ; y los bordes líquidos que confluyen en un punto siempre son 4 y forman ángulos de cerca 109° .¹⁵ Sus postulados se han transformado en una formulación paramétrica denominada "Plateau Curves".

Otto continua el trabajo de Plateau, desarrollando una serie de experimentos con film de jabón y diversas formas de alambre que le permitieron explorar múltiples formaciones (Fig. 3-2-30), y descubre que este proceso de optimización de las formas no parece ser una limitante, sino que por el contrario, "las membranas de las pompas de jabón tienen infinitas formas".¹⁶ Para Otto, una serie de procesos físicos y de cálculo son el punto de partida para generar formas que ya están optimizadas desde un principio, o que pueden optimizarse mediante pequeños pasos siguiendo un proceso iterativo, desvelado un universo de infinitas posibilidades.¹⁷ Esta técnica continua siendo aplicada en su taller hasta hoy, y ha originado numerosos proyectos de superficies tensadas de formas libres considerados pioneros en el mundo.

Frei Otto es considerado un gran innovador en el uso de modelos físicos, para determinar la forma en tensión tridimensional de estructuras en membranas y cables, que presentaban gran dificultad de ser determinadas antes de la computación mediante modelos matemáticos. Solo a partir de los modelos físicos que aseguraban el equilibrio sería posible utilizar métodos analíticos para determinar fuerzas en el plano y los contornos.¹⁸ Sin lugar a dudas, la aportación de Otto reside en la incorporación de la maqueta física como elemento activo en los procesos de diseño a partir de principios presentes en la naturaleza, lo que resulta en el uso de innovadoras e inexploradas metodologías regidas por lógicas y parámetros precisos.

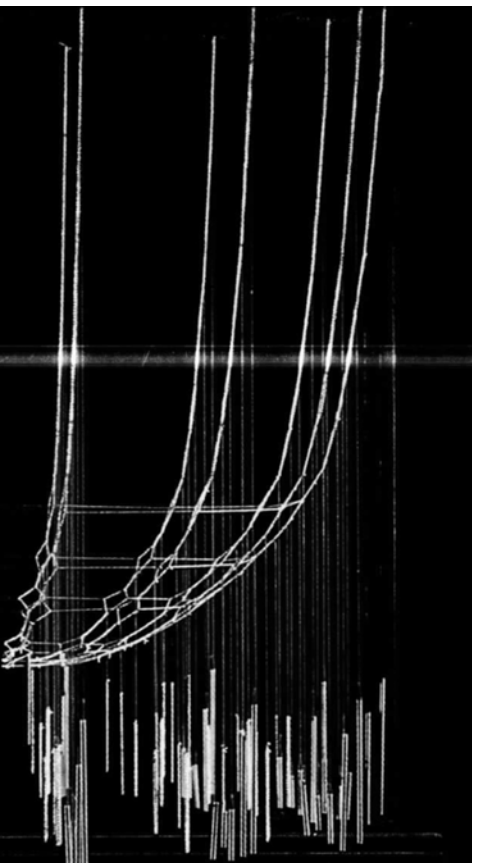
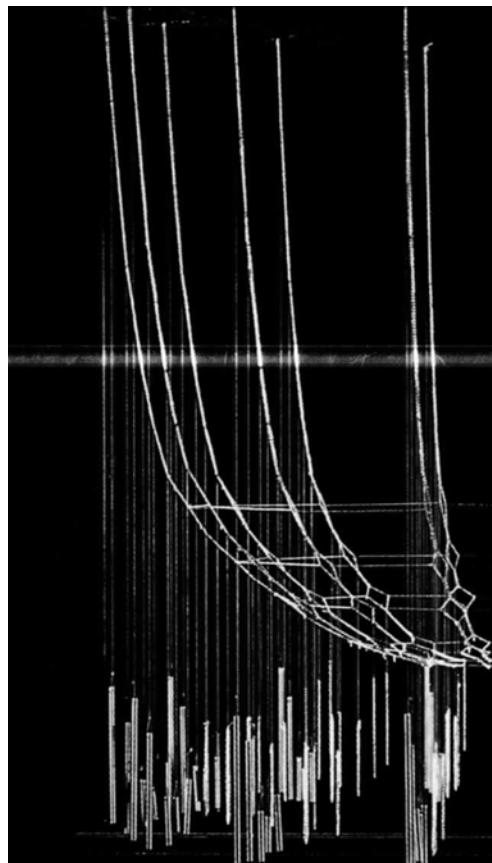
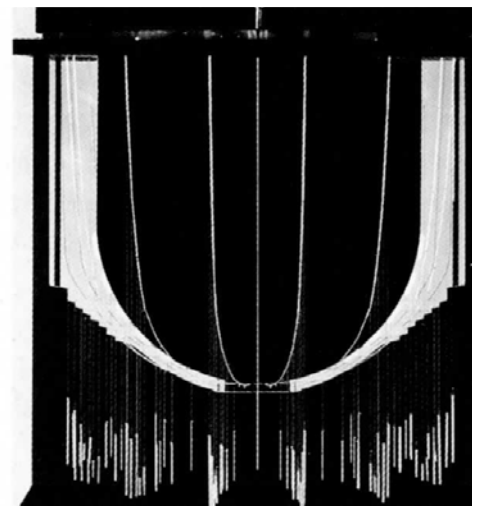
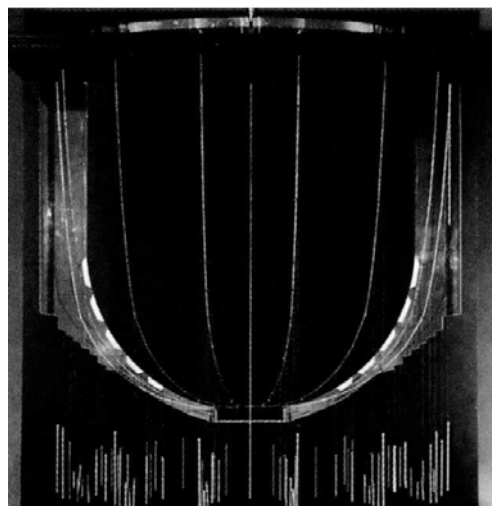
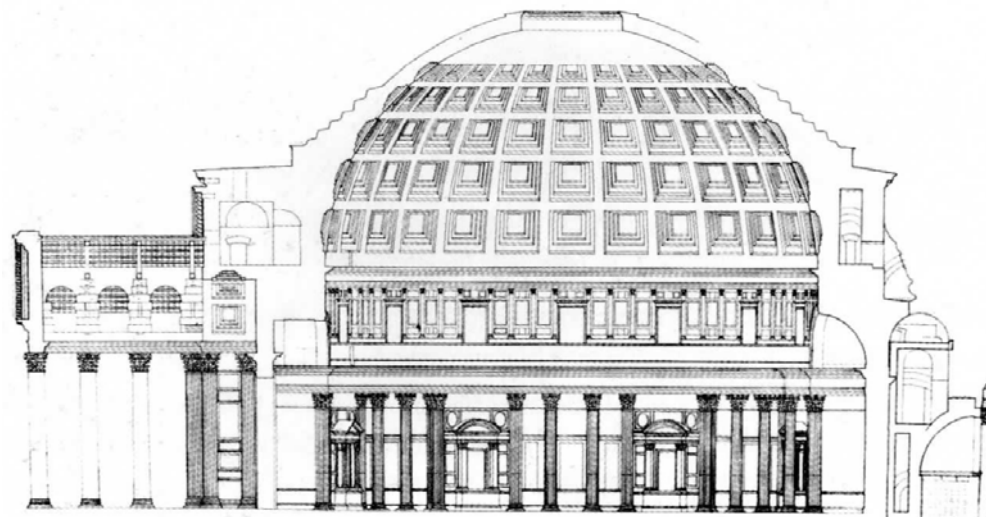
15 Darling, David. *The Universal Book of Mathematics: From Abracadabra to Zeno's Paradoxes*. Vol. 0. John Wiley & Sons, 2004. P 245.

16 Otto, Frei. *Frei Otto: Conversación con Juan María Songel*. Barcelona : Gustavo Gili, 2008,p. 39.

17 Ibid.

18 Adriaenssens, Sigrid; Block, Philippe; Veenendaal, Diederik; Williams, Chris. *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. London : Routledge, 2014. Pp.38-40.

Fig. 3-2-26: Panteon de Roma, Modelo tridimensional en suspension con la forma sin y con las fuerzas del anillo de compresion.



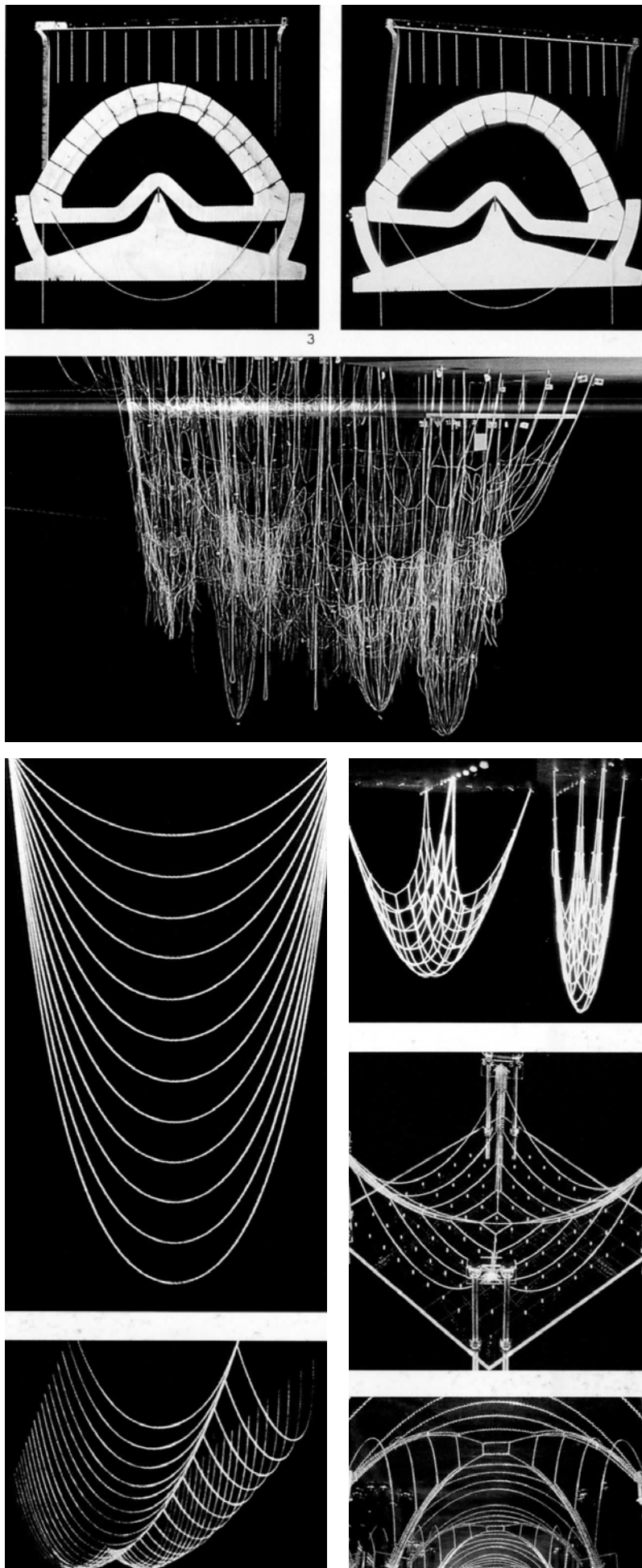


Fig. 3-2-27: Frei Otto, estudio de maquetas invertidas.

Fig. 3-2-28: Estructuras experimentales desarrolladas en el seminario sobre estructuras ligeras dirigido por Frei Otto en 1958 en la Washington University, St. Louis Missouri, Estados Unidos.

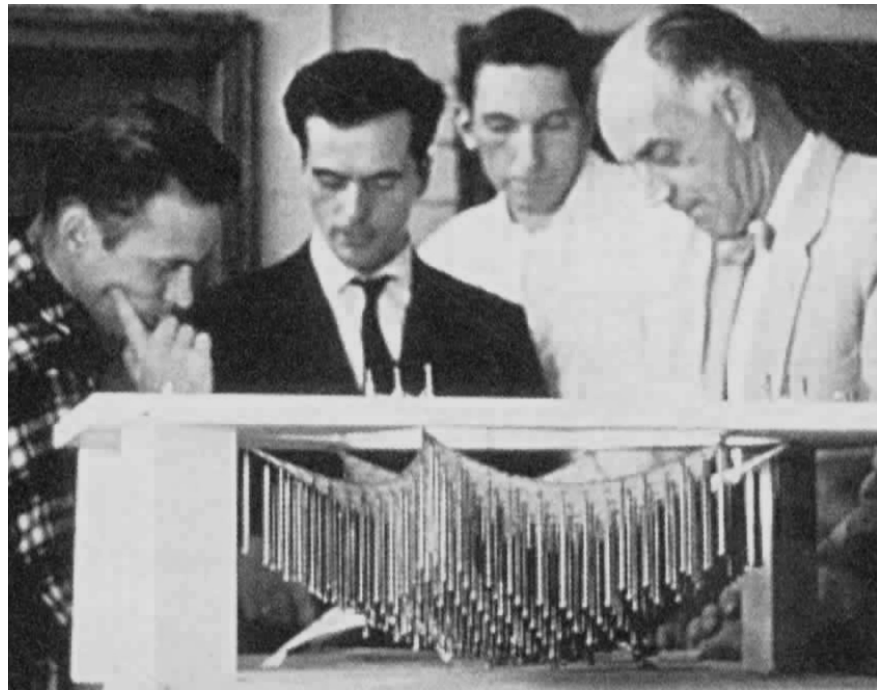


Fig. 3-2-29: Izquierda: Figuras de alambre para estudiar los films de jabon, y formas resultantes de Joseph Plateau.

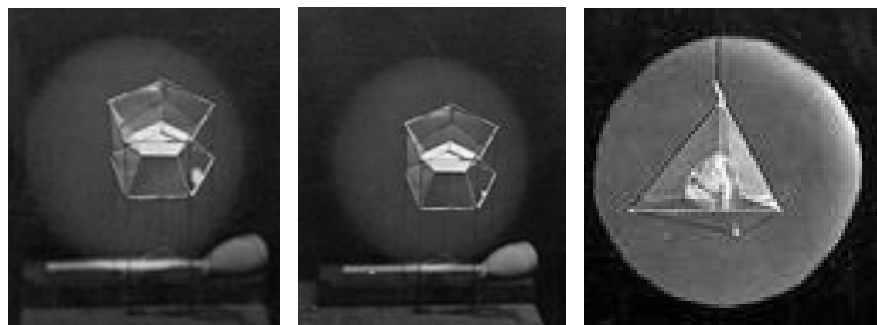
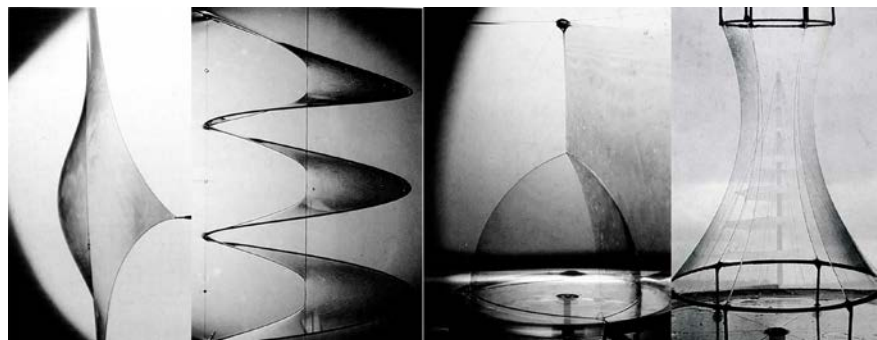


Fig. 3-2-30: Experimentos con pompas de jabon por Frei Otto.



MODELOS DIGITALES

Un nuevo paradigma aparece a fines del Siglo 20, con la introducción de las herramientas digitales en la arquitectura, como se ha expuesto anteriormente en esta tesis. El modelamiento digital ha ganado una indiscutible significancia y universalidad en los últimos años, a través de técnicas de diseño y el uso prolífico de numerosos softwares de diseño, visualización y simulación. Sin embargo, la irrupción del modelo digital a escala arquitectónica resulta confusa y ambigua hasta la fecha. Este estudio ha evidenciado de que existieron precedentes tempranos de su aplicación, y resulta válido preguntarse: ¿como y por qué surgió la necesidad de utilizar los modelos digitales a escala arquitectónica?, ¿Existen referentes del uso de modelos digitales en la arquitectura del Siglo 20?

Se ha detectado que la formulación del modelamiento digital presenta algunas limitantes en la actualidad. En primer lugar, esta técnica de modelamiento requiere la selección de tecnología apropiada para su uso particular, los cuales muchas veces requieren de una avanzada habilidad y destreza en programación. Segundo, la interpretación de los resultados obtenidos requiere de cierta experiencia relacionada con otros ámbitos de la disciplina arquitectónica, como en aspectos constructivos, estructurales, o de propiedades físicas de los materiales, etc. Por último, se requieren de referentes en proyectos específicos que proporcionen algunos ejemplos de los métodos para su implementación y aplicación (Fig.3-2-31).

Este capítulo intentara revisar algunos referentes del uso de modelos digitales en los proyectos seleccionados, identificando algunos proyectos para realizar una simulación estructural de la forma utilizando el Finite Element Analysis con el programa Scan and Solve.

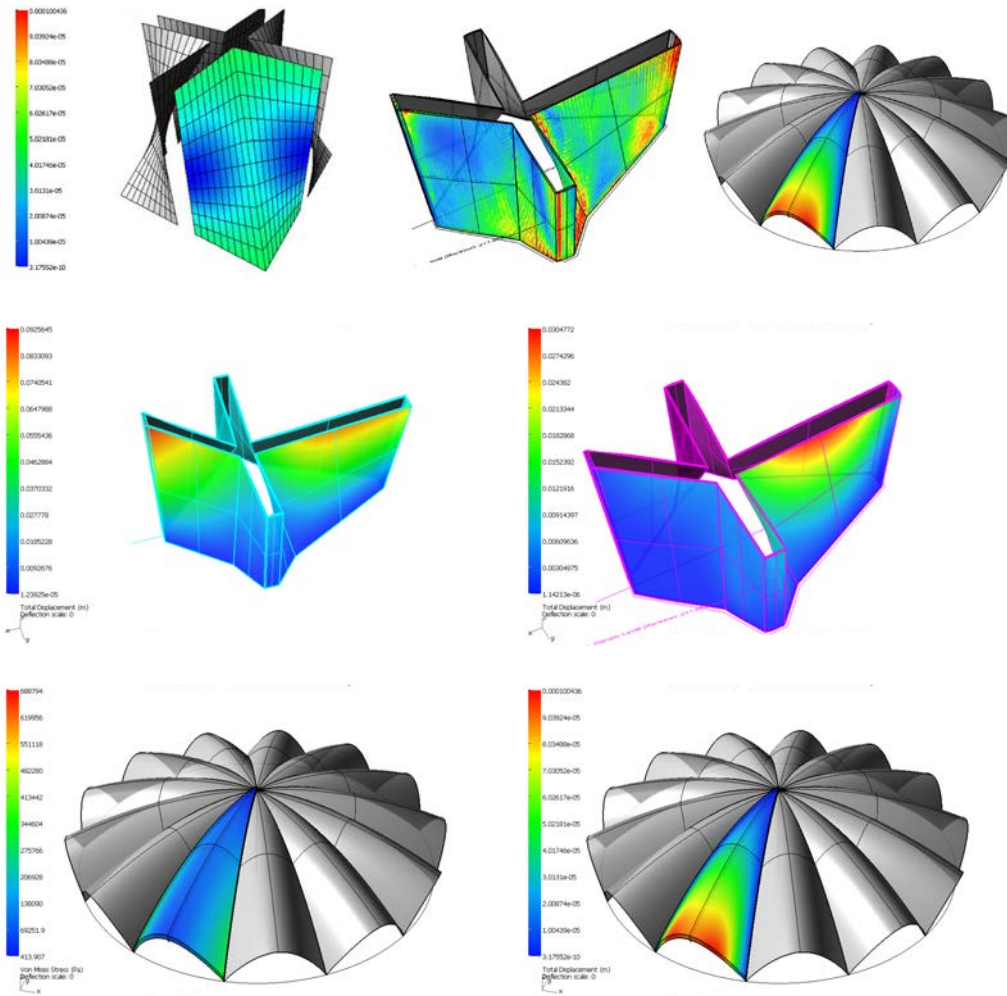
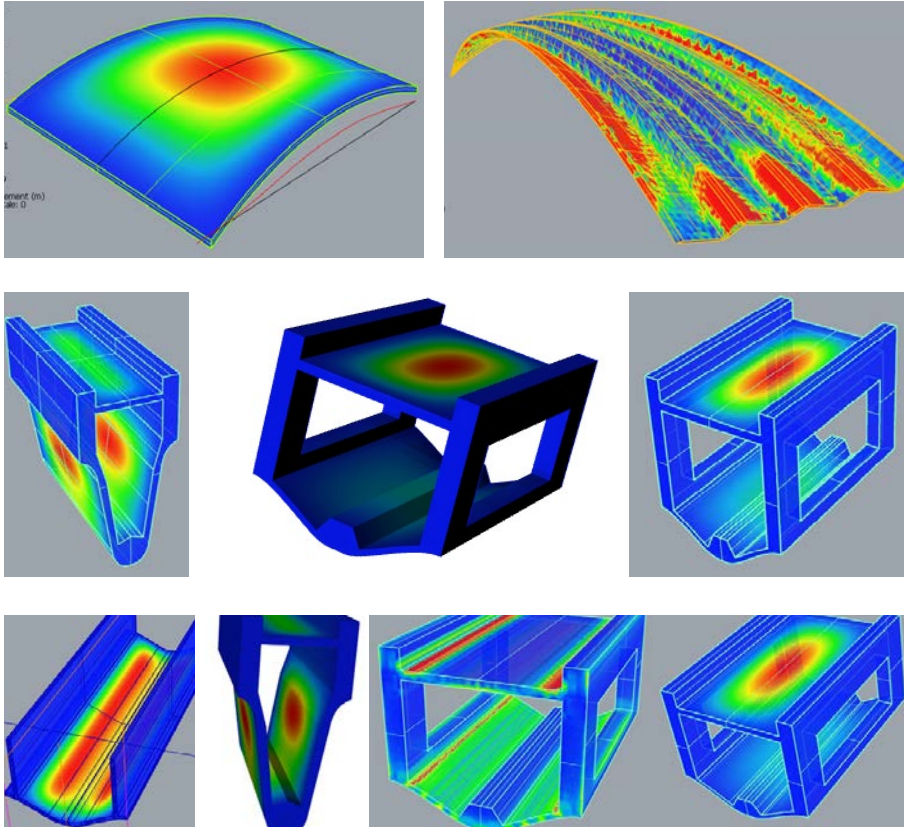


Fig.3-2-31: (a) Stress Test Model for three of the projects under study: (1) P.L. Nervi, Saint Mary's Cathedral, USA., 1971; (2) K. Tange St. Mary's Cathedral Church, Tokyo, 1963, and (3) L. Simon & A. Morisseau's Royan Market, France, 1955.



(b) Estudio de Elementos Finitos en componentes de algunos de los proyectos estudiados, que demuestran las condiciones cambiantes a las que están sometidos los componentes de cada proyecto.

PROYECTOS CON MODELOS FISICOS

Se propone identificar las estrategias implementadas en ciertos proyectos relacionadas con la maqueta física, tanto referentes a una metodología de diseño particular como conceptuales.

Los criterios de selección de proyectos seleccionados se basan en la existencia de una variedad de maquetas físicas, identificando su propósito, materialidad, y parámetros. Los proyectos seleccionados con maquetas físicas:

1. n.d. Gaudi, Escuela de la Sagrada Familia
2. 1935 Torroja. Hipódromo de Madrid
3. 1935 Nervi, Air Force Hangar
4. 1952 Fuller, Geodesic Domes
5. 1955 Candela Capilla Nuestra Sra. de la Soledad
6. 1958 Xenakis / Le Corbusier, Philip Pavilion
7. 1959 Shukhov, Hyperbolic Lattice Towers
8. 1960 Dieste, Iglesia de la Atlántica
9. 1958-62 Saarinen, TWA Terminal
10. 1963-5 Candela / Torroja Parroquia de Nuestra Señora de Guadalupe
11. 1971 Nervi, Saint Mary's Cathedral
12. XXXX Nervi, Vatican Hall
13. 1972 Otto(E), Behnisch(A), Peltz, Weber, Olympic Stadium Munich
14. 1957-73 Utzon/O. Arup/P. Rice, Sydney Opera House
15. 1979 Isler, Heimberg Tennis Center

1890 —

1895 1st. steel gridshell, Shukhov
1896 1st. double curvature, Shukhov
1897 lattice steel shell, Shukhov

1900 —



REPRESENTACION

1910 —

1911 Faro di Adziogol, Shukhov

1914 Glass Pavilion

1916 Airship Hangar
Escuela Sagrada Familia



SIMULACION

1920 —

1922 Zeiss I

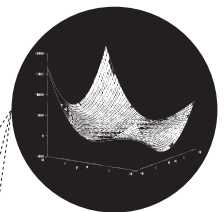


PROTOTIPO

1930 —

1933 Mercado de Algeciras, Torroja

1935 Air Force Hangar, Nervi
1935 Hipodromo de Madrid, Torroja



MATEMATICO

1940 —

1950 —

1952 The Dome Restaurant

1954 CNIT
1955 Capilla Sra. de la Soledad
1955 Royan Market

1958 Auditorio Sede Unesco
1958 Manantiales
1958 Philip Pavilion
1958 Iglesia Cuernavaca
1958 Ingalls Ice Arena



GENERATIVO

1960 —

1960 St. John Abbey
1962 TWA Terminal
1963 National Stadium Tokyo

1960 Iglesia de la Atlantida
1960 Pallazzo dello Sport
1960 Iglesia de Sta. Monica
1960 Climatron



DIGITAL

1970 —

1970 Catedral Brasilia
1971 Olympic Stadium Munich
1973 Sydney Opera House

1963 Luce Chapel
1963 St. Mary Cathedral
1963 Iglesia Guadalupe
1967 Expo 67
1967 St. Francis Church
1971 St. Mary Cathedral
1971 Audience Hall Vatican

1975 Multihalle de Mannheim

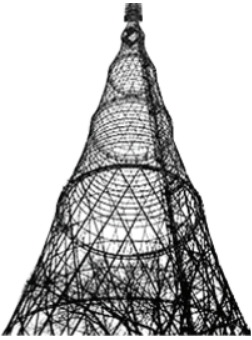
1980 —

1978 Cadyl Horizontal Silo
1979 Center Heimberg

Fig.3-2-32: Proyectos con modelos en una linea de tiempo, identificando modelos representativos, matematicos, de prototipado, simulacion, generativos, y digitales.

1911
Vladimir Shukov
Hiperboliod Towers

PROYECTO: Maqueta de las Hyperbolic Lattice Towers (Shukhov)
AÑO: 1959
AUTOR: B. V. Gorensteijn
MATERIAL: Cuerda
TIPO: Simulación Estructural



Shukhov realiza numerosas torres con segmentos de hiperboloides que sirvieron como torres de comunicación o de agua.

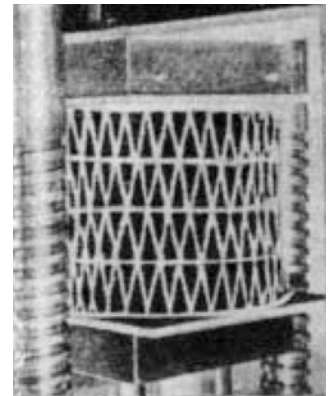
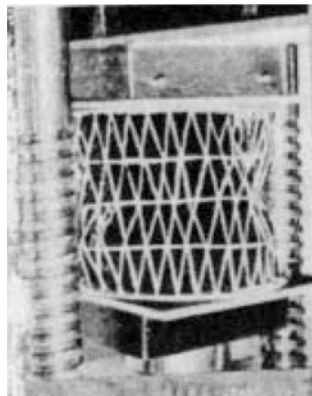
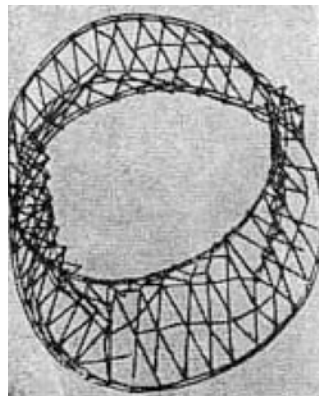
Producto del colapso de una de las torres de agua en 1930, se llevan a cabo una serie de modelos de simulación de uno de sus anillos por B.V.Gorensteijn (Fig.3-2-33). El modelo tenía un diámetro de 300mm y 36 miembros en pares de 250mm de largo y 3mm de diámetro. 3 anillos intermedios de 2mm de diámetro se distribuían en los puntos de intersección con soldaduras. Los miembros del entramado se deforman en dos direcciones. Si bien el colapso del modelo fue atribuido a las conectores que se separaban, pero los resultados no fueron concluyentes, aunque el modelo de simulación demuestra claramente el pandeo global de la celosía.¹⁹

Numerosos modelos digitales han sido construidos con posteridad para aclarar los aspectos de cálculos matemáticos, de resistencia estática y lateral, y deformaciones, etc.

Existe precedentes que la torre de Shukhov Shabola, ha sido recientemente escaneada en 3D y reconstituida digitalmente por motivos de mantenimiento, porque presenta signos notables de deterioro.

¹⁹ Beckh, Matthias. *Hyperbolic Structures : Shukhof's Lattice Towers--Forerunners of Modern Lightweight Construction*. Chichester, West Sussex : Wiley Blackwell, 2015. P. 87.

Fig. 3-2-33: Modelos de Pruebas de Gorensteijn, 1959.



PROYECTO	Hipódromo de Madrid
AÑO	1935
AUTOR	Torroja
LUGAR	Madrid, Facultad de Filosofía y Letras, ETM.
MATERIAL	Hormigón Armado, Sacos de Arena.
ESCALA	1:1 (longitud y peso)
TIPO	Simulación (prueba de cargas) y prototipado.

El ingeniero Eduardo Torroja genera impactantes modelos a escala real para comprobar las técnicas constructivas, así como el comportamiento estructural de un módulo del Hipódromo de Madrid. Los modelos tenían múltiples objetivos: comprobar las pruebas de cargas con sacos de arena distribuidos uniformemente a lo largo de la cubierta para verificar su comportamiento estructural, y al mismo tiempo, servir de prototipos donde se investigaban las prácticas constructivas, como el posicionamiento de las

1935
E. Torroja.
Hipódromo de
Madrid, España.

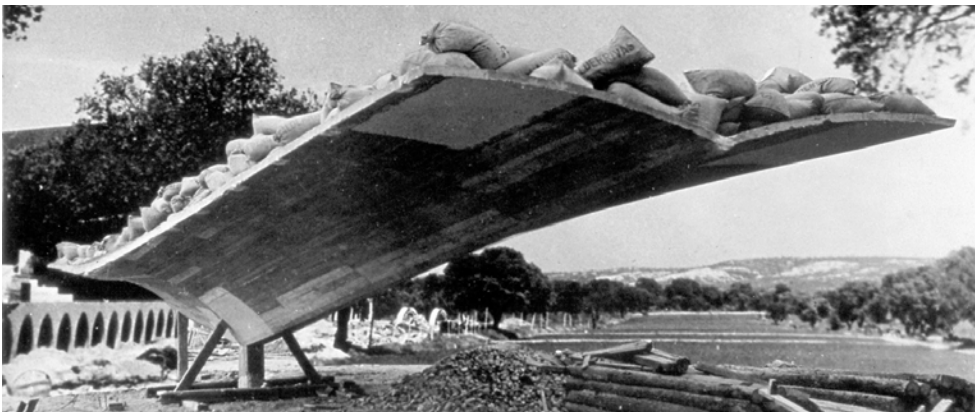
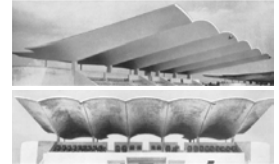


Fig. 3-2-34: Sin autor. Prueba de carga de la marquesina del Hipódromo en la parte posterior de la Facultad e Filosofía y Letras. Sin fecha. [Fotografías].



1952
Fuller
Geodesic Dome
Several Locations



armaduras, el encofrado y las técnicas de vertido de hormigón (Fig. 3-2-34).

PROYECTO	Cúpulas Geodésicas
AÑO	1949
AUTOR	Fuller
LUGAR	Black Mountain College, Carolina del Norte, USA.
MATERIAL	Metal, Personas (cargas)
ESCALA	Variadas
TIPO	Simulación y representación

Buckminster Fuller desarrolla numerosos modelos de sus conocidas cúpula geodésicas, desde modelos de representación, hasta simulaciones con pruebas de cargas. Durante el periodo que enseña en el Black Mountain College, Fuller trabaja en cercana colaboración con sus estudiantes para construir modelos de diversas escalas y materiales. Famosos son las fotografías de los estudiantes colgando de las cúpulas geodésicas para demostrar su resistencia estructural, o la fotografía de tres estudiantes sosteniendo una cúpula de gran liviandad (Fig. 3-2-36).

Fig. 3-2-35: (Superior) Fuller y sus estudiantes en una prueba de cargas de la cúpula, Black Mountain College, verano de 1949.

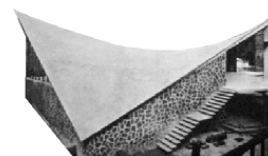


Fig. 3-2-36: (Inferior) Buckminster Fuller's students at the 1949 Summer Institute, Black Mountain College, demonstrate the lightness of the "Necklace Dome." Pictured: Jeffery Lindsay (sunglasses), Louis Caviani (far right).



PROYECTO	Varios
AÑO	1953
AUTOR	Candela
LUGAR	Las Aduanas.
MATERIAL	Hormigón Armado, Personas (cargas)
ESCALA	1: 1 (longitud y peso)
TIPO	Prueba de Cargas, Prototipos.

1955
Candela
Varios Proyectos



Es ampliamente conocida la actitud de Candela frente al diseño que resultan en proyectos de una innegable simplicidad constructiva, y que se fundaban en criterios de gran economía de recursos, un mínimo uso de materiales, y una técnica constructiva rudimentaria,. Esta situación se ve aun mas restringida por la ubicación de sus proyectos en una zona de constantes seísmos, lo que hace aun mas compleja su trabajo de experimentación. Candela advierte alrededor de 1949 que el aprendizaje de los métodos de cálculo matemático no le permitían un avance en el entendimiento de las leyes de la naturaleza, relacionado con aspectos de la estática, la mecánica, y la resistencia de materiales. El único camino posible para su capacitación en la construcción de cascarones de hormigón armado, residía en la directa experimentación mediante modelos físicos a escala real.²⁰

Candela emprende un camino de auto aprendizaje²¹ mediante la construcción a escala 1:1 de modelos o prototipos. Esta actitud frente al diseño le permite llegar a la conclusión temprana que las formas regladas de doble curvatura eran las mas adecuadas para construirse en hormigón, dado que los encofrados podían construirse con simples listones rectos de madera. Estos modelos a escala real también le permitían verificar el mejor método de distribución de mallas de refuerzo, y el posterior vertido del hormigón en superficies con curvaturas. Este proceso le permite construir membranas de muy reducido espesor. Allí nace su predilección por el uso de paraboloides hiperbólicos (o hypars), los que podían ser construidos simplemente con elementos rectos, y los que también proporcionaron gran resistencia estructural, y una sorprendente libertad que caracteriza gran parte de su obra. Las pruebas estructurales se realizaban comúnmente

20 Duque, Conde. *Félix Candela: La Conquista de la esbeltez*. 2010. [Guía de Exposición realizada en la Sala de las Bóvedas, del 23 de febrero al 18 de abril de 2010]. Madrid: Ayuntamiento de Madrid, 2010.

21 Ibid.

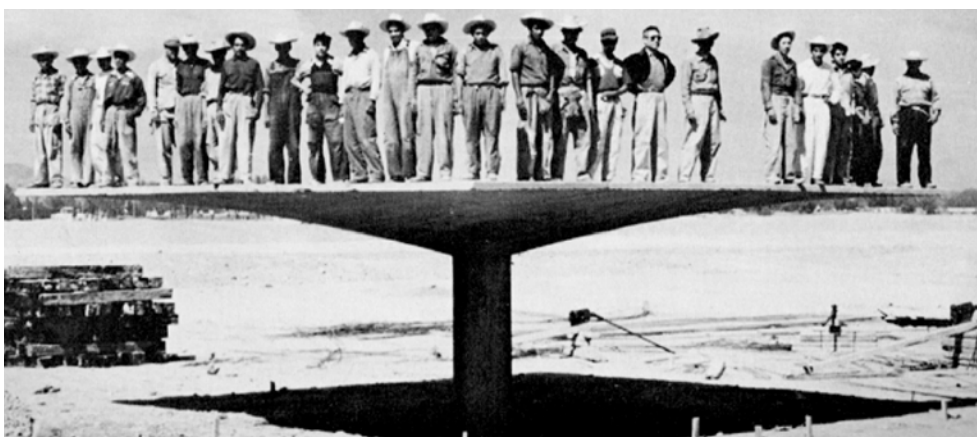


Fig. 3-2-37: Felix Candela. Paraguas experimental en Las Aduanas, 1953.

durante la construcción del proyecto, empleando cargas vivas (personas) para comprobar resistencia a peso estático y dinámico, como lo demuestra la fotografía de uno de sus proyectos con 25 trabajadores (incluido Candela) parados sobre la estructura para comprobar la resistencia a cargas estáticas (Fig. 3-2-37).

De alguna manera, se podría describir el trabajo de Candela utilizando predominantemente lógicas paramétricas entre sus proyectos, porque cada proyecto se convierte en una experimentación de parámetros constantemente cambiantes (luz, altura, espesor de las cáscaras), con el fin de optimizar ciertos aspectos matemáticos, estructurales, o constructivos.

PROYECTO	Parroquia de Nuestra Señora de Guadalupe, Madrid.
AÑO	1953
AUTOR	Candela, Torroja (E), Aspiazu (A), de la Mora y Palomar.
LUGAR	CEDEX, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, Madrid.
MATERIAL	Hormigón Armado
ESCALA	n/a
TIPO	Prueba de Cargas y simulación numérica.

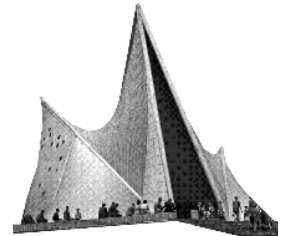
Torroja comienza una colaboración con Candela para el proyecto de Nuestra Señora de Guadalupe en Madrid, y en 1953 se realiza un Modelo físico de prueba a esfuerzos estructurales en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales en Madrid.

Fig. 3-2-38: 1963-65
Candela Torroja-Modelo Estructural-Parroquia de Nuestra Señora de Guadalupe, Madrid. Colaboración entre Candela, José Antonio Torroja(E), José Ramón Aspiazu (A), Enrique de la Mora y Palomar. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.



PROYECTO	Pabellón Philips
AÑO	1957
AUTOR	A. L. Bouma and F. K. Ligtenberg
LUGAR	Delft University of Technology.
MATERIAL	Papel, Alambre, Textil, Cable, Yeso, Sacos de Arena.
ESCALA	Variable
TIPO	Representación, Matemática, Sonido, Prueba de Cargas, Prueba de Viento.

1958
Xenakis,
Le Corbusier
Phillip Pavilion
Brussels, Belgium.



El proyecto se formula en base a la geometría del paraboloides hiperbólico (hyper), pero dado que su forma no era conocida para los ingenieros de la época, se requirió de una serie de procesos para su implementación. Se comienza por asignar al ingeniero hidráulico holandés Cornelis Gijsbert Jan Vreedenburgh completar los cálculos matemáticos del pabellón. Para evaluar la viabilidad del proyecto, dos ingenieros de la Universidad Tecnológica de Delft : AL Bouma y FK Ligtenberg, crearon maquetas a escala de la estructura del pabellón.²² Durante su desarrollo, se realizan numerosas maquetas volumétricas de representación en papel, cable, alambre, y textiles. También se realiza un modelo a escala para comprobar el posicionamiento de los competentes de sonido (Fig. 3-2-29), los que se distribuían estratégicamente en una composición musical que era parte integral del proyecto titulada Poème électronique, compuesto por Edgard Varèse.

Como una estructura de esta forma no podía ser calculada para su diseño estructural, precisas maquetas con pruebas de carga se llevaron a cabo en la Universidad de Delft (Fig. 3-2-40 y 3-2-41).²³ El modelo de prueba de cargas estructural se realiza con bolsas de arena y también personas, y se compone de sistemas de mediciones imbuidos en la maqueta de yeso. También se realiza una maqueta aplicando cargas laterales que simulan la acción del viento.

La solución constructiva se conforma por cáscaras de elementos de hormigón prefabricados instalados entre los cables de pretensado que seguían las generatrices de los hyper. Para fabricar los elementos, dado que cada diamante tiene una curvatura ligeramente diferente, las formas hyper se hicieron en montículos de arena y los elementos se vertían en moldes. Cuando todo estaba posicionado en su lugar, se aplica el hormigonado en las articulaciones, lo que posibilita que los elementos prefabricados y los cables se conviertan en una cáscara continua (Fig. 3-2-41).

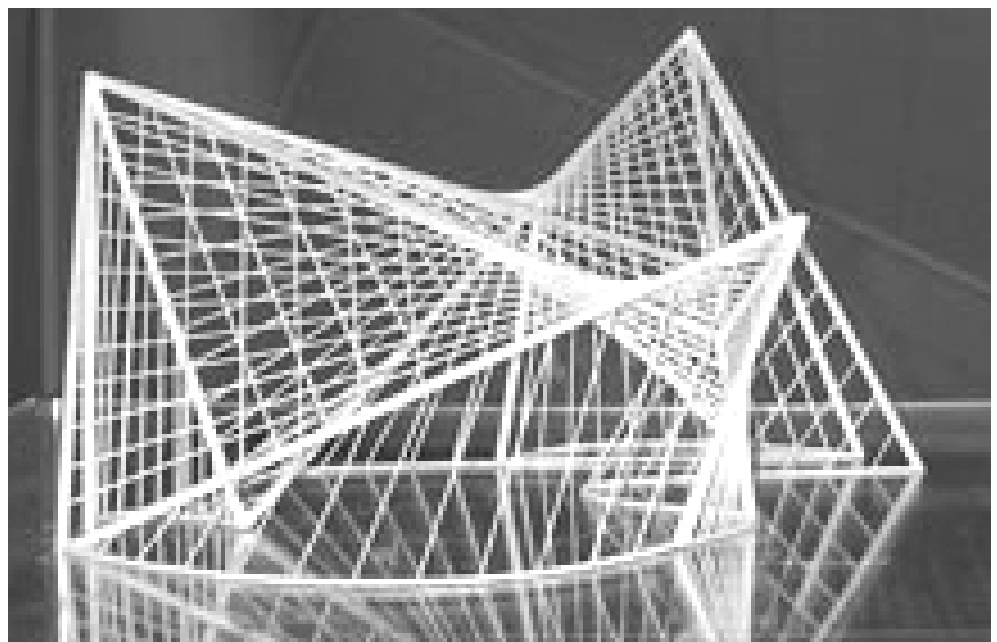
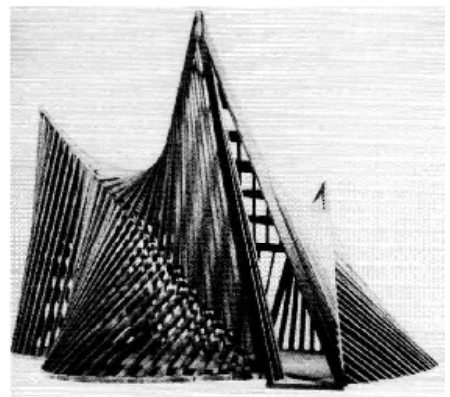
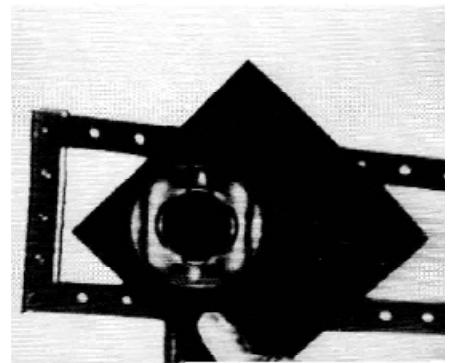
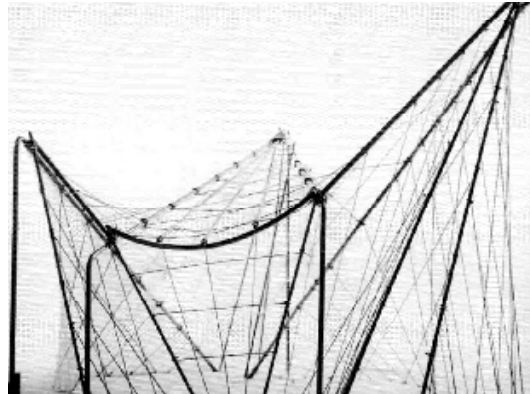
22 Treib, Marc. *Space Calculated in Seconds : the Philips Pavilion*, Le Corbusier, Edgard Varèse. Princeton, [NJ] : Princeton University, 1996.

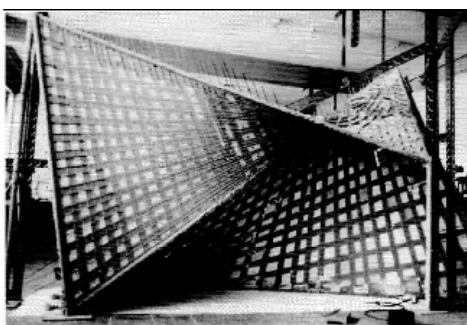
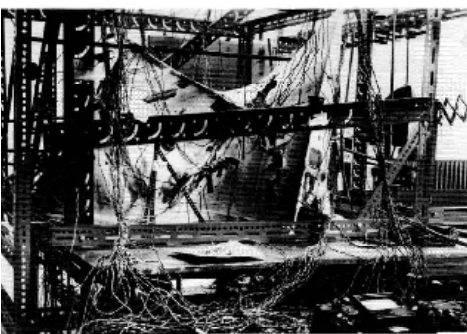
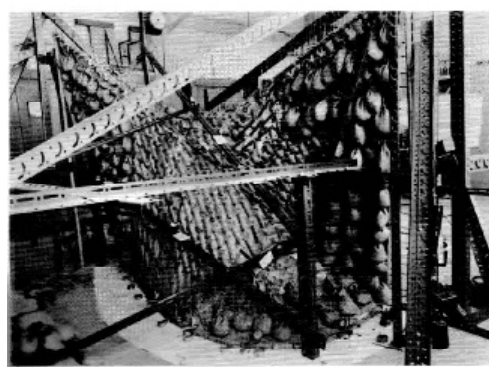
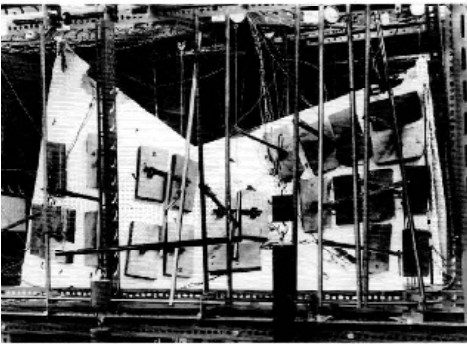
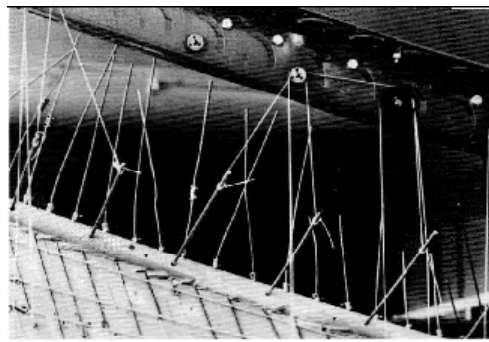
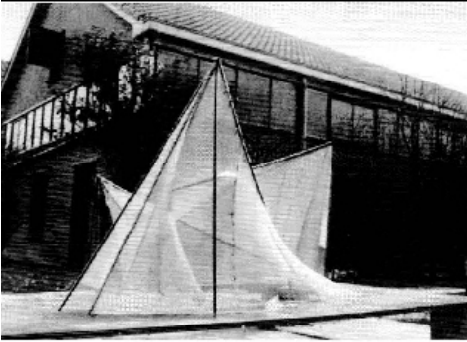
23 Millais, Malcolm. *Building Structures : From Concepts to Design*. London : E , 2005, p. 382.

Fig. 3-2-39: Meeting around a scale model of the Philips Pavillion, 1957. From l. to r.: unidentified; Le Corbusier; Philips engineer L.C. Kalff; Philips acoustician W. Tak; and Iannis Xenakis.



Fig. 3-2-40 y 3-2-41: Numerosas maquetas de estudio del proyecto.





1960
Dieste
Iglesia de la
Atlantica
Uruguay



PROYECTO	Bóvedas Gausas
AÑO	n.a.
AUTOR	Dieste
MATERIAL	Mampostería reforzada, Personas (cargas)
ESCALA	1: 1
TIPO	Prueba de Cargas

El ingeniero Eladio Dieste utilizaba durante la construcción de sus obras, pruebas de cargas con los mismos trabajadores, para testear la resistencia de sus estructuras formadas solo con albañilería reforzada.

Serrablo explica con gran precisión los ensayos efectuados por Dieste para determinar la constante elástica en los arcos catenarios, las que se evalúan reproduciendo las condiciones de una obra con bóveda de apoyo biarticulados, con 5m de luz y con una carga puntual centrada (Fig. 3-2-42). Este experimento permite establecer la constante elástica a considerar en el diseño que llega a 5000 N/mm².²⁴

En las estructuras ya construidas, Dieste realiza pruebas de carga con la totalidad de los obreros, incluyéndose el mismo (Fig. 3-2-43 y 3-2-44).²⁵

24 Serrablo, Vicente: *Contribución a la viabilidad de cubiertas laminares de cerámica armada mediante soluciones semiprefabricadas. Propuesta para láminas cilíndricas de pequeña luz.* Departamento de Estructuras en la Arquitectura. UPC, Julio de 2002, pp. 38-39.

25 Brufau, Robert. *Las bóvedas gausas.* DPA: Documents de Projectes d'Arquitectura, 2001, 15, pp. 18-25.

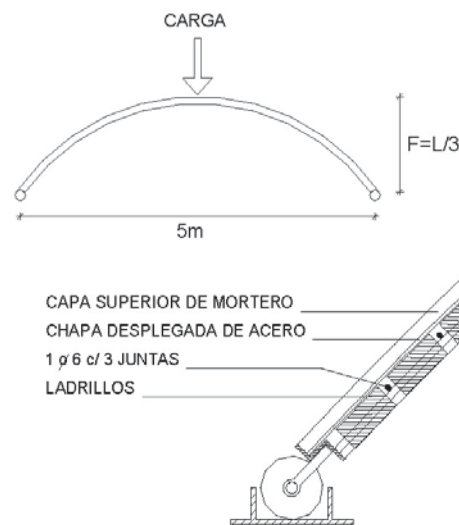


Fig. 3-2-42: Esquema del ensayo realizado por Dieste (según Van Dijk).

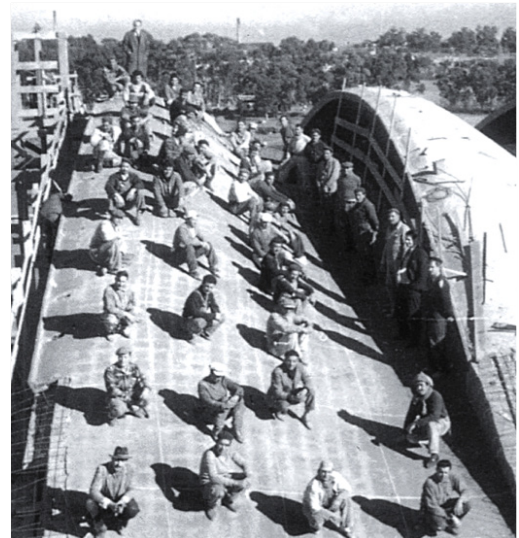


Fig. 3-2-43 y 3-2-44: Prueba de carga con la totalidad de los obreros y al fondo el propio ingeniero Dieste.



PROYECTO	TWA TERMINAL
AÑO	1962
AUTOR	Eero Saarinen and Associates.
MATERIAL	Cartón con estructura de Metal.
TIPO	Representación

1958-62
Saarinen
TWA Terminal
New York, USA.

La complejidad de las formas del terminal TWA requieren de varios modelos de alambre y cartón para representar las complejas formas, los que adquieren un gran tamaño y se convierten en herramientas fundamentales que evolucionan acorde al desarrollo del proyecto. Para establecer la compleja morfología de las cáscaras, se requirieron de una serie de modelos físicos de estudio, realizados con una estructura metálica y cartón (Fig. 3-2-45). Incluso alguien sugirió romper el eje del techo para seguir la curva de la carretera, por lo que Roche cortó el volumen por la mitad con una sierra, creando cuatro celdas que hicieron contrarrestar el volumen central. Debido a la simetría del volumen resultante, los arquitectos sólo tenían que modelar la mitad del espacio dentro del edificio, y un espejo en un extremo permitía reflejar la otra mitad para proporcionar una imagen de todo el espacio. Saarinen declara que el uso de modelos físicos les permitió desarrollar una línea mas fluida para la definición de las formas, como el puente que conecta los balcones y para las escaleras que conducen a cada lado, y las superficies alrededor de la escalera.

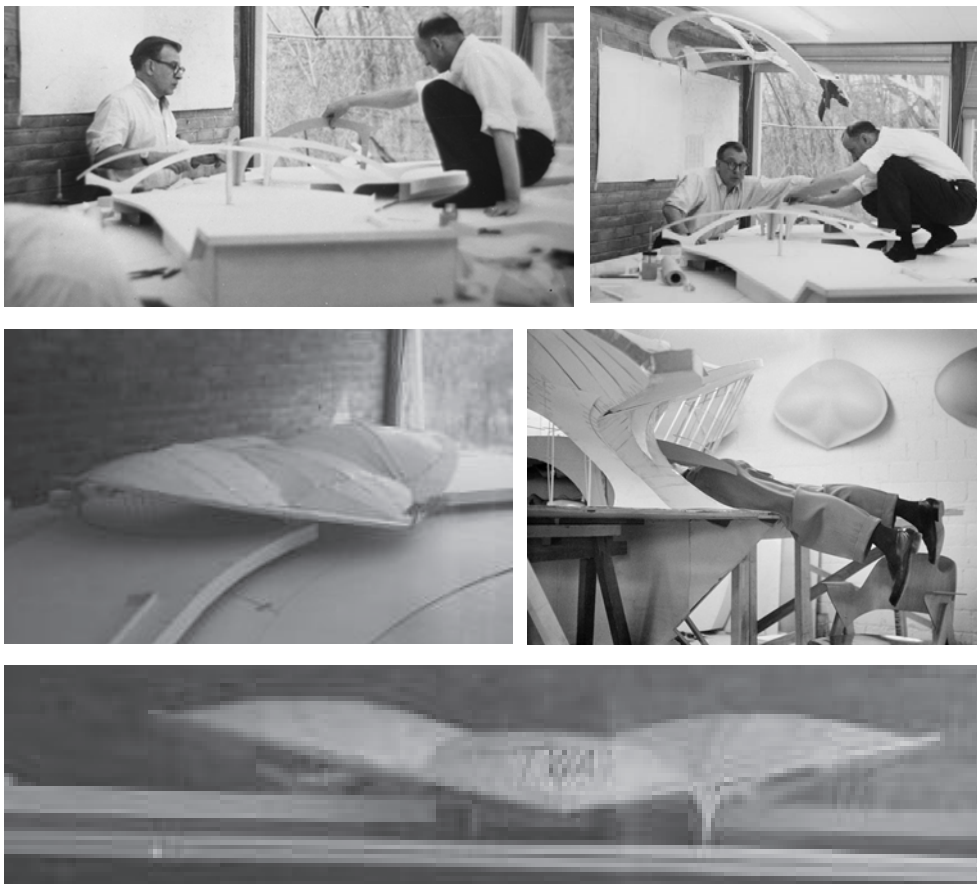
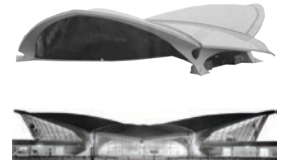


Fig.3-2-45:
(1), (2), (3), (4) Vista de Eero Saarinen y Kevin Roche trabajando en la maqueta del TWA.

1935
Nervi
Air Force
Hangar
Orvieto,
Italia

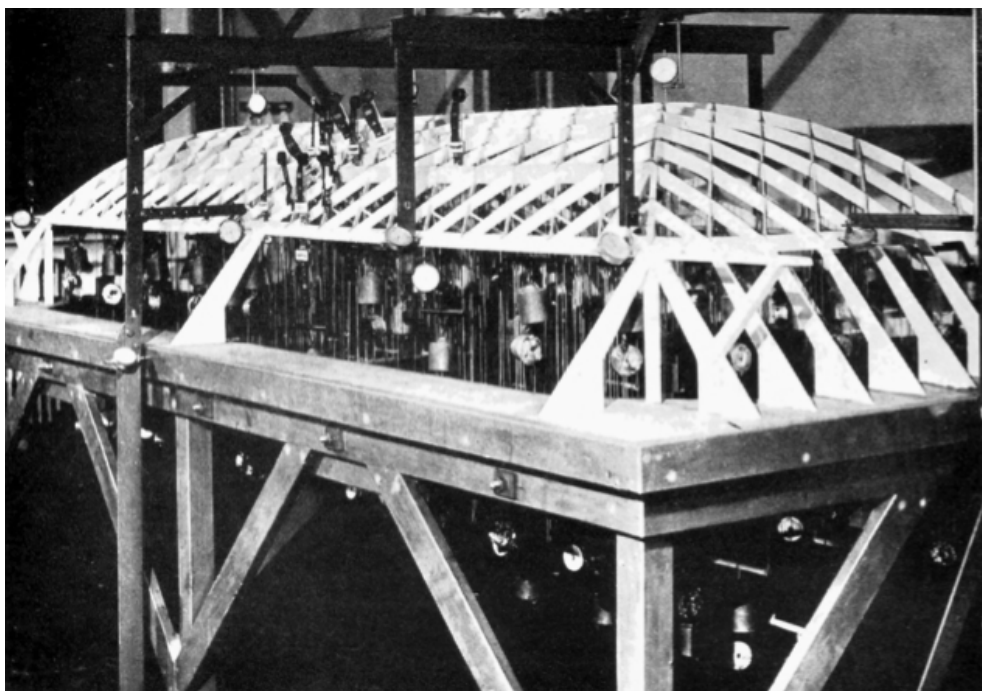
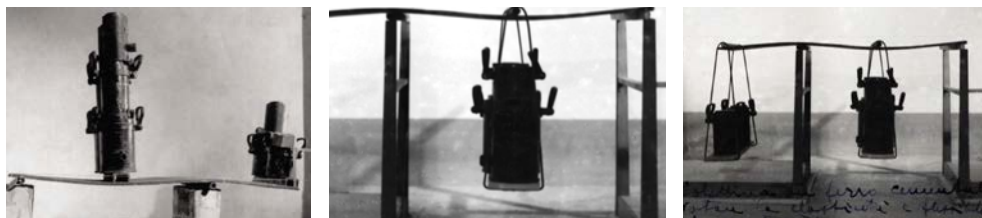


PROYECTO	Air Force - Eight Airplane Hangars
AÑO	1935
AUTOR	Arturo Danusso, Guido Oberti.
LUGAR	Laboratorio de Ciencias de la Construcción, Politécnico di Milano.
MATERIAL	Celuloide, Metal (cargas)
ESCALA	1: 37.5
TIPO	Prueba de Cargas

Junto con el ingeniero Eduardo Torroja, fundador de varios laboratorios en Madrid, uno de los actores principales en el campo de los modelos físicos en Europa fue el ingeniero italiano Arturo Danusso, quien estableció un pequeño laboratorio de Ciencias de la Construcción en la Universidad Politécnica de Milán alrededor de 1930 (Arredondo et al, 1977; Danusso et al.,1941).

En 1935, Danusso comprueba en un modelo de escala 1: 37.5, la compleja estructura de los famosos hangares de hormigón armado de Nervi, que resultaban casi imposible de ser verificados teóricamente (Nervi, 1938). Los hangares representan la primera vez en la que Nervi utiliza, además del cálculo estático, unas pruebas con maquetas a pequeña escala con el fin

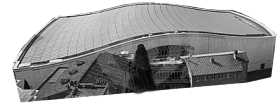
Fig 3-2-46: Modelos en celuloide para la primera y segunda series de hangar en el Model and Construction Testing Laboratory en el Politécnico de Milano.



de medir con precisión los esfuerzos a los que estaba sometida la estructura, a fin de verificar en la fase final del proyecto la validez de su diseño estructural original. Esta metodología estaba en sintonía con la filosofía de Nervi, que estaba convencido de las limitaciones que presentaban las fórmulas matemáticas, y dada la dificultad del complejo cálculo estructural con los medios tradicionales. Nervi siempre prefiere un enfoque empírico para diseñar, incluso es posible afirmar que la costumbre de utilizar modelos estructurales se convierte en uno de los componentes más representativos del método de diseño de Nervi, como lo ha señalado el crítico Giulio Carlo Argan (Argan, 1965).²⁶

Probablemente, el modelo de los hangares de Nervi es la primera aplicación de una investigación experimental del estudio estático a escala de un edificio (Fig 3-2-46).²⁷

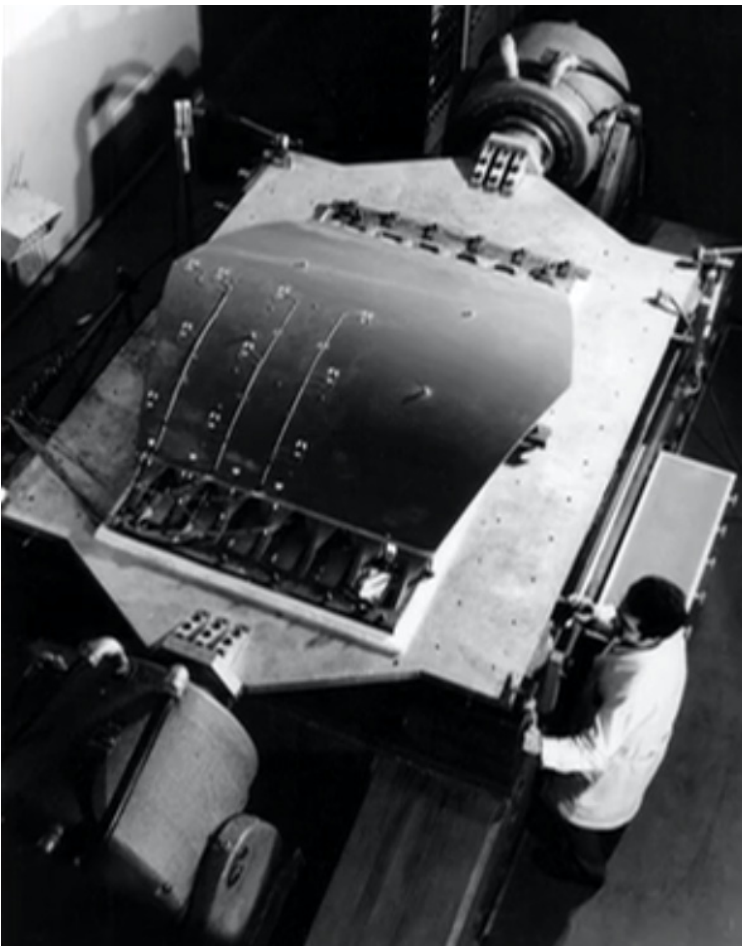
1964-71
Nervi
Audience Hall
Vatican City, Italy.



26 Chiorino, M; Chiorino, C. Pier Luigi Nervi: Architecture as Challenge. In: da Sousa Cruz, Paulo J. (Ed.), *Structures and Architecture: New Concepts, Applications and Challenges*. CRC Press : Har/Cdr Edition, 2013, pp. 13-24.

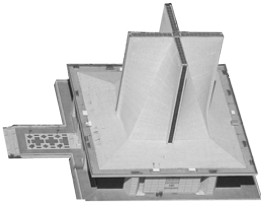
27 Mariano, Fabio. *Pier Luigi Nervi: una Scienza per l'Architettura*. Roma: Istituto Mides, 1982. P. 3.

Fig 3-2-47: ISMES. (Izq.) Modelo de estudio para la estructura con curvatura. (Der.) Pruebas de carga, y las maquinas que se



1971
Nervi
Saint Mary's
Cathedral
San Francisco,
USA.

PROYECTO	Catedral Saint Mary, San Francisco
AÑO	1964
AUTOR	Guido Oberti
MAQUETA	ISMES / Istituto Sperimentale Modelli e Strutture
MATERIAL	Celuloide, Metal (cargas).
ESCALA	1:100, 1: 30, 1:36, 1:15
TIPO	Pruebas de viento, seísmo, y de quiebre.

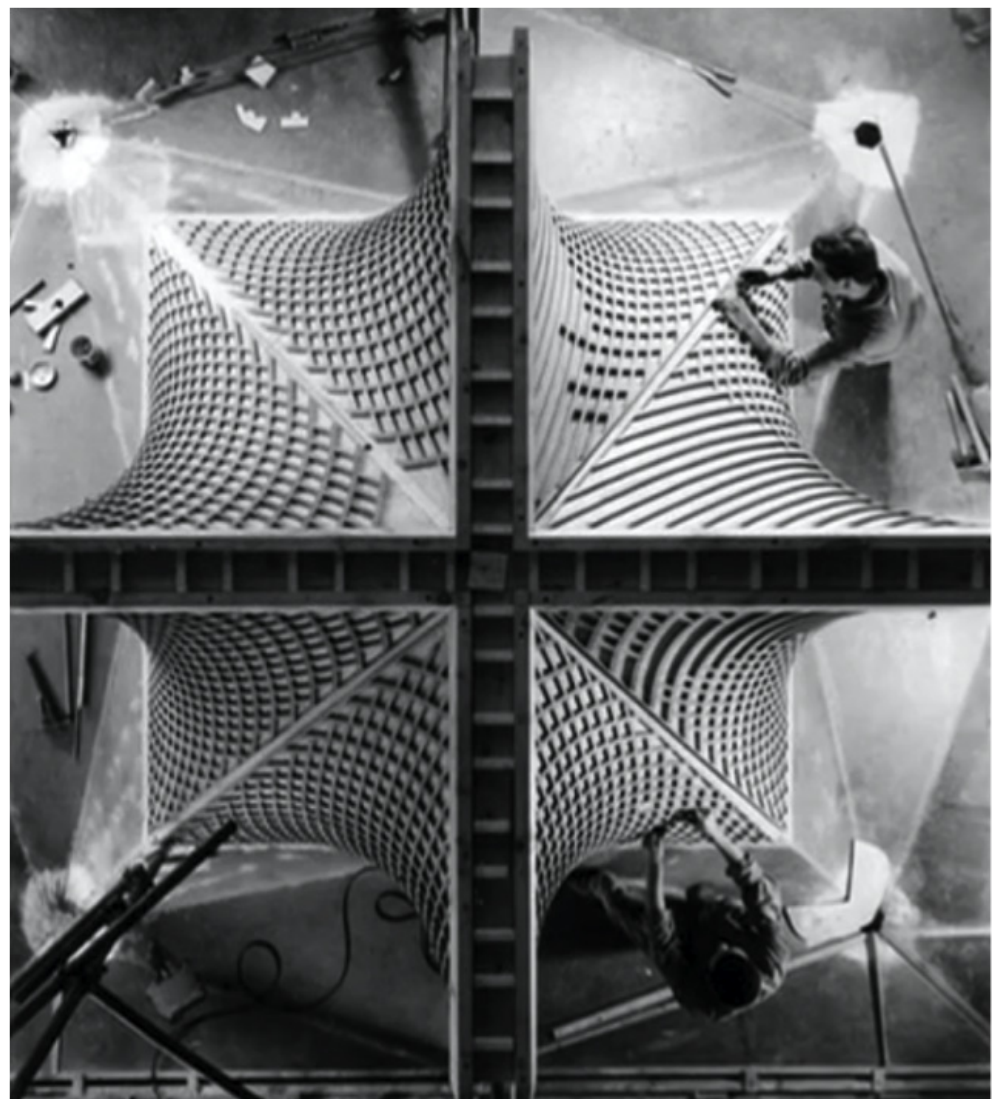


El protagonismo de los modelos estructurales se hizo cada vez más intenso durante la década de los 50, cuando Danusso funda ISMES, el Instituto Experimental para los modelos y estructuras en Bérgamo, cerca de Milán. Creado para estudiar, a través de modelos de gran escala, la eficiencia de las grandes represas, en unos pocos años se establece como uno de los institutos más renombrados del mundo.²⁸

Nervi establece una estrecha colaboración con ISMES, y explora extensamente diversos aspectos en sus estructuras utilizando modelos físicos altamente detallados denominados modelos estructurales. Se intentaba replicar las condiciones físicas a las que son sometidas las formas, principalmente de cargas dinámicas como el viento, la vibración y el seísmo, has-

28 *Ibid.* 25

Fig. 3-2-48: Modelo de la Catedral de San Francisco a escala 1:36.89 durante la prueba dinámica en mesa vibratoria, 1965.



ta provocar el quiebre y la fractura, proceso que es monitoreado extensamente por ordenadores en estrictas condiciones de laboratorio, las que fueron consideradas un capítulo de excelencia del experimentalismo italiano.²⁹ Esta estrategia fue implementada exhaustivamente en el proyecto de la catedral de Saint Mary, ya que se encuentra localizada en la ciudad de San Francisco, dentro de una de las fallas geológicas mas importantes del mundo, y por lo tanto era extremadamente susceptible a terremotos de gran intensidad. Para su evaluación, Pier Luigi Nervi utilizo maquetas de escala 1:100, 1:36, y hasta 1:15, para comprobar diversos comportamientos en formas previamente inexploradas. El modelo a escala de 1:30 se realiza por varias razones: para tener conocimiento de las tensiones internas, debido a que el dimensionamiento de los elementos estructurales no podían realizarse con exactitud con los métodos conocidos de la estática, y por lo tanto sus dimensiones fueron determinadas solo por cálculos aproximados, y consideraciones intuitivas. Probablemente, el modelo de la catedral de Saint Mary seria una de las primeras aplicaciones de la investigación

29 *Chi e' Pier Luigi Nervi. Costruire Correttamente*, 2012. [viewed 28 October 2015]. Available from: http://costruirecorrettamente.org/site/chi-e-pier-luigi-nervi/index.php?doc_id=76

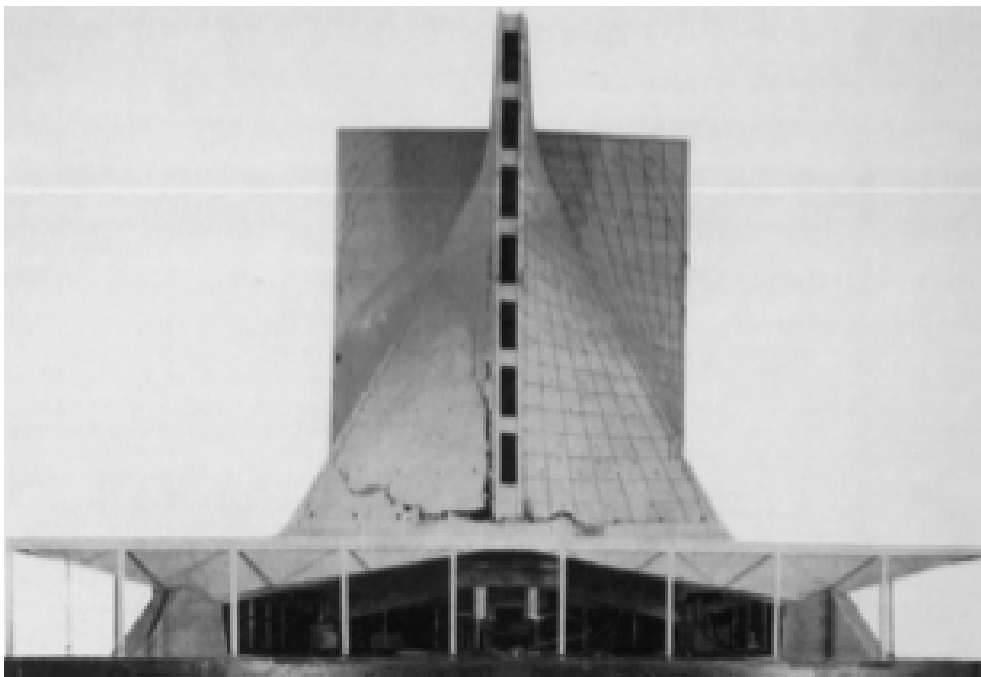


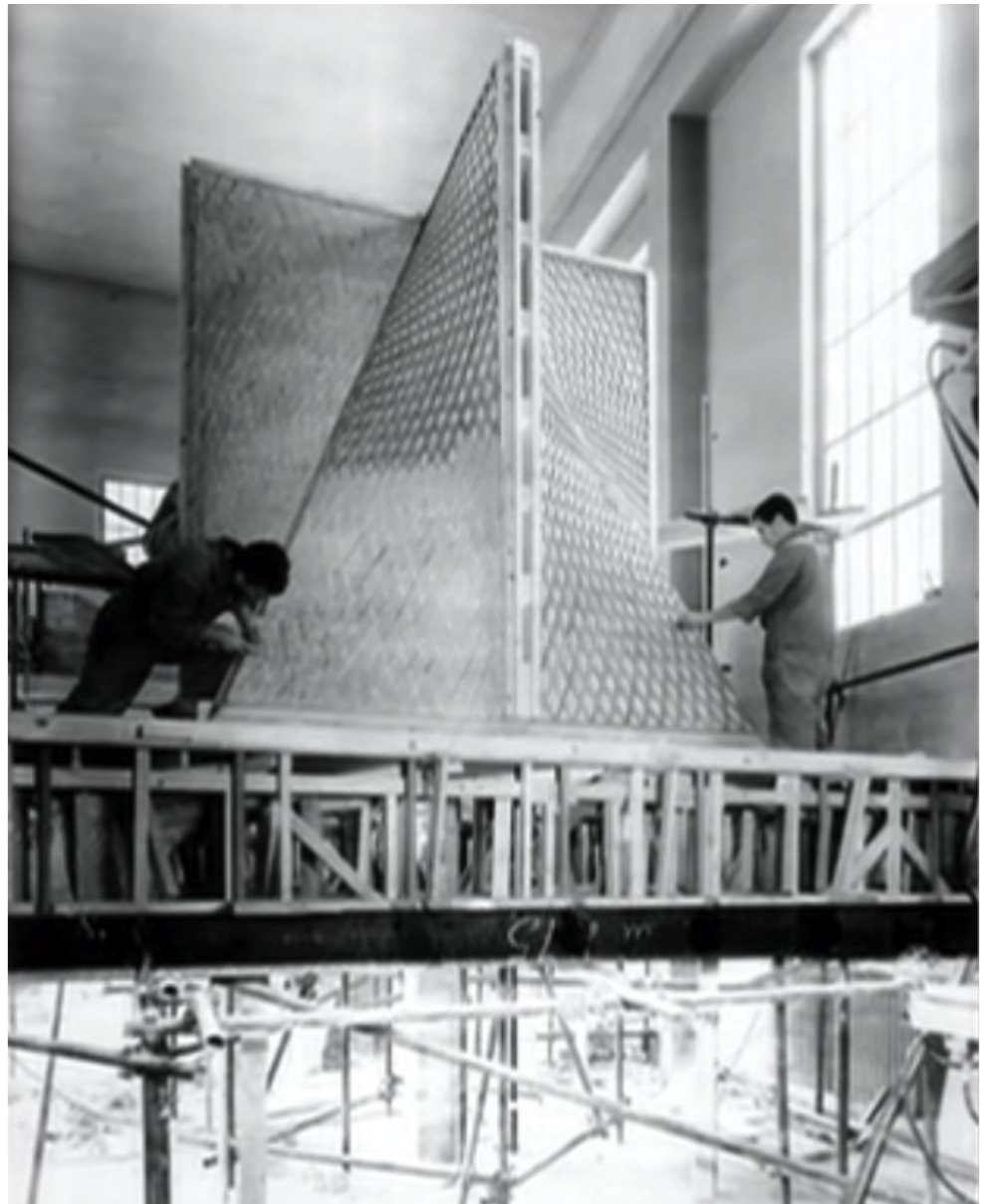
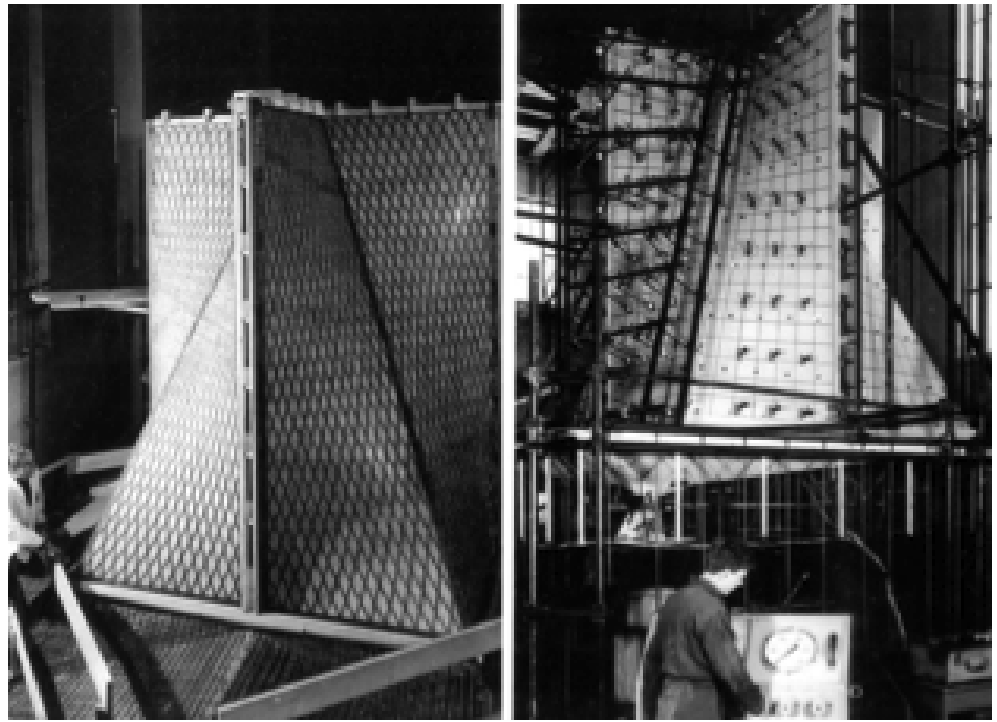
Figure 3-2-49:

Model 1:100 Cathedral Saint Mary, San Francisco. Maquetas para pruebas de viento, dinámica en mesa vibratoria, cargas de quiebre/rotura. Politécnico di Milano, 1964. Photo Gabriele Neri.



Figure 3-2-50:

Modelo a escala 1:15 listo para ser comprobado con prueba de cargas.



experimental al dimensionamiento de una gran estructura.³⁰ Los primeros ensayos con modelos demuestran que las cargas transmitidas por la cruz de la cúpula eran excesivas en el punto medio de las superficies de apoyo. El problema surgió de la rigidez de la cruz en S, ya que debía de ser compatible con las estructuras de paraboloides hiperbólicos que completan la cúpula. El resultado concluye que las superficies eran demasiado débiles para transferir las cargas en los pequeños pilares inferiores de las esquinas, se sugiere una solución que no afectaría la elegancia de la estructura: una pequeña reducción del espacio entre los pilares de esquina y la configuración de caja de luz con nervios de refuerzo internas. Esta solución resultó ser prudente, en vista del problema sísmico típico de la ciudad.³¹

Pero el método empírico implementado en los modelos estructurales de Nervi se confrontarían a cierta resistencia al ser implementados en Estados Unidos. En 1966, al finalizarse los modelos para la catedral de San Francisco después de más de dos años para encontrar la forma final, el ayuntamiento impuso investigaciones adicionales porque estimaba que los ensayos proporcionados por ISMES eran insuficientes para la complejidad y el tamaño de la estructura. Una comisión examinadora designada por la Oficina de Inspección Municipal de California afirmaba que si bien los modelos de ISMES eran cuidadosamente hechos y testeados, reconocían las limitaciones prácticas de la simulación estructural y de su instrumentalización, las que fueron desarrolladas en programas de prueba, y algunos cambios fueron introducidos al diseño original (Barón 1967). La comisión calculó nuevamente la estructura utilizando métodos diferentes, incluyendo un software particular para estructuras en costillas reforzadas para cáscaras, que había sido desarrollado por la Universidad de California. Así, se confirmaba que las técnicas implementadas por ISMES estaban obsoletas. De hecho, el ingeniero local a cargo del proyecto Leonard Robinson, afirmaba en 1971 que ya existían algunos sofisticados programas computacionales para resolver problemas tridimensionales que permitían diseñar estructuras de cáscaras con alto nivel de refinamiento en un tiempo relativamente corto (Robinson 1971).³² A pesar de estas dificultades, los modelos para la Catedral de San Francisco evidenciaron el alto nivel científico que alcanza ISMES, a tal punto que se podría afirmar que surge un método de proyecto que es también una protocolo de administración, logística y construcción, que se denominó el "Sistema Nervi" (Bologna, Neri, 2013).³³ Dos notables ingenieros, Guido Oberti y Enzo Lauletta, serían personajes de gran impacto en el desarrollo de estas metodologías, contribuyendo a aumentar la reputación de Nervi como un ingeniero experimentador.

En el proyecto de la Sala del Vaticano se solicitó a ISMES ejecutar algunas pruebas en modelos físicos de la estructura con cables pre-tensados.³⁴

30 Nervi, Pier Luigi. *Pier Luigi Nervi : Construcciones y Proyectos*. Munné, Antonio (Trans.). Barcelona : Gustavo Gili, 1958. P. 28.

31 Pier Luigi Nervi. ISMES Experimental Institute for Models and Structures. 2007 [viewed 28 October 2015]. Available from: <http://www.ismes.org/>

32 Bologna, A.; Neri, G. *Pier Luigi Nervi in the United States. The height and decline of a master builder*. In: *Structures and Architecture: New Concepts, Applications and Challenges*. CRC Press, 2013.

33 Ibid.

34 ISMES. Op. cit.,p.X.

1972
Olympic Stadium
Munich
Otto

PROYECTO	Estadio Olímpico de Munchen
AÑO	1968
MATERIAL	Metal. Cable, Textil.
ESCALA	1: 125
TIPO	Generativa

El diseño del Estadio Olímpico de Munchen, propuesto inicialmente por Behnisch, plantea un modelo similar a la estructura del Pabellón Alemán de Montreal de Frei Otto y su equipo. Durante la etapa de pre-diseño, Otto construirá un gran número de modelos y detalles de estudio, llevando a cabo numerosas pruebas sobre la viabilidad de su construcción.

Los nuevos métodos de cálculo matemático y geodésico facilitaron la definición del proyecto, y los modelos físicos fueron aplicados posteriormente como instrumentos de apoyo altamente relevantes. El modelo a escala de 1:125 fue diseñado de acuerdo a los cálculos preliminares que habían completado los ingenieros, que consideraban la definición de fuerzas en la malla, los apoyos y los anclajes. Para encontrar la forma, se aplica

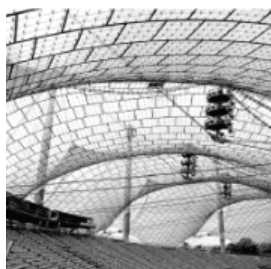
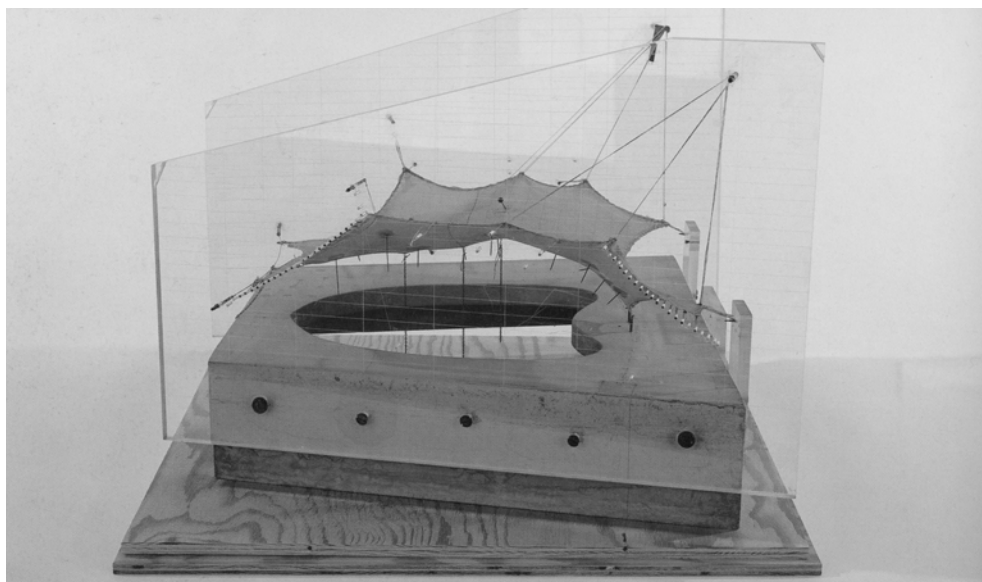
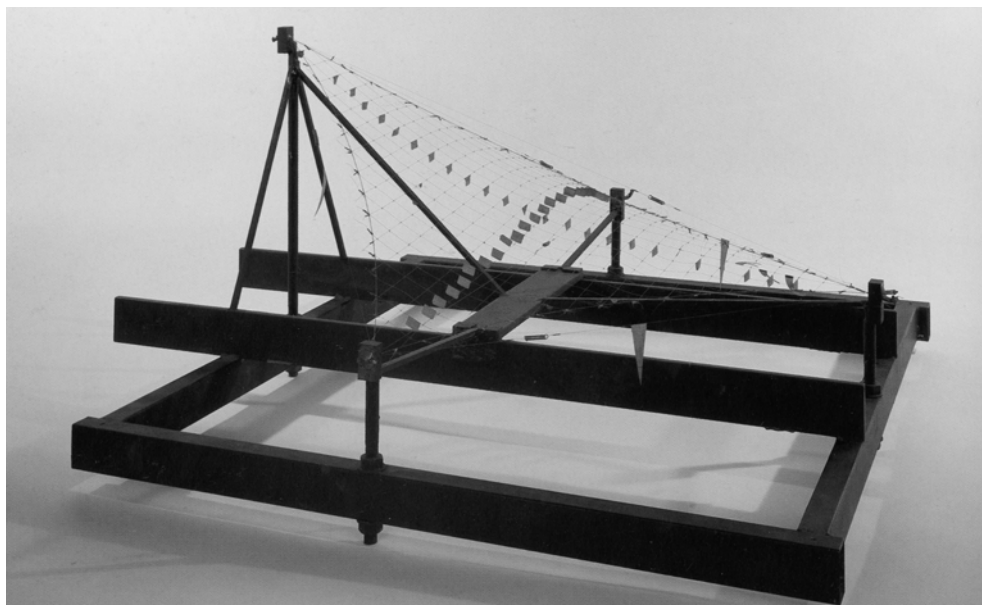


Fig. 3-2-51: Frei Otto, cubierta del Estadio Olímpico de Munchen, maqueta con el aparato de fotogrametría.



el singular método de fotogrametría: se definen los apoyos, y se miden las deformaciones directamente en el modelo sometido a las tensiones superficiales resultantes por las cargas, como el peso propio, la nieve y el viento. Varios puntos fijos se utilizaron para tomar fotografías de doble exposición, primero de la estructura sin estar sometida a cargas, y después bajo cargas, registrándose el movimiento con la ayuda de instrumentos de medición tridimensional que registraba las áreas seleccionadas en coordenadas.³⁵

35 Otto, Frei; Schanz, Sabine. *Frei Otto, Bodo Rasch : Finding Form : Towards an Architecture of the Minimal*. Stuttgart : Axel Menges, 1995. P.107.

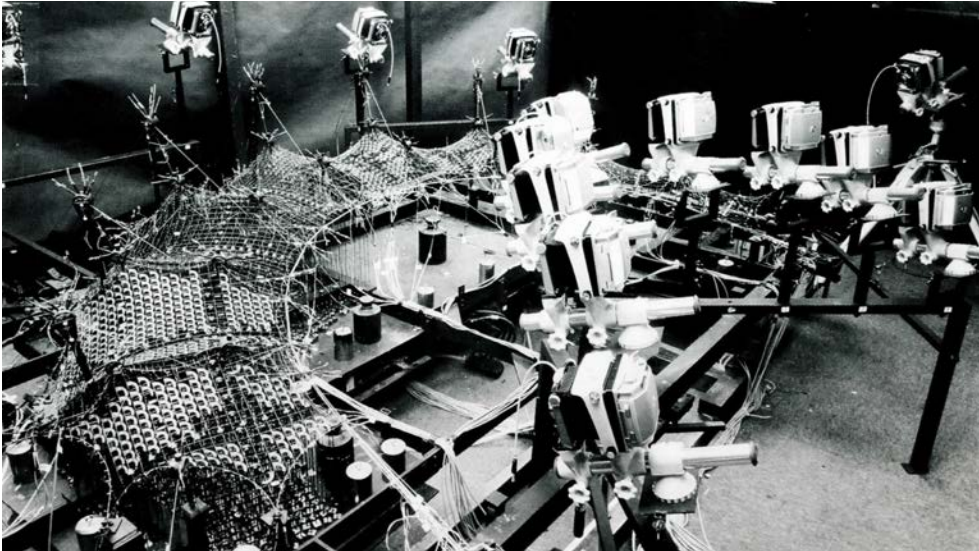
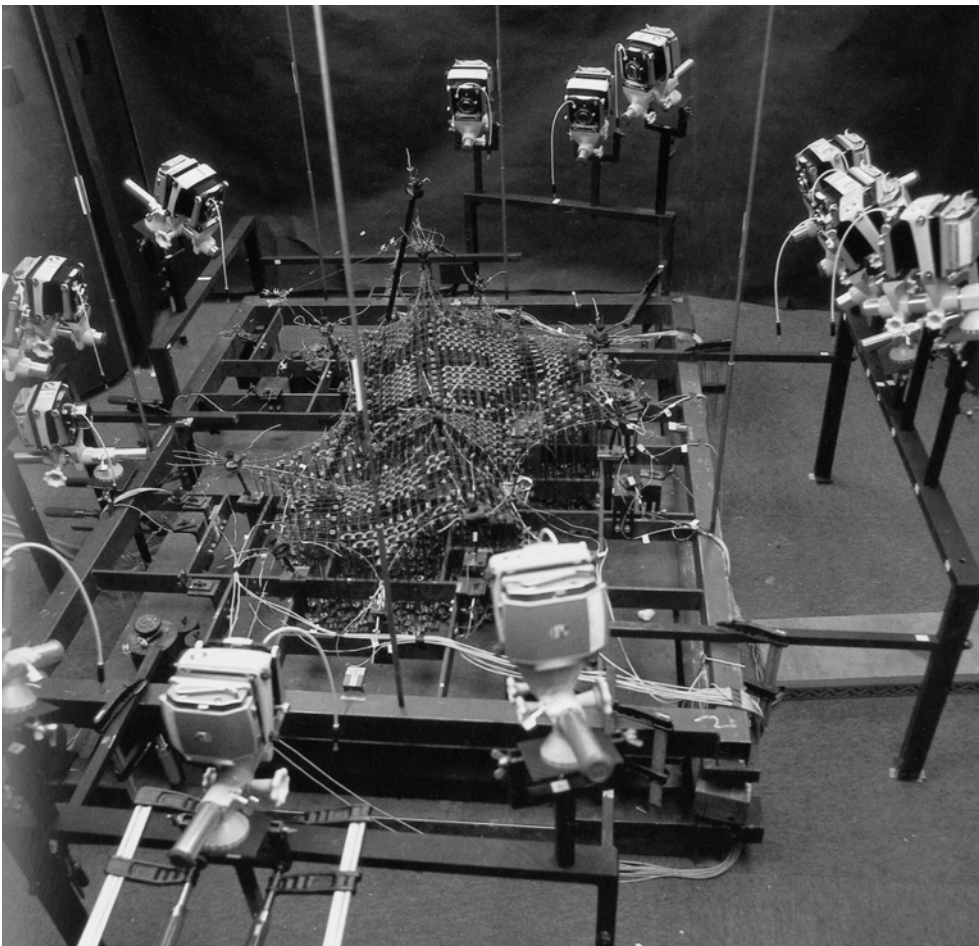


Fig. 3-2-52: Frei Otto, cubierta del Estadio Olímpico de Munchen, construcción experimental, herramienta de medición.



1957-73
Utzon
Sydney Opera
House
Sydney, Australia.



PROYECTO	Sydney Opera House
AÑO	1958
AUTOR	Professor Peter Morice
LUGAR	Southampton University
MATERIAL	Madera (modelo de vientos), Perspex (prueba de cargas).
TIPO	Simulación, representacion, prototipado, matemáticas.

Una serie de modelos fueron desarrollados para el proyecto del Sydney Opera House. Para el concurso, Utzon presenta un modelo de cascarones que habían sido dibujados a mano alzada y que no se basaban en una geometría regular. Por mas de tres años, el equipo investigaría sin éxito la geometría de una membrana parabólica de hormigón. Una vez que la solución de la geometría esférica es determinada, Utzon enseña un modelo conceptual conformado por circunferencias de alambres enlazados que representa claramente una abstracción de la solución (Fig. 3-2-53). Posteriores maquetas demuestran la sencillez en la resolución geométrica a partir de una esfera, conformadas por segmentos similares a los gajos de una naranja.

Para calcular las superficies, el ingeniero de Arup Peter Rice trabajaría en uno de los primeros computadores Pegasus por cerca de un año, con el investigador y el experto en cáscaras de madera Dr. Lionel Geoffrey Booth. Rice trabaja en el computador del University College London (UCL). Trabajando con el ordenador, a Rice le pareció maravilloso poder obtener resultados casi instantáneos, a pesar de que sólo podía obtener la hora en el equipo del UCL entre 23:30pm y 3:00am. Los ordenadores Pegasus 1 (Fig. 3-2-61) serían incorporados en 1958 en el Southampton University para "Research & Service work", en 1959 en el University College London, y ac-

Fig. 3-2-53: a) Joern Utzon muestra una maqueta conceptual del Sydney Opera House.

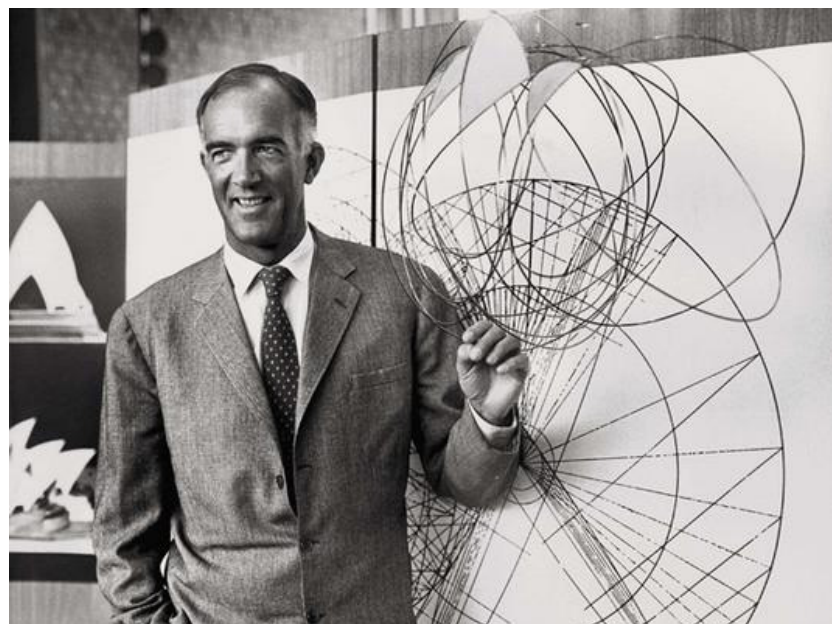




Figure 3-2-54:
Maquetas en diversos puntos del desarrollo del proyecto, desde la maqueta presentada en el concurso (arriba) hasta maquetas de la geometría esférica implementada.

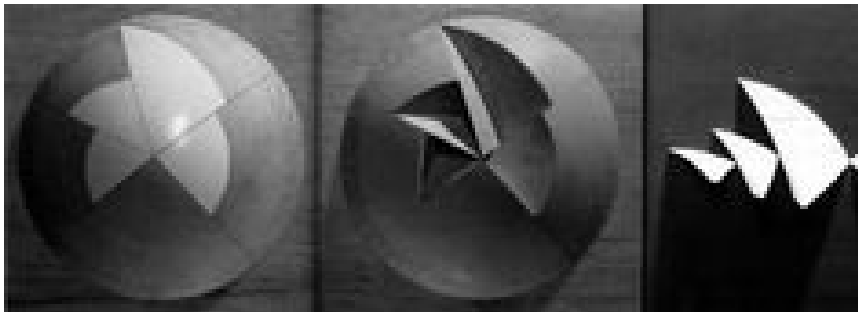
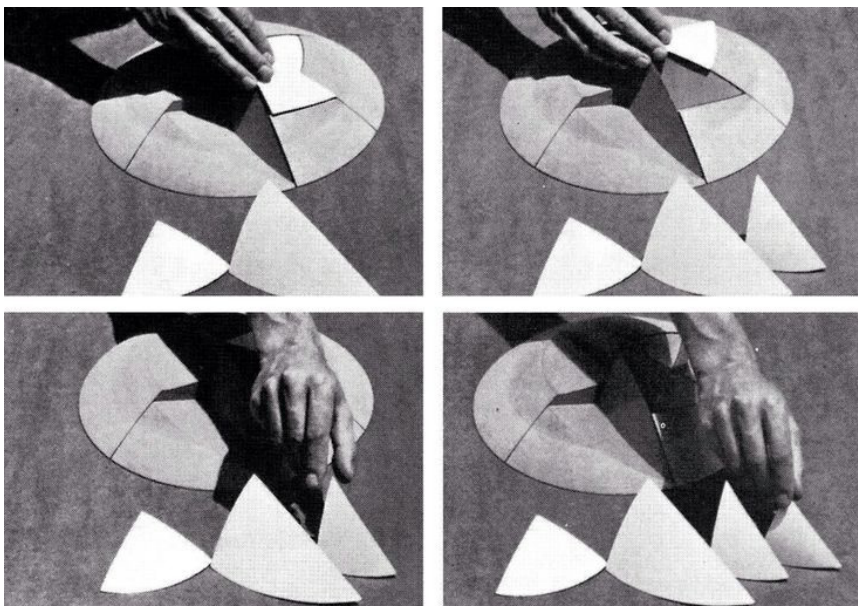


Figure 3-2-55:
Maquetas en madera.



tualmente esta maquina esta expuesta en la galería 46 del London Science Museum.³⁶

Desde 1958, una serie de pruebas físicas se llevaron a cabo en la Universidad de Southampton por un equipo encabezado por el Profesor Peter Morice, quienes desarrollan maquetas de madera para las pruebas de viento, y en láminas de metacrilato para las pruebas de carga.

Otra serie de modelos se han identificado para el estudio de los interiores del proyecto. Por ultimo, se detecta la existencia de varios prototipos a escala real de elementos para evaluar la prefabricación de sus partes.

36 *Ferranti Pegasus, Perseus and Sirius: Delivery Lists and Applications*. Computer Conservation Society. 2003 [viewed 10 October 2015], Available from: <http://www.ourcomputerheritage.org/ccs-f3x1.pdf>

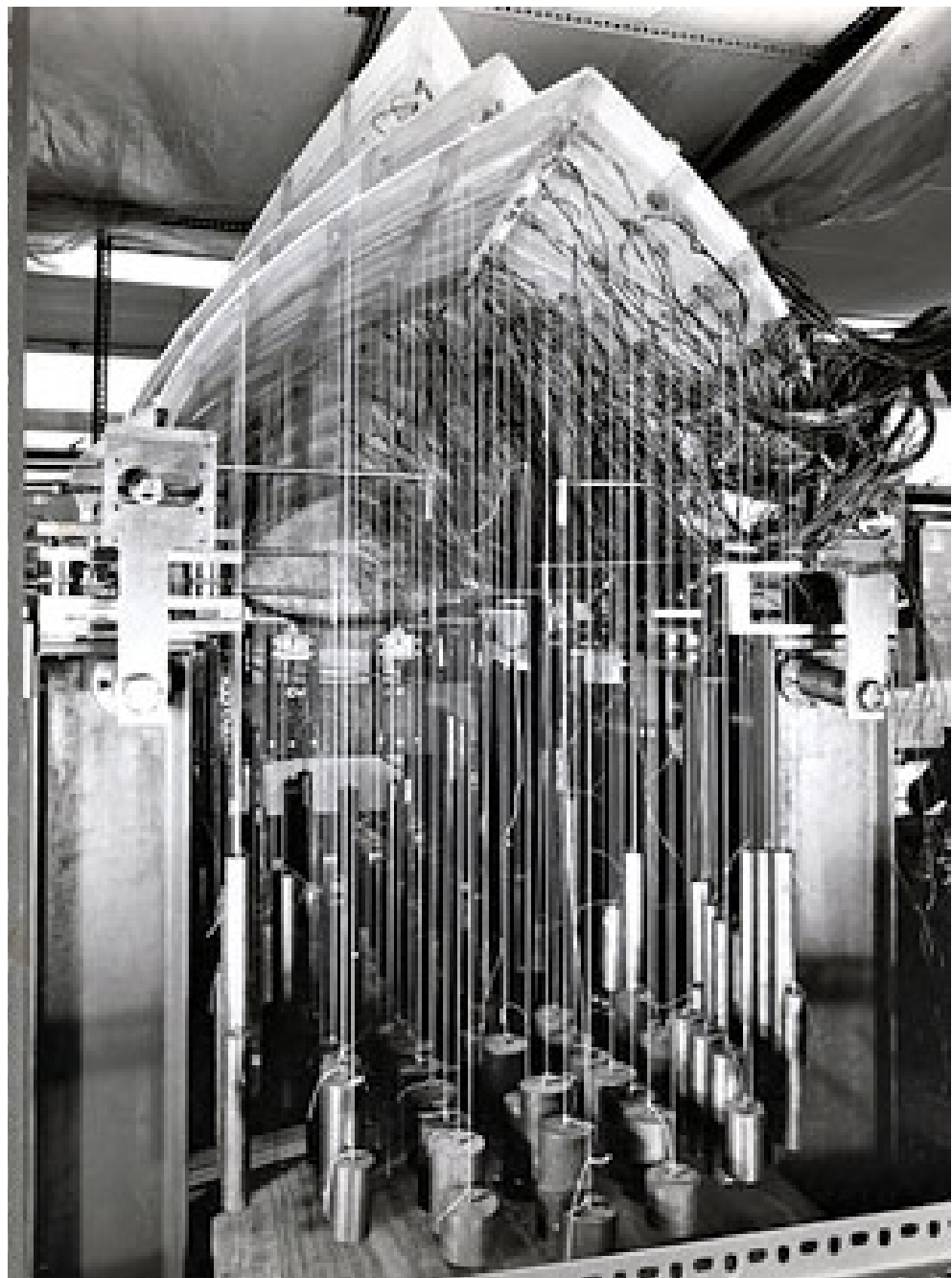


Fig. 3-2-56: Arup. Sydney Opera House structural roof model B under vertical load testing at Southampton University, 1958.

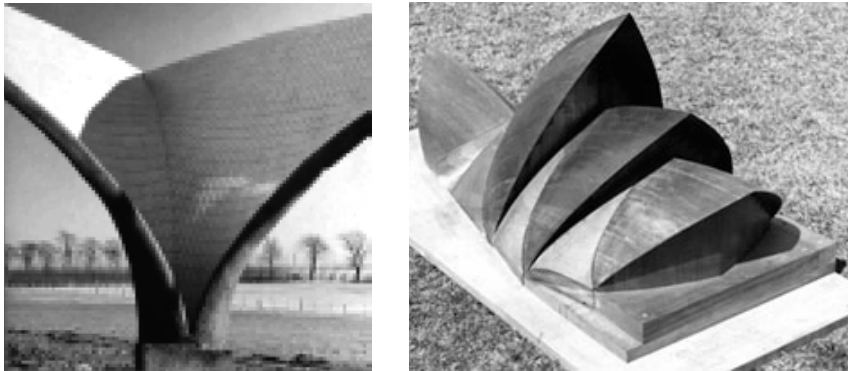


Fig. 3-2-55: Modelo en madera de la techumbre del Sydney Opera House, utilizado para una prueba de viento (c.1958). Los modelos físicos se realizaron en el Southampton University por un equipo dirigido por by el Profesor Peter Morice.



Fig. 3-2-57: Arup. Sydney Opera House maqueta estructural de techumbre B bajo prueba de cargas verticales realizado en el Southampton University (c.1958).



Fig. 3-2-58: Model C being subjected to loads representing wind forces (c.1958). Photo: © Peter Morice

1979
Heinz Isler
Heimberg Tennis
Center
Switzerland

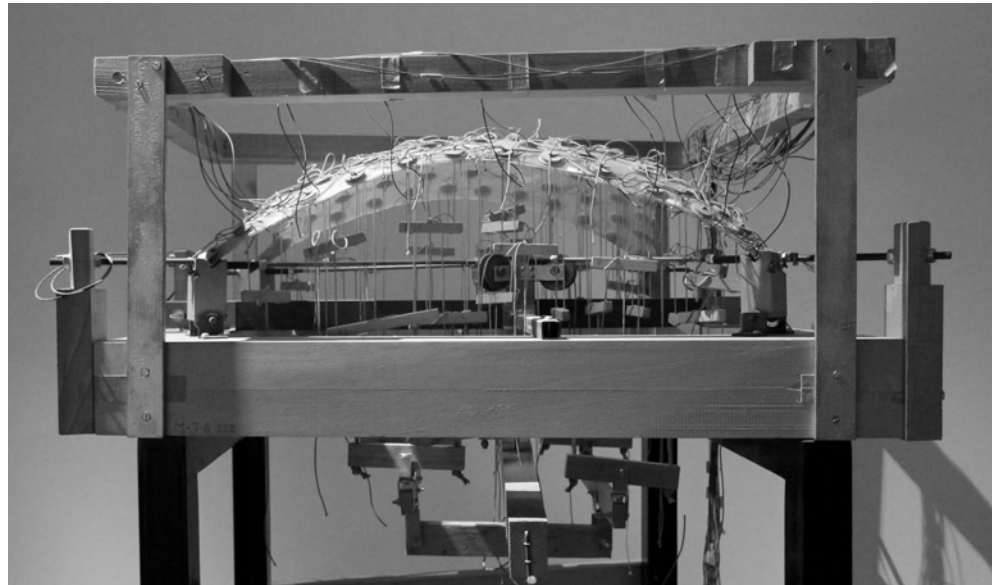


PROYECTO	Estación de gasolina, Deitingen, Switzerland
AÑO	1967
MATERIAL	Fibra de vidrio reforzada con epoxi, metal y madera.
TIPO	Generativa

El ingeniero suizo Heinz Isler continua el trabajo de Otto con respecto a los modelos colgantes, implementando variadas técnicas de maquetas en el desarrollo de sus proyectos (Fig. 3-2-59 y 3-2-60). Ávido por construir y trabajar con prototipos, Isler produce variadas maquetas de cable, textiles, y especialmente en fibra de vidrio de grandes proporciones. Su análisis aplica cargas precisas a los modelos, que se verifican mediante sensores. Isler también implementa un sorprendente experimento cuando cuelga una tela por cuatro esquinas en el exterior, y la moja para congelarla durante las noches de invierno, generando envolturas efímeras, que se refuerzan estructuralmente añadiendo fibra de vidrio, con espesores del orden de $1/250$ de la luz a cubrir.³⁷

37 Sarrablo, Vicente. La construcción de formas complejas. *Tectónica*, 2004, no. 17. Pp.18-29.

Fig.3-2-59 y 3-2-60:
Modelo colgante hecho
de fibra de vidrio
reforzado con resina
epoxi, metal y madera,
por Heinz Isler para la
gasolinera en Deitingen,
Suiza, 1967.





RESULTADOS

Este capítulo ha demostrado que el uso de las maquetas físicas ha aparecido como fenómeno recurrente durante el Siglo 20, y ha tenido un rol decisivo en la formulación de proyectos de formas singulares. Su uso aparece en 15 de los proyectos seleccionados, lo que representa el 28%, y si bien este número no es alto, la variedad de maquetas detectadas en algunos proyectos es sorprendente. Dada la naturaleza pionera de las soluciones propuestas, sus autores recurrían a ellos por diversas razones y con distintos objetivos, los que han afectado su formulación y su desarrollo.

Dado el alto grado de experimentación de las propuestas seleccionadas, y también debido a las limitantes tecnológicas de su tiempo, muchas veces las maquetas resultaron altamente instrumentales para investigar soluciones previamente inexploradas. Su énfasis ha variado dependiendo de cada proyecto, y por lo tanto, es posible identificar cinco categorías de maquetas: representativo, simulación, prototipado, generativas, y digitales. A continuación se exponen cada una de estas modalidades.

1. Maquetas como modelo representativo: En algunos de los casos seleccionados, se explora el modelo físico en sus aspectos de representación formal y de interpretación del espacio. La búsqueda formal en las maquetas físicas se hace evidente en el trabajo de Saarinen con maquetas abstractas más bien conceptuales que se trabajan y modifican como una escultura en constante cambio porque no se intenta presentar una maqueta tradicional a clientes como producto terminado, sino como una herramienta de modelamiento participe del proceso de diseño, una especie de croquis tridimensional. Utzon también hace uso de la maqueta como instrumento para representar un concepto. Ejemplos: Eames & Saarinen IBM pavilion (1964-5), TWA Terminal (Saarinen 1958-62), Sydney Opera House (1957-73, Utzon/O. Arup/P. Rice), Philip Pavilion (1958, Xenakis / Le Corbusier), Geodesic Dome Expo 67 (1952, Fuller), Escuela de la Sagrada Familia (Gaudi).
2. Maquetas como modelo de simulación: La prueba de fuerzas explorando diversos parámetros de una manera científica: carga, o fuerzas laterales como viento, o sismo, hasta incluso investigar el punto de ruptura/colapso (Nervi) para explorar límites. Pruebas de cargas (Nervi 1964, Torroja 1963-5, Dieste 1962, Candela 1953); Hipódromo de Madrid (1935 Torroja), Air Force Hangar (1935, Nervi), Parroquia de Nuestra Señora de Guadalupe (1963-5, Candela & Torroja), Saint Mary's Cathedral (1971, Nervi), Sydney Opera House (1957-73), Utzon/O. Arup/P.

Rice), Philip Pavilion (1958, Xenakis / Le Corbusier), Iglesia de la Atlántica (1960, Dieste), Capilla Nuestra Sra. de la Soledad (1955, Candela);

3. La maqueta de prototipado: Son construcciones a escala real de partes del proyecto para explorar diversos aspectos del proyecto, como resistencia estructural, secuencia de fabricación y montaje de piezas, como explorar aspectos de resistencia estructural (Hipódromo de Madrid, 1935, Torroja), o bien secuencias de montajes constructivos (Fuller, Utzon). El SOH desarrolla numerosos prototipos: de sus partes preformadas en hormigón, el sistema de ensamble las costillas, la secuencia de montaje con el arranque de la cercha de erección con dos gatos hidráulicos utilizados para mover las piezas longitudinalmente en una obra de restringido movimiento. El Philip Pavilion produce prototipos de sus piezas de hormigón preformadas en un sistema altamente customizado.
4. Maquetas como modelos generativos: Un método activo y dinámico de descubrimiento de la forma como en las catenarias invertidas de Gaudi, Otto y Isler. Maquetas como modelos generativos: Modelos activos de exploración, y generación/ experimentación. Este mecanismo adquiere su máxima expresión con el trabajo de Gaudi y Otto, quienes utilizan estos mecanismos activamente como generadores de forma. El trabajo de Frei Otto podría ser considerado como la culminación y la expresión más refinada de estos procesos, al comprender que las fuerzas que actúan en la forma son parte esencial en su generación. Frei Otto transforma la naturaleza desde una noción abstracta / representativa a una fuerza viva dentro de los procesos de diseño. Este legado cobra hoy inusitado interés en los procesos de gestación de la forma. El trabajo de Otto resulta altamente inspirador en su cabal conocimiento de las formas en relación a su naturaleza y al potencial que estas formas contienen. Este medio ha sido considerado en su potencialidad de representación tridimensional, y la capacidad de modelamiento interactivo de "ensayo y error" del objeto diseñado. Este proceso de "interacción" entre objeto diseñado y diseñador constituye una importante fuente de información y una herramienta viva dentro del proceso de diseño. La importancia de estas manifestaciones radican en que las maquetas físicas pasan de operar desde el campo de la mera representación formal, a un medio activo e inquisitivo de investigación / prueba /performance /comportamiento, e incluso como mecanismo de búsqueda y generador de forma. Notables son estas referencias a la metodología utilizadas por Frei Otto, donde las maquetas físicas son parte integral de los procesos de búsqueda de forma. Proyectos: Superficies mínimas a través de film de jabón (Otto 1960's); o modelos de catenarias invertidas (Gaudi 1898-1908, Otto 1950's, Isler 1987). Olympic Stadium Munich (1972 Otto, Behnisch, Peltz, Weber), Heimberg Tennis Center (1979, Isler).
5. Modelos digitales: Se evidencia el uso del ordenador en el trabajo de algunos autores, los que comienzan a surgir a partir de la década de

1960. Entre ellos destacan:

- a. Candela utiliza uno de los primeros ordenadores que existió en México para realizar cálculos de sus proyectos alrededor de 1960;
- b. Nervi realiza numerosas pruebas en Politécnico de Milán, y luego se asocia a ISMES (Experimental Institute for Models and Structures localizado en Bergamo, cerca de Milan), donde utiliza sofisticadas herramientas para cálculos en ensayos de comportamiento estructural en varios de sus proyectos en Italia y USA. La simulación con pistones hidráulicos con deformaciones locales, peso propio, cargas estáticas en condiciones normales;
- c. En el proyecto del Sydney Opera House (1957-73), Peter Rice fue el joven ingeniero estructural de Arup que logra resolver la geometría esférica alrededor de 1961. Para su definición, Rice utiliza un ordenador Pegasus del Southampton University (adquirido en Marzo de 1958), con un equipo encabezado por el experto en estructuras de membranas Dr. Lionel Geoffrey Booth (Fig.3-2-62). Pero se necesitaban algunos ajustes de los perfiles de las superficies del techo para que los cálculos matemáticos pudiesen converger, de modo que un análisis más detallado por ordenador se llevó a cabo en el University College de Londres (UCL), el que se encuentra actualmente expuesto en el London Science Museum (Fig. 3-2-61). A Rice le pareció maravilloso que podía obtener resultados casi instantáneos, a pesar de que sólo podía acceder al equipo de ordenadores del UCL entre 23:30pm y 3am.³⁸ Rice trabaja durante 7 años en este proyecto, y su contacto con Utzon ejerce una gran influencia en su carrera.³⁹
- d. Otto también utiliza la computación para evaluar los modelos del Estadio Olímpico, elementando un avanzado método de fotogrametría.
- e. Un fenómeno reciente es el levantamiento digital de algunos proyectos seleccionados en este estudio que se han realizado por motivos de mantenimiento y reforma de estos proyectos, algunos de los cuales ya presentan signos notables de deterioro. Un caso notable es la torre de Shukhov Shabola, la cual ha sido escaneada en 3D y reconstituida digitalmente. Otra reconstitución digital se ha efectuado en los proyectos de Nervi en el Politécnico de Torino, o la obra de Candela en diversas universidades.

Cabe aclarar que en algunos de los proyectos estudiados se utilizaron múltiples tipos de maquetas para estudiar variados aspectos del proyecto. Se enfatizan los siguientes casos:

- Philip Pavilion (1958, Xenakis & Le Corbusier), donde se desarrollan modelos de representación, simulación, y prototipo;

38 *Engineer Biography : Peter Rice*. Engineering Timelines. 2015. [viewed 10 October 2015]. Available from: http://www.engineering-timelines.com/who/Rice_P/ricePeter3.asp.

39 *Traces of Peter Rice*. Arup. 2012. [viewed 10 October, 2015]. Available from: <http://video.arup.com>



Fig. 3-2-61: Ordenador Pegasus expuesto en el London Science Museum pt. 5. by Marcin Wichary.

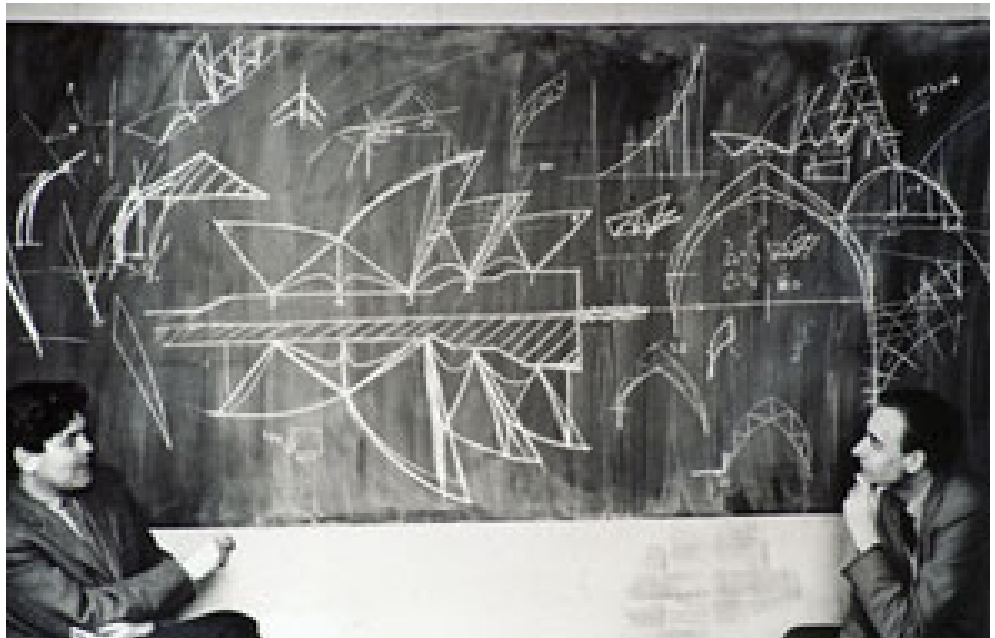


Fig.3-2-62: Peter Rice (izquierda) y Geoffrey Booth ponderan el comportamiento de las formas del techo propuestas. La foto fue tomada alrededor de 1958, poco después de Rice terminó sus estudios en el Imperial College.

- Sydney Opera House (1957-73, Utzon/O. Arup/P. Rice) que también desarrolla una serie de maquetas de representación, simulación, y de prototipo. En estos casos, el uso de maquetas estaba íntimamente imbuido en la formulación y el desarrollo del proyecto;
- Nervi en varios proyectos utiliza una serie de maquetas;
- Fuller: Modelos de representación y simulación;
- Isler utiliza modelos generativos y de simulación de manera profusa;
- Otto utiliza modelos de representación y generativos;

Las maquetas eran desarrolladas en diversas escalas. Las maquetas a escala real se transforman en prototipos 1:1 en el caso de Candela, Torroja, Dieste;

- 1:10 para Gaudi, Otto, Utzon, Nervi, Isler, Xenakis/LC,

En cuanto a materiales utilizados, las estrategias son distintas:

- Gaudi: Plaster, cordel y bolsas de arena;
- Otto: Textiles, pompas de jabón, hilos;
- Candela, Torroja: Concreto;
- Saarinen: Cartón, alambre;
- Nervi: Materiales a escala (concreto, acero, celulosa);
- Isler: Textiles, fibra de vidrio con epoxi;

La generación de maquetas físicas tendía en la mayoría de los casos, a la comprobación de ciertos procesos de optimización que obedecía a parámetros precisos, siendo los mas comunes:

- Carga estática: Se usaron cargas vivas / personas (Candela, Dieste, Fuller), o sacos de arena distribuidos uniformemente (Torroja), o pesos a escala (Nervi, Utzon, Otto, Isler);
- Cargas laterales: Se detectan 3 fenómenos en la investigación
 - o Vientos: Utzon, Nervi
 - o Seísmo: Nervi
 - o Vibración: Nervi
- Estético: Este parámetro es difícil de medir dada su alta relatividad;
- Gravedad: La técnica de catenarias invertidas que fue explorada por Gaudi, Otto e Isler. 'Al ser la curva que se comba bajo su propio peso, la catenaria tiene la característica de ser el lugar geométrico de los puntos donde las tensiones horizontales del cable se compensan y por ello carece de tensiones laterales por lo que la cadena permanece inmóvil sin desplazarse hacia los lados. Las fuerzas que actúan son una fuerza vertical, la de la gravedad, y una tensión tangente a la cadena en cada punto que es la que la mantiene estirada.... la estructura que en la arquitectura aprovecha las ventajas mecánicas de la catenaria recibe el nombre de arco catenario y se trata de un arco que adquiere la forma de una catenaria invertida. Al igual que en las catenarias la tensión que padece cada punto del arco se reparte entre una componente vertical y una componente de presión que se transmite a través del propio arco

hacia los cimientos, sin que se creen esfuerzos horizontales, salvo en el extremo llegando ya a los cimientos.”⁴⁰ La catenaria involucra funciones hiperbólicas cuya definición formal “ha estado al centro de la discusión arquitectónica por siglos (...) proporcionando elegancia y espiritualidad al arco, y a la construcción entera”, “evitando contrafuertes, el edificio pesa menos, gana una gracia vaporosa y se aguanta sin raros accesorios ortopédicos”.⁴¹

Estas prácticas permiten extraer algunas reflexiones teóricas que se enuncian a continuación.

3.2.5



CONCLUSIONES

En los Diez Libros de Arquitectura, Alberti recomienda fehacientemente el uso de maquetas físicas como un elemento activo dentro del proceso de diseño arquitectónico, y advierte que su construcción no debe de ser realizada como un producto terminado, sino que como un elemento inacabado y transformable, capaz de representar el ingenio de sus inventores.

La postura de Alberti reaparecería siglos mas tarde en el trabajo de algunos arquitectos del siglo 20, cuando se evidencia un variado uso de maquetas físicas en un grupo de proyectos. Sin lugar a dudas, la irrupción del modelo físico en el trabajo de ciertos buscadores de formas fue decisiva. Sus implicaciones resultan tan significativas, que abarcaron desde sus aplicaciones prácticas hasta consideraciones técnicas, y se extendieron incluso a aspectos teóricos.

Las maquetas se convierten en un elemento activo y decisivo dentro de los procesos de diseño y de construcción, y aparecen en variadas escalas, en distintos formatos, y se realizan con diversos objetivos. Se argumenta que estos esfuerzos intentan representar ciertos aspectos de la realidad construida, desde redefinir ciertos conceptos tradicionales asociados a la maqueta física, así como también de expresar una voluntad propositiva de expandir sus dimensiones y ampliar sus ámbitos de acción. Los diversos énfasis en su formulación se evidencian en la existencia de los siguientes tipos de maquetas: representación, simulación, prototipado, generativos, llegando incluso a detectarse el uso de tempranos modelos digitales. Estas manifestaciones se enuncian a continuación, revisando algunos preceden-

40 *La Catenaria en la Arquitectura*. Departamento de Matemáticas, UPM, Material Docente., p. 11.

41 Bohigas, Oriol; Giralte-Miracle, Daniel; Casanova, Rossend. *Gaudí*. Barcelona : Planeta : Ajuntament de Barcelona, 2002. P.169.

tes, exponentes, y contribuciones en sus aspectos metodológicos, técnicos, y conceptuales.

En primer lugar, la maqueta como instrumento de representación surge de la dificultad que presentan ciertas geometrías para ser visualizadas mediante sistemas tradicionales de proyecciones ortogonales, o incluso utilizando sistemas de representación tridimensional, como la perspectiva o la axonométrica, que constituyen los sistemas predominantes utilizados durante el Siglo 20. Estas incoherencias de la proyección ortogonal se hacen particularmente evidente al intentar representar formas antes inexploradas en 3 dimensiones, especialmente aquellas superficies curvas o inclinadas. Si bien este tipo de maqueta data de antaño, la particularidad de su uso en este estudio es que conceptualmente, la maqueta de representación ha facilitado el entendimiento de las formas no ortogonales, permitiendo pasar del plano al espacio.

En segundo lugar, las maquetas han proporcionado un instrumento de simulación en aspectos que sobrepasan el mero formalismo, y testifica la necesidad de trabajar con las leyes de la naturaleza y los procesos de optimización de las formas según las fuerzas que operan sobre ellas, las cuales obedecen a fenómenos físicos, geométricos y de materialidad. Su aparición también se debe a las limitaciones que presentaban ciertos métodos de cálculo para proporcionar un análisis minucioso, y la maqueta ofrecía una aproximación más detallada. La simulación de modelos físicos comprueba ser una parte influyente y decisiva dentro del proceso de diseño, al considerar geometría, materialidad, apoyos, cargas estáticas o dinámicas (vientos, sismos), o como un esquema del comportamiento estructural inherente a la forma, o el uso de objetos de cierta materialidad para testear aspectos constructivos. Las simulaciones se consolidan como una parte fuertemente influyente del proceso de diseño, al transformarse en un elemento activo con inputs & outputs cambiantes, especialmente cuando se considera componentes similares proliferados a través de una totalidad o ensamblaje, cada uno de ellos siendo afectado por fuerzas fluctuantes, desplazamientos, y deformaciones.

En el ámbito teórico, esta aproximación experimental proviene de las pruebas que Galileo realiza con columnas y vigas, luego continuada por una tradición en pruebas de cargas, como las magistrales utilizadas por Guastavino. Esta postura será defendida vehementemente por varios autores. Danusso define la maqueta como "la máquina calculadora más perfecta que se puede tener". Por otra parte, Nervi afirma que "ninguna demostración teórica puede, de hecho aclarar el funcionamiento de una estructura elástica, como los resultados obtenidos de la investigación experimental, y por otra parte, ningún proceso puede ser tan eficaz para verificar la exactitud de nuestras deducciones teóricas."⁴² Guido Oberti también aboga por la superioridad del método experimental, enfocado a la búsqueda del comportamiento real (estático o dinámico) de una estructura espacial "muy por sobre cualquier otro método teórico concebible". Entre los au-

42 Nervi, Pier Luigi. *Costruire Correttamente : Caratteristiche E Possibilita Delle Strutture Cementizie Armate*. Milano : Hoepli, 1965. P.105.

tores que representan este grupo destacan Nervi, Torroja, Utzon (Arup), y Fuller. Sin embargo, esta investigación ha detectado ciertas limitaciones en el uso de los modelos de simulación, los que presentaron problemas de confiabilidad para el cálculo de las estructuras, lo que se ve ejemplificado en el trabajo de Nervi en San Francisco, que debe de ser re-calculado para su aplicación. Sin embargo, es posible afirmar que las maquetas de simulación han facilitado enormemente, y en muchos casos han sido el elemento concluyente, del paso del modelo abstracto al performativo.

En tercer lugar, la formulación de prototipos, o la construcción de elementos a escala real, han posibilitado el entendimiento del comportamiento de la forma y de sus componentes, especialmente estudiando su dependencia a condiciones de materialidad, sistemas de ensamblaje, procesos constructivos, e incluso ha servido para realizar pruebas de simulación. Una aproximación más reciente revela un renovado interés por el uso del prototipo, entendido como un objeto original, primitivo, y único, que se acerca al concepto proveniente del griego *protos* "primero" y del *typos* "impresión, molde, patrón". Los prototipos aparecen en muchos de los casos estudiados, y ciertos autores revelan una clara afición por su uso, como Torroja, y Dieste. La maqueta de prototipo permite el paso del modelo representado al real.

Las maquetas físicas aparecen como modelos generativos, cuando han facilitado la concepción de formas estrechamente vinculadas al comportamiento según las leyes de la naturaleza, como un elemento determinante en su deducción y definición. Se basan en conocimiento de antaño que se remonta al Siglo 17 con la ley de Hooke, y la cadena colgante, que luego utiliza con los polígonos funiculares Varignon, Poleni, y el magistral uso que hace Gaudí, para luego continuar con Otto, e Isler. Este último afirma que: "El modelo tiene una respuesta a (casi) todo". La maqueta generativa permite el estudio de formas que siguen las leyes de la naturaleza.

Los modelos digitales permiten la formulación y definición detallada de las formas en sus aspectos geométricos y matemáticos. Este estudio registra rastros del uso de modelos digitales en el trabajo de algunos autores, los que permitieron la definición matemática y geométrica de formas de cierta complejidad, y que fueron utilizados para realizar complejos cálculos. Estas prácticas sientan importantes precedentes en el ámbito del uso del modelamiento digital en la arquitectura, aunque es importante notar que resultan desconocidos para una gran parte de la disciplina arquitectónica en la actualidad. Los modelos computacionales permitieron la asociación a una detallada descripción geométrica y matemática desde la forma arquitectónica general, hasta la definición de cada una de sus partes.

Cabe destacar que en la actualidad, la abrumadora aparición y preponderancia de los modelos digitales están seriamente cuestionando la validez de los modelos físicos en los procesos de diseño, a la vez que la relación entre modelo físico y realidad. Al verse confrontado a los avances de la computación y sus crecientes capacidades de representación y simulación, Heinz Isler se pregunta en 1997: "¿Están muertos los modelos físicos?". Se

evidencia que los resultados obtenidos a través de estos programas de simulación, en su mayor parte deben de ser corroborados con modelos físicos reales, porque a pesar de sus ventajas innegables, numerosos softwares advierten claramente que las simulaciones no suponen un reemplazo pruebas físicas de prototipos, los que se requieren para validar cualquier diseño (Scan & Solve 2013), y por tanto obliga a los usuarios a realizar pruebas físicas. Esta advertencia legitimita y enfatiza la relevancia de las estrictas metodologías empleadas por los pioneros del Siglo 20, las que deben ser implementadas rigurosamente en propuestas actuales en ambos formatos digital y analógico. El modelo digital es el complementario del modelo físico.

Una última categoría aparece de manera tangencial a los proyectos estudiados en la obra de ciertos autores, en particular Otto e Isler, quienes han desarrollado modelos conceptuales que relacionan la forma arquitectónica con la estructural. Estas taxonomías sorprendentemente incorporan casi la totalidad de proyectos estudiados, y han ejercido una profunda influencia en el desarrollo de algunos proyectos de formas complejas en la actualidad.

En términos teóricos, se evidencia que la necesidad de introducir variados tipos de modelos testifica de una expansión en las preocupaciones y el énfasis del proyecto, que se podría atribuir como respuesta a los nuevos desafíos que surgen como resultado de la incorporación de formas antes inexploradas a escala arquitectónica y de la integración con la estructura. El énfasis y los objetivos de cada tipo de maqueta era variada: las maquetas de representación facilitaron el paso del plano al espacio; las maquetas de simulación permiten el paso del modelo abstracto al performativo, la maqueta de prototipado propone el paso del modelo espacial al real; la maqueta generativa plantea encontrar formas que siguen las leyes de la naturaleza; y los modelos digitales permitieron formular una detallada descripción geométrica y matemática de las formas.

Las metodologías propuestas por cada uno de los tipos de modelos antes descritos, fueron utilizadas en algunos casos de manera complementaria, lo que permitía que las maquetas fuesen confrontadas y examinadas con otros para un cabal estudio de la obra. Algunos proyectos estudiados exhiben un gran número de maquetas físicas, por tanto, la propuesta de Alberti de modelos inacabados, vivos, y cambiantes, encuentra su expresión en algunos de estos proyectos.⁴³ Se propone que el trabajo con modelos físicos en continua transformación refuerza el modelo abstracto, reafirmando o modificando el concepto de tipo arquitectónico, lo que supone un cambio del pensar que se acerca más a nociones de transformaciones topológicas.

La relevancia de estos modelos radica en que sus autores proponen nuevas metodologías y flujos de trabajo. Se propone un cambio en el énfasis de los elementos del proyecto arquitectónico, donde la forma debe responder a factores específicos, y por tanto, el objeto diseñado pierde su abstracción, y se convierte en un modelo regido por parámetros y condicionantes pre-

cisas. Estos parámetros pueden cambiar para generar la forma, y su ventaja es permitir optimizar ciertos aspectos, lo que testifica que el pensamiento paramétrico esta siempre presente en la generación de maquetas físicas.

La metodología utilizada en los proyectos seleccionados en este estudio abarca desde el modelo analógico al digital, también se evidencia el fluctuante rango de escalas exploradas llegando incluso a tamaños reales, la variada materialidad, y el grado de especificidad en su formulación, son solo algunos de los aspectos que requieren de una cuidadosa investigación porque permanecen aun indocumentados o dispersos.

En la actualidad, este flujo de trabajo parece fluctuar constantemente desde el modelo digital al analógico. Eliasson afirma que ya no evolucionamos del modelo a la realidad, sino del "modelo al modelo" porque "ambos modelos son reales" que "han pasado a ser coproductores de la realidad".⁴⁴, y podemos trabajar de un modo productivo con la realidad experimentada como un conglomerado.

Estas practicas revelan una notable voluntad de continuidad disciplinar, al intentar insertar su trabajo en la búsqueda de métodos y protocolos ya explorados con anterioridad en la arquitectura. También se revela un sorprendente conocimiento de la historia de la ciencias, donde se encuentra un instrumento desde donde apoyar su formulación, lo que conllevó un reposicionamiento de la relación entre ciencia y arquitectura.

Se observa una metodología de trabajo singular en cada uno de los autores, que adquiere diversas dimensiones y énfasis. En algunos casos, se revela que estos métodos eran diseñados e implementados como una metodología integral de diseño, administración, logística, y construcción en varios de sus proyectos, como es el caso del "Sistema Nervi", el método de Félix Candela, o las metodologías de búsqueda de formas de Otto e Isler. En este sentido, resulta evidente la estrecha relación entre arquitectura e ingeniería, en lo referente al uso de modelos físicos, la cual presenta enormes fluctuaciones en el conjunto de proyectos seleccionados. La fundamental relación de trabajos ingenieriles se manifiesta en los modelos de simulación de Nervi, Torroja, Ove Arup (con su presencia decisiva en el SHO de Utzon) y Dieste. Una preponderancia de la estructura a nivel mas conceptual se manifiesta en las maquetas generativas de Gaudí, Otto, y de Isler.

A pesar de su relación estrecha con la ciencia, es importante aclarar que muchos de estos modelos experimentales no resultan suficientes para asegurar la integridad estructural de las propuestas, y necesitaron los servicios de ingeniería que proporcionaron sofisticados métodos de calculo para su definición e implementación. Por lo tanto, los modelos físicos se limitaron a estudiar ciertos aspectos de los sistemas formales, que si bien resultaron instrumentales para su determinación, no constituyen de modo alguno el reemplazo del ingeniero por el arquitecto. Algunas excepciones notables que exploran ambas disciplinas en una misma figura de arquitecto e ingeniero a la vez, se expresa en el trabajo de Félix Candela (A), Pier Luigi Nervi

44 Eliasson, Olafur. *Los Modelos son Reales*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009.

(E), Isler (E), Torroja (E), Dieste (E). La fluctuante relación entre arquitectura e ingeniería será profundizada en el capítulo final de conclusiones.

En la serie de maquetas estudiadas se observa la impactante preponderancia que alcanzaron ciertos centros de investigación académicos, porque los arquitectos e ingenieros acudieron sistemáticamente a las universidades para encontrar conocimiento de avanzada desde donde comprobar sus hipótesis de trabajo y poder construir sus sofisticados modelos. Entre los prestigiosos centros de educación superior destacan: La Politécnica de Milán (Nervi), la Politécnica de Torino (Nervi), la Universidad de California (Nervi), la Politécnica de Madrid (Torroja y Candela), la Universidad de Delft (Le Corbusier y Xenakis), el Southampton University y el University College de Londres-UCL en el Reino Unido (Utzon), el Black Mountain College de Carolina del Norte en USA (Fuller), entre otros. Estos centros contaban con el conocimiento, los instrumentos técnicos y teóricos, y eran capaces de implementar metodologías necesarias para contribuir a la formulación de proyectos en búsqueda de la innovación. De esta manera, la academia no se posicionaba como un ente de conocimiento teórico ajeno a los avances de su tiempo, sino que un partícipe activo y fundamental que apoya el diseño y la investigación de una praxis innovadora.

La reflexión que culmina este capítulo teoriza que la contribución de estos proyectos reside en su radicalidad propositiva, al implementar inexploradas metodologías para derivar el proyecto arquitectónico a partir de modelos físicos, conceptuales, digitales. Mas que el aspecto meramente estético, son las sorprendentes potencialidades que ofrecen los maquetas como elementos activos, al proponer variados métodos de experimentación, evolución, y formulación relacionados con nuevos sistemas formales, constructivos, espaciales, y estructurales.

Este capítulo proporciona una respuesta categórica a la pregunta de Isler ¿Están muertos los modelos físicos?”. El modelo físico no está muerto ni lo estará, porque pertenece a una de las actividades propias de la arquitectura, como lo afirma tempranamente Alberti. Su uso se inicia antes de la computación, y seguramente se extenderá a través del tiempo. Pero su énfasis, parámetros, y objetivos han cambiado, y seguirán evolucionando y expandiéndose a través del tiempo. Los modelos han sido partícipes de la historia del Siglo 20, pero también reclaman una presencia preponderante en el presente con los modelos digitales y analógicos, y continuarán expandiéndose y ganando protagonismo en el futuro de la arquitectura con la incorporación de asombrosas técnicas de producción y prototipo rápido.

El próximo capítulo investiga ciertas estrategias de acción en el campo de la materialidad, fabricación y técnicas constructivas, que completa el análisis de proyectos.

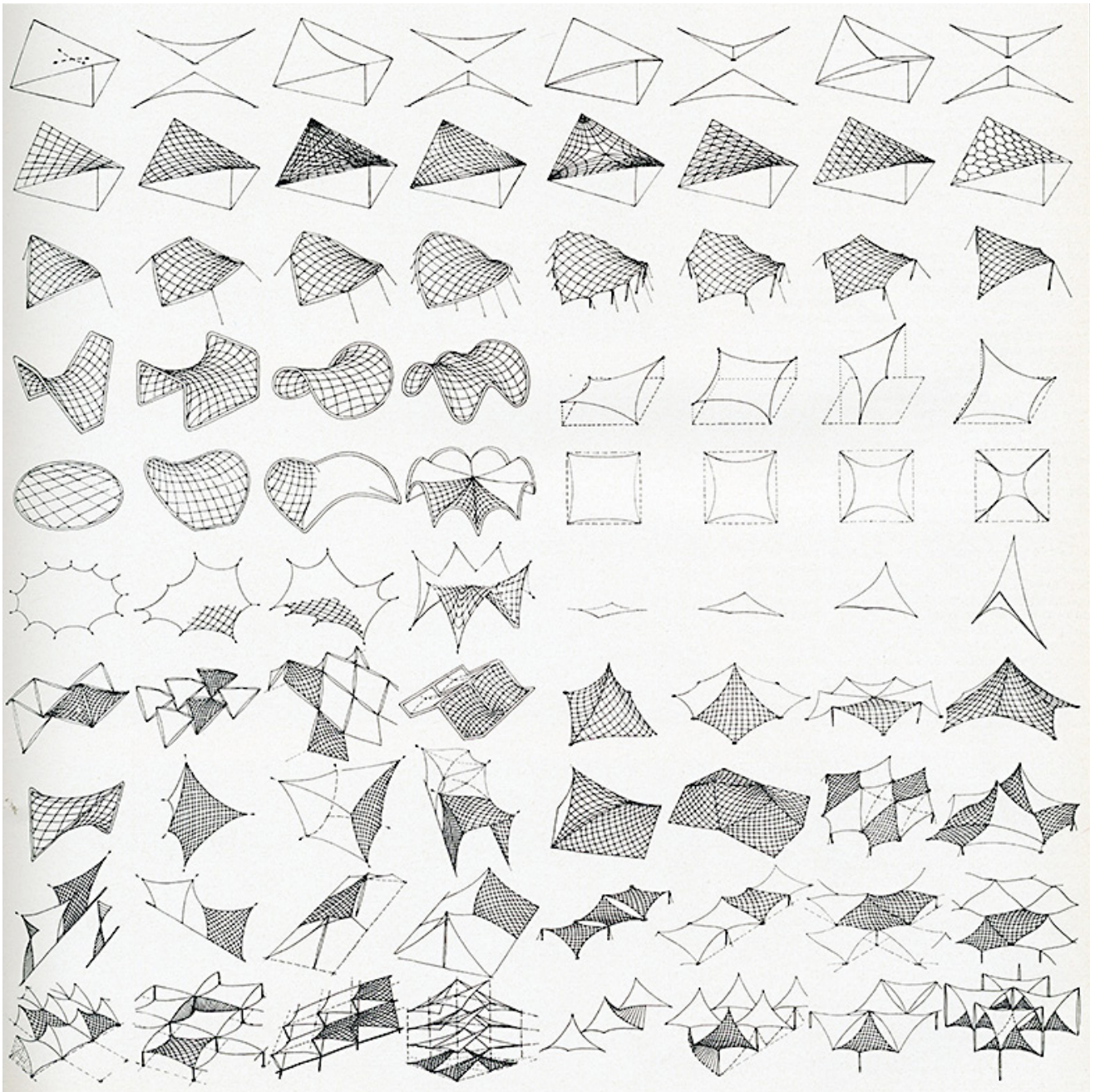


Fig. 3-2-63: Frei Otto.
Casabella 301. 1966: 35

PARAMETRIZACION CONSTRUCTIVA

*“He who works with his hands is a laborer;
he who works with his hands and his head is an artisan;
he who works with his hands and his head and his heart
is an artist.”¹*

La historia de la arquitectura ha estado estrechamente ligada a sus prácticas constructivas. Su relevancia resulta tan significativa, que algunos teóricos han argumentado que a menudo son los avances en el ámbito constructivo los que detonan la aparición de nuevas formas.

Durante el Siglo 20, una serie de acontecimientos comienzan a manifestarse relacionados con importantes procesos de innovación en las prácticas constructivas, los que impulsaron algunas manifestaciones arquitectónicas que resultan ejemplares, porque constituir prácticas inéditas e inexploradas en su tiempo. A pesar de su innegable relevancia, y de comenzar a emerger como un fenómeno recurrente, estos proyectos han sido escasamente estudiados, y por lo tanto permanecen documentados de manera fragmentada e incompleta en la historia de la arquitectura. La importancia de su estudio obedece a una creciente necesidad de extraer conocimiento en torno a conceptos, lecciones y ejemplos que ellos contienen, pero esta investigación ha confirmado que los estudios desde una perspectiva constructiva son escasos, reducidos, y muchas veces, inexistentes.

Quizás el aspecto más relevante en esta temática es la paradigmática disociación que provoca el frecuente desfase entre una tradición constructiva frente a los adelantos del conocimiento y la técnica, es un fenómeno que merece cuidadoso estudio y reflexión, debido a que despliega formidables logros, pero no estuvo exenta de considerables dificultades.

Este capítulo intenta revisar estos avances constructivos en el conjunto de proyectos seleccionados desde una perspectiva tanto teórica como práctica, lo que permitirá esclarecer la manera en que los aspectos constructivos

¹ De Witt Schuyler Morgan. *Living and Working Together*. New York : C. Scribner's Sons, 1931. P.68.

resultaron determinantes en la aplicación de ciertas lógicas paramétricas en el proyecto arquitectónico.

Las preguntas que surgen frente a este fenómeno son múltiples:

¿Existe una relación entre la conceptualización teórica de estos proyectos y los procesos constructivos?

¿Cuál es la relación entre los avances en el conocimiento de los materiales y las nuevas formas que aparecen en la arquitectura?

¿Cuál es el rol de estas lógicas en los nuevos sistemas de producción aplicados a escala arquitectónica?

¿Las nuevas formas arquitectónicas intentan utilizar sistemas constructivos tradicionales, o se requiere la implementación de nuevos métodos? ¿Cómo se traducen las nuevas formas arquitectónicas a la realidad constructiva?

¿Se facilita el proceso de manufactura de sus partes? ¿Hay formas que se adaptan mejor a ciertos sistemas de producción?

¿Pueden las nuevas formas detonar nuevos sistemas constructivos, en término de su producción, ensamblaje, y uso de materiales?

¿Cómo se implementan las nuevas prácticas de ensamblaje y construcción? ¿Existe relación entre la implementación de nuevos procesos constructivos? ¿Hay una secuencia lógica del método constructivo implementado en los proyectos?

¿Cuál es la relación entre definición geométrica de sus partes, la estructura, y los procesos constructivos?

¿Hay algunas formas que no requieren encofrados ni andamios?

¿Qué importancia adquieren los sistemas de fijación para la secuencia de construcción, como la soldadura (welding), bolting, in-situ?

Se revisan los siguientes aspectos teóricos:

Examinar la relación entre los proyectos seleccionados y sus prácticas constructivas;

Explorar los aspectos en torno a la materialidad y los adelantos científicos relacionados con el conocimiento en la técnica (nuevos o tradicionales) que fueron utilizados en los proyectos;

Estudiar ciertos adelantos tecnológicos aplicados a escala arquitectónica en los siguientes aspectos:

La materialidad, sus propiedades y potencialidades en la implementación de nuevas e inexploradas formas. En particular, se investiga la relación entre materialidad y forma. Se revisará el uso de materiales como el hormigón, acero, ladrillo, y madera;

La introducción de nuevos procesos de producción, fabricación, y manufactura de sus partes, que incluyen elementos 1) Estándar, 2) Prefabricadas desde la fábrica, 3) Construidas a medida en la obra;

Los procesos de ensamblaje y montaje intentan esclarecer los protocolos necesarios para su implementación;

El detalle constructivo adquiere fundamental importancia al plantearse como un sistema de interrelación entre sus partes;

Este capítulo intentara abordar los proyectos seleccionados para recopilar, registrar, clasificar, evaluar, y analizar críticamente los parámetros antes descritos en sus aspectos constructivos. Se intenta estudiar tres elementos fundamentales: materialidad, sistemas de producción o fabricación, el montaje y ensamblaje. Se procede a analizar, documentar y catalogar algunos de los proyectos seleccionados de acuerdo a los siguientes parámetros: teóricos, adelantos científicos, materialidad, procesos de producción, procesos de ensamblaje, y detalle constructivo.

Se intenta establecer una serie de ejemplos y referentes, tanto teóricos como prácticos, para su futuro uso como precedentes en algunas prácticas actuales. También se pretende describir los procesos tecnológicos, los métodos y los procesos generados en su implementación. Finalmente se concluye con una mirada general del fenómeno constructivo para extraer conclusiones y relaciones entre proyectos.

3.3.1

LA REVOLUCIÓN TEÓRICA DE LO CONSTRUCTIVO

La relevancia teórica de los procesos constructivos en la arquitectura se remonta a su raíz etimológica, donde la palabra 'arquitectura' se ha establecido proveniente del griego αρχ (arch, cuyo significado es 'jefe', 'quien tiene el mando'), y τεκτων (tekton es decir 'constructor').

En el primer tratado de arquitectura, Vitruvio identifica tres aspectos relevantes en la arquitectura: las 'obras del tiempo', la 'construcción de máquinas', y el 'arte de construir'.² La relevancia de los aspectos constructivos volverá a aparecer durante el Siglo XX, impulsados por una serie de acontecimientos relacionados con avances en varios ámbitos: la ciencia de los materiales, la tecnología, el conocimiento científico, y los sistemas de producción, entre otros factores. Es aquí cuando surgen importantes intentos de implementar avances en el conocimiento y la técnica a escala arquitectónica, impulsando la aparición de varios proyectos notables en sus aspectos constructivos. Sigfried Giedion es quizás el primero que aborda la historia de la arquitectura del Siglo XIX y XX a partir de las profundas transformaciones detonadas por los avances en los materiales y la tecnología, definiendo a la construcción como el "subconsciente de la arquitectura"³.

² Vitruvius, Pollion. *The Ten Books on Architecture*, Cambridge : Harvard University Press, 2006. P. 16.

³ Giedion, Siegfried. *Espacio, Tiempo y Arquitectura : el Futuro de una Nueva Tradición*. Vol. 5a. Madrid: Dossat, 1978.

Su libro *Bauen in Frankreich*⁴ resume el trabajo en acero y del hormigón armado que aparece a finales del SXIX. Fue aquí donde surge la arquitectura del futuro, afirma Giedion, refiriéndose a un tiempo que contenía todos los impulsos que más tarde encontrarían una forma teórica explícita.

Algunos proyectos seleccionados en este estudio han sido ya abordados por ciertos autores, quienes elaboran posturas tanto teóricas como prácticas, que resultaron de fundamental trascendencia enfocadas a sus aspectos constructivos. Entre estos autores destacan: Sigfried Giedion, quien define la construcción como el “subconsciente de la arquitectura”; Reyner Banham quien expresa que los cambios propuestos por algunos de estos proyectos habrían iniciado una verdadera “revolución” en la arquitectura y denomina este periodo como “The Age of Masters” (Banham, 1962); y Kenneth Frampton, quien sitúa estos proyectos dentro del ‘arte de construir’ asociados a principios de ‘tectonicidad’. Estas tres posturas contienen conceptos de gran relevancia para el entendimiento de estos proyectos dentro del conocimiento arquitectónico, y merecen una cuidadosa revisión, porque son posturas que aparecen frecuentemente fragmentadas, incompletas, y muchas veces, desconocidas.

Giedion se refiere a las transformaciones detonadas por los avances en la tecnología y en la ciencia y de su capacidad de engendrar la arquitectura del futuro, un concepto de grandes ramificaciones para la arquitectura que será estudiado en detalle en proyectos específicos y como fenómeno interrelacionado durante este periodo. Para Giedion, son los avances en la construcción y en la ingeniería los que a menudo lideraron la evolución a otros paradigmas, cuando afirma: “De ahí el interés que tienen para los historiadores esos avances aparentemente triviales, esa tímida introducción de nuevos materiales y nuevos métodos. Algunas tendencias todavía vivas y activas en nuestros días, los hechos constitutivos de la arquitectura contemporánea, se remontan precisamente a esos comienzos de tan pocas pretensiones”.⁵

Rayner Banham continúa los postulados de Giedion, al escribir el libro “Age of the Masters, a Personal View of Modern Architecture” en 1962, cuando expone con gran coherencia el trabajo pionero de importantes arquitectos del Siglo 20. Banham se refiere a un grupo que aparece después de la guerra, que recibió una creciente admiración por su trabajo sobre el abovedamiento ya iniciada por Pier Luigi Nervi, identificando representantes y proyectos destacados como Torroja, Catalano, Buckminster Fuller, Daffaille, Frei Otto, entre otros. Banham argumenta que este grupo pudo acumular un “rango de experiencias”, un “cuerpo de conocimiento” porque utilizaron “métodos radicales” relacionado con el uso inédito de materiales como el tensionamiento del hormigón, y debido al uso de técnicas geométricas radicales, a partir de lo cual comienza una verdadera revolución

4 Giedion, Siegfried. *Building in France, building in iron, building in ferroconcrete*. Santa Monica, [CA] : The Getty Center Publication Programs, cop. 1995.

5 Giedion, Siegfried. *Espacio, Tiempo y Arquitectura :el Futuro de Una Nueva Tradición*. Vol. 5a. Madrid etc.: Dossat, 1978. Pág. 203-204.

⁶. Banham afirma su convicción que la historia de la arquitectura sucede como consecuencia de la interacción de las innovaciones tecnológicas y de las creatividades de diseño, y en respuesta a las circunstancias socio-económicas ⁷.

Banham concluye que fueron los cambios en el modo de pensar, y no en la materialidad lo que originó la radical concepción del espacio del arquitecto moderno. Banham reconoce el trabajo de algunos autores dentro de un discurso distinto al predominante en su época, donde se detectan “métodos radicales” (Banham, 1975)⁸, y una “similitud en método o intención” (Giedion, 1962 definido por Banham).⁹

Pero estos fenómenos resultarían difícil de ser enunciados como una manifestación interrelacionada, porque cuando Banham habla de un cambio en el ‘modo de pensar’, no describe en qué consistía este cambio, y cuando argumenta que la incorporación de nuevos materiales en la arquitectura supuso una verdadera “revolución” ¹⁰de la práctica arquitectónica que ha estado en alboroto desde entonces ¹¹, pero tampoco define este proceso.

Más tarde, será Kenneth Frampton quien nuevamente defina la arquitectura como el “arte de construir” ¹², abordando el concepto de tectónica, el que define etimológicamente a partir del griego tekton, lo que significa carpintero o constructor. ¹³ Frampton introduce una definición de ‘tectónico’ basado en los postulados de Adolf Heinrich Borbein, quien en 1982 en su estudio filológico afirma que “Tectonic becomes the art of joinings”, donde la tectónica se define como el arte de unir cosas, entendido como tekne en todo su conjunto, sugiriendo por lo tanto una cierta idea de ensamblaje o articulación de partes y elementos, expandiendo su influencia desde lo utilitario y tecnológico a lo estético. ¹⁴ ¿Como se manifiesta en los proyectos seleccionados el tekton que plantea Frampton, entendido como el arte de construir, especialmente bajo los conceptos de “ensamblaje o articulación de partes y elementos”?

Las tres posturas antes expuestas permiten extraer algunos valiosos conceptos a considerar en el análisis de los proyectos seleccionados en sus aspectos constructivos. Si bien estas posturas aparecen con cierto vigor y vehemencia, debemos examinar cuidadosamente sus contenidos desde una perspectiva altamente crítica, y por tanto este estudio propone algunos puntos para discusión, los que se confrontarán a los proyectos seleccionados.

6 Banham, Reyner. *Age of the Masters : a Personal View of Modern Architecture*. London: The Architectural Press, 1975. P 48.

7 Wiryomartono, Bagoes. Reyner Banham and Modern Design Culture. *Frontiers of Architectural Research* 1, 2012, no. 3 [September 2012]. pp. 272–79.

8 Banham, loc. cit.

9 Ibid. P. 43.

10 Ibid. P. 47.

11 Ibid.

12 Frampton, Kenneth. Estudios sobre cultura tectónica : Poéticas de la Construcción en la Arquitectura de los Siglos XIX y XX. Madrid : Akal Ediciones, 1999. P 158.

13 Ibid; P. 3.

14 Ibid.

Una última reflexión teórica postula que estos proyectos aparecen paradigmáticos, y por tanto, su inserción dentro del conocimiento arquitectónico resulta una tarea delicada. Se propone trabajar con la tesis propuesta por Vitruvio referente a teoría y práctica expuesta en el Capítulo 1 de esta tesis, desentrañando el conocimiento a partir de la praxis, el cual puede develar principios, lecciones, metodologías y fundamentos a considerar en las prácticas arquitectónicas actuales, y podrían adquirir inusitada importancia como discursos aún latentes en el tiempo. Este ejercicio posibilitaría extraer importantes lecciones, dado que estos procesos, si bien presentan rotundos aciertos, no estuvieron ajenos de errores, fracasos e incongruencias.

3.3.2

AVANCES EN LA PRAXIS CONSTRUCTIVA

Para explorar procesos e intenciones de la praxis constructiva, se teoriza que los avances constructivos durante el Siglo XX se ven favorecidos por los siguientes factores: materiales, formas de producción, ensamblaje, y el detalle arquitectónico. Los nuevos materiales se ven favorecidos por los avances en el conocimiento científico relacionados con la ciencia de materiales, que permiten la aplicación de nuevas capacidades descubiertas en los materiales, y por tanto facilitan que nuevas formas arquitectónicas comiencen a emerger.

Los nuevos sistemas de producción disponibles en la industria mecanizada y en serie son rápidamente aplicados a escala arquitectónica y se manifiestan en tres modalidades: el uso de elementos estándar; la prefabricación de elementos y partes en industrias; o la creación de métodos propios de fabricación de sus partes.

El paso de la construcción artesanal a la industrializada conlleva la aplicación de procesos y métodos de ensamblaje heredados de la producción industrial, que se comienzan a implementar a escala arquitectónica. Este proceso marca el paso de una arquitectura que se construye a una que se ensambla. Los métodos de ensamblaje estuvieron fuertemente condicionados por una mano de obra de baja calificación, la economía de recursos, y una rapidez de ensamblaje, ejecución y erección;

El uso de lógicas de descomposición de sistemas en partes de procesos y elementos constructivos resultara decisivo en la implementación de los proyectos, donde el detalle constructivo tendrá un rol protagónico al con-

stituirse como el elemento crítico de relación entre la parte y el todo.

Estos aspectos serán revisados en detalle a continuación.

3.3.3

LA TRADICIÓN DE SER PIONERO

La arquitectura ha desplegado una evidente preocupación por el estudio del origen de la forma, en especial por su relación con la materia que la hace tangible, la que se ha manifestado en los periodos más relevantes de la historia de la arquitectura como una fuerza en continua evolución en la historia de la arquitectura, ayudando a la formulación de nuevos conceptos formales, espaciales, estructurales y constructivos, los que han estado íntimamente ligado a ciertos procesos de innovación. Por lo tanto, esta relación debe de ser estudiada en detalle, en especial el concepto de las formas emergentes de las potencialidades del material, porque esta relación no ha estado exenta de contradicciones.

Un ejemplo notable lo constituye la construcción griega, que alcanza una sofisticada e inigualable culminación estética, pero donde se hace evidente la contradicción entre forma y material. Choisy dibuja el detalle constructivo del orden dórico derivando a partir de la construcción en madera, lo que Pugin ha problematizado así: "La arquitectura griega es esencialmente de madera en su construcción, se originó en edificios de madera y sus maestros nunca tuvieron la suficiente imaginación o habilidad como para concebir cualquier cosa que se apartara del tipo original... Pero ¿acaso no resulta extraño que los griegos comenzaran a construir en piedra sin que las propiedades de este material les sugirieran modos de construcción mejores y distintos?"¹⁵ El desafío que Pugin plantea consiste en desplegar cierta "imaginación" y "habilidad" para concebir soluciones basadas en las propiedades de los materiales, las que podrían sugerir otros modos de construcción, lo que se relaciona incuestionablemente con el conocimiento científico, y a su vez, con la imaginación y habilidad artística. Dentro de este contexto, la experimentación que requiere el uso de nuevos materiales podría posibilitar y potenciar la experimentación llevando al límite las capacidades del material, y por tanto permitir la exploración de formas y geometrías no-estándar.

Será Choisy quien también nos recuerde la importancia de otro aspecto fundamental: la tecnología, cuando afirma que la forma arquitectónica es una lógica consecuencia de los mecanismos y las relaciones de la sociedad en general, enunciando cuatro rangos que se evidencian en la construcción de un edificio: "Technique, méthode, procédé and outillage » (técnica,

15 Frampton, op.cit. P. 47.

método, proceso y herramienta). Estos aspectos son para Choisy, al mismo tiempo, testimonio de la sociedad, su época, y su cultura. "Technique, méthode, procédé and outillage, are aspects of society as a whole, the complete range of mechanisms and relationships that are put in motion in the erection of a building."¹⁶ Choisy enfatiza la importancia de la sociedad de su tiempo en la aparición de nuevos materiales, o bien el uso inusual de materiales tradicionales, donde los avances en el conocimiento científico (incluyendo temáticas como la resistencia de materiales, la física, química, y matemáticas), también de las herramientas disponibles de la tecnología, así como a los procesos tecnológicos de la industrialización. La triada se completa así en tres ámbitos: arte, ciencia y tecnología.

Este mismo desafío se ha presentado en varias instancias en la historia de la arquitectura, cuando nuevos materiales han sido utilizados sin considerar sus verdaderas potencialidades.

Durante el Siglo XX, un grupo de proyectos aparece con una innegable voluntad de incorporar materiales de la manera planteada por Pugin, en un proceso que no ha estado exento de problemas e incongruencias. La aparición de nuevos materiales como el acero, el cristal, el hormigón armado, y la albañilería armada, o sus nuevos usos, se relacionaron con los avances en el conocimiento científico dentro de la arquitectura o en otras disciplinas, o generados por los propios autores. Estos avances permitieron una cierta experimentación con nuevas formas arquitectónicas, las manifestadas en un conjunto de proyectos durante el Siglo XX.

3.3.3.1



NUEVOS MATERIALES, ¿NUEVAS FORMAS?

La honestidad de los materiales fue abordada por Eugène Viollet-le-Duc, cuando declara que "Materials previously unavailable in a certain format should not be altered to imitate the appearance of others employed in traditional methods of construction; rather, the mode of construction should be altered to accommodate the format of the new material."¹⁷

A continuación se examinan los avances asociados a los materiales identificados en los proyectos bajo estudio: el acero, el hormigón, el ladrillo, y la madera.

Con la producción en masa del acero y el vidrio que comienza durante el

¹⁶ Banham, Reyner. *Teoría y Diseño Arquitectónico en la Era de la Máquina*. Buenos Aires: Nueva Visión, 1977. P. 26.

¹⁷ Viollet-le-Duc, Eugène-Emmanuel. *The Architectural Theory of Viollet-le-Duc: Readings and Commentary*. Cambridge, [MA] : The MIT Press, 1990. Pp. 175-177.

SXIX, se introducen nociones de ligereza, flexibilidad por su capacidad de actuar tanto en tensión como compresión, y por su capacidad de generar envolventes con el mínimo de material. Las estructuras en acero utilizaron nuevos sistemas de producción junto a innovadores métodos constructivos, llevando al límite el conocimiento al proponer nuevas formas gran experimentación con nuevas geometrías como la expresión de las potencialidades del nuevo material. Giedion aborda el hierro como sucesos importantes en la arquitectura del siglo XX: “En el momento en que se industrializó su producción, el hierro adquirió mayor importancia. (...) la historia del hierro como material de uso generalizado es parte de la historia de la química, la física y la investigación de la resistencia comparativa de los materiales. Al hacer posible la producción industrial del hierro, tales estudios lo transformaron en lo que resultó ser un nuevo material natural. Y su disponibilidad fomentó a su vez el desarrollo de las ciencias responsables de todo ello.” Según Banham, al uso del hierro facilita la aparición de un cuerpo de formas que emergen con naturalidad del material empleado.¹⁸

El metal permite su aplicación en proyectos de gran envergadura a partir de mediados del Siglo XIX, que impulsan la aparición de nuevos programas, como los pabellones de exposiciones, invernaderos, y estaciones de trenes. Ejemplos notables es el celebre Palacio de Cristal de Joseph Paxton (1851), cuando este jardinero de profesión encuentra inspiración en los invernaderos característicos del SXIX para dar respuesta al desafío de construir el edificio mas grande del mundo en solo un año, utilizando la tecnología de estructuras metálicas y el vidrio, compuesta donde “propuso una alternativa revolucionaria, transparente y ligera, fácil de montar y económica.”¹⁹ (Foster, 2015).

Otro ejemplo notable es la Torre Eiffel (1887), construida en 2 años, utilizando una tecnología de ensamblaje de mas de 18,000 piezas metálicas producidas en la industria, con una clara estrategia de ensamblaje fuera y dentro de la obra. El conocimiento científico se hace evidente al requerir de las aportaciones de un grupo de 72 científicos que colaboran con el proyecto, compuesta por una larga lista de químicos, físicos, geómetras, matemáticos, industriales, etc.

Pero el metal no es el único protagonista de las exposiciones universales. La aportación de Rafael Guastavino a la exposición de Filadelfia de 1876 es extensamente conocida, cuando trabaja las laminas de ladrillo en bóvedas tabicadas (Sarrablo, 2002). El trabajo de Guastavino, junto al conocimiento de las bóvedas catalanas, aunque sin una directa conexión, se continuara desarrollando durante el Siglo XX en lo que Eladio Dieste denomina “ceramica armada”. Este sistema, basado extensamente en el conocimiento que se había adquirido con las estructuras laminares en hormigón armado, consistente en laminas de ladrillo trabajando a compresión, combinado con un sistema de mallas con armaduras a la tracción, aplicados en superficies de doble curvatura de gran esbeltez, que será demostrado en algunos

18 Banham, op. cit. P. 29.

19 Foster, Norman. Chrystal Palace : el edificio favorito del arquitecto Norman Foster, *El País Semanal*. 2015 [viewed: August 8, 2015]. Available from: http://elpais.com/elpais/2015/08/05/eps/1438784243_593178.html

proyectos en este estudio.

En cuanto al hormigón armado, si bien su aparición se remonta a 1854 cuando William Wilkinson solicita la patente de un sistema que incluía armaduras de hierro, a principios del SXX se comienzan a descubrir inusitadas potencialidades. Se recupera como material de construcción con renovada fuerza, al añadir armaduras o técnicas de prefabricación, expandiéndose su uso como hormigón armado o preformado (ferrocemento), el que adquiere un desarrollo notable entre 1940-1960. Se descubre la singularidad del material que permite trabajar a compresión y tracción, ofreciendo oportunidades inéditas para la arquitectura, la ingeniería y la construcción. Aparecen las laminas autoportantes de hormigón de escaso espesor, capaces de resistir como vigas de gran canto en la dirección de las generatrices, que cubren la dimensión mayor de la planta sin necesidad de nervios de refuerzo, ni de apoyos continuos ni de elementos estructurales en su arranque como los de las bóvedas clásicas (Serrablo, 2004).²⁰ Además, el hormigón permite una asombrosa fluidez al ser vaciado en estado líquido en moldes y tener la capacidad de adoptar una infinidad de formas. El hormigón armado permite nuevas formas al incorporar pre-tensado y post-tensado, lo que optimiza sus capacidades, y permite láminas de extraordinaria ligereza, provocando nuevas ideas de forma y escala de los edificios.²¹

La revolución que plantea la innovación, con respecto a los nuevos materiales, será sin duda uno de los factores que impulsan la revolución de las formas durante el Siglo XX.

Para iniciar la discusión, es necesario revisar conceptos fundamentales relacionados con el desarrollo y el conocimiento científico de cada material. Este capítulo intenta definir para los proyectos seleccionados:

- Tipo de material: Hormigón (definiendo su tipo), Metal, Madera, Ladrillo;
- La relación entre avances del conocimiento científico y los materiales;

Junto a los aspectos de materialidad, se estudian los nuevos sistemas de producción, ensamblaje, y el detalle arquitectónico.

20 Serrablo, Vicente. La Construcción de Geometrías Complejas. *Tectónica*, no. 17, 2004. p.22.

21 Farrelly, Lorraine. *Construction + Materiality*. AVA Publishing SA, Lausanne, Switzerland, 2009. P. 43-46.

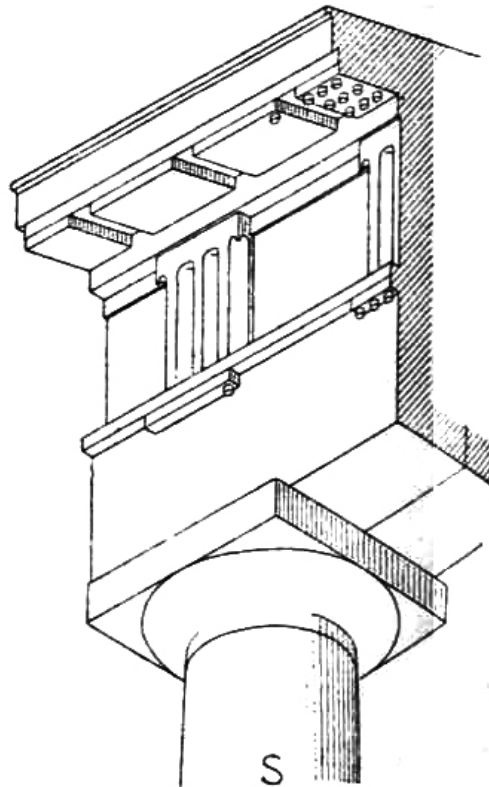
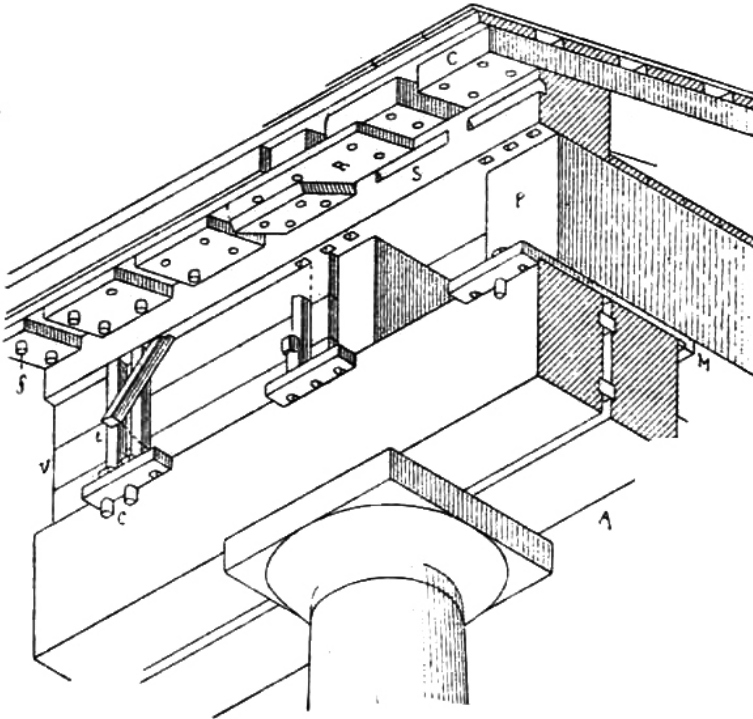


Fig. 3-3-1: Auguste Choisy, derivación del orden dórico a partir de la construcción en madera, de *Histoire de l'architecture*, 1899.

NUEVOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Los avances en la tecnología relacionados con los sistemas de producción en serie se volvieron metodologías generalizadas a partir de finales del SXIX, fuertemente regidos por los principios Fordistas de producción en líneas de ensamblaje, caracterizadas por elementos estándar, homogéneos, repetitivos y en serie.

Sin lugar a dudas, la implicancia de la producción mecanizada fue decisiva para formular los principios que marcaron la arquitectura de toda una generación. La CIAM promulga "La Sarraz Declaration" en 1928, cuando proclama los principios de los métodos industriales de producción de las maquinas, los que serán fuertemente determinantes en la producción arquitectónica a lo largo de todo el siglo pasado. Los enunciados de la declaración establecen que los métodos mas eficientes de producción surgen de la racionalización y estandarización, cuyos objetivos son variados, como estimular conceptos de simplificación en los métodos de trabajo y la industria; reducir la mano de obra calificada evitando técnicos de alta calificación; y obligar a los usuarios a revisar sus requerimientos mas acorde con las nuevas condiciones sociales. Esta declaración establece que los métodos industriales de producción reemplazaría al de los artesanos, y por tanto la arquitectura deberá ajustarse a estos nuevos conceptos abandonando nociones relacionadas con la producción artesanal, y debería fundarse en la tecnología industrial.²² Para algunos, la llegada de la industrialización implicó que los detalles dejaron de ser cosa de artesanos y se convirtieron en dibujos de producción realizados por arquitectos e ingenieros.²³

La llegada de la industrialización a la arquitectura ya había sido vislumbrada por Viollet le Duc en 1938²⁴, quien esperaba la llegada de la prefabricación a gran escala de unidades y componentes de construcción. Si antes los materiales se trabajaban, ajustaban, o terminaban in-situ, a futuro se trabajara con componentes preformados o con unidades de montaje, afirmaba le Duc. La incorporación de métodos industriales en la concepción arquitectónica como una inescapable consecuencia de los sistemas de producción industrial en serie a través de tecnologías de las maquinas, tendría fuertes implicancias en la practica arquitectónica durante el Siglo XX.

22 Conrads, Ulrich (ed.); Bullock, Michael (tran.). *Programs and Manifestoes on 20th.-Century Architecture*. Cambridge, MA: The MIT Press. 1971.

23 Weston, Richard. *Materiales, Forma y arquitectura*. Barcelona: BLUME, 2003, p. 148.

24 Viollet-le-Duc, op.cit., P 149.

Le Duc también aborda el tema de la creación de nuevos materiales o de nuevos sistemas constructivos cuando declara: "... architects, perceiving the advantageous structural formulations for which no manufactured material yet exists, should not hesitate to propose the production of a new format for the material. Without such initiative progress is not likely to occur".²⁵

Uno de los primeros teóricos en abordar el legado de la mecanización en la esfera arquitectónica fue Siegfried Giedion, En su libro "La Mecanización toma el mando" (1948), Giedion identifica al periodo entre las dos guerras mundiales como el tiempo de completa mecanización, aunque aclara que antes del 1918 la mecanización ya comenzaba a aparecer en variadas intensidades²⁶ describiendo "la mecanización en la producción significa la disección del trabajo en componentes y operaciones."²⁷ Esta disección en componentes y operaciones fue de vital importancia, ya que la lógica de las maquinas logra establecer una serie de protocolos y principios de mecanización en la construcción de proyectos.

Ante la inserción del mundo de la industrialización y la mecanización en la esfera de la arquitectura, Reyner Banham publica unos años mas tarde en 1960 el importante libro "Teoría y diseño en la primera era de la máquina"²⁸, donde describe aspectos de la mecanización en los procesos constructivos.

El impacto de los adelantos tecnológicos trae como consecuencia un profundo cambio cuando se comienza a experimentar con las capacidades y posibilidades que ofrecen estos nuevos materiales, basados en los adelantos en el conocimiento de la ciencia de materiales, apareciendo intentos notables de experimentación e innovación aparecen dispersos en contextos y lugares disímiles.

Si bien la relación entre arquitectura y los procesos de industrialización y producción en masa que caracterizaron al SXX han sido enunciados repetidamente (Shantel Blakely, 2011), la relevancia de estos procesos no ha sido aplicados a proyectos de arquitectura, y han sido escasamente estudiados en proyectos específicos. Investigaciones preliminares a esta tesis han establecido que la incorporación de procesos constructivos industrializados no se limitaron el uso de elementos repetitivos, y homogéneos (como promulgaba la CIAM), sino que también incluyeron relevantes intentos de utilizar los procesos de producción mecanizados en variadas modalidades. Este capítulo intenta explorar algunos de los proyectos identificando estas tres instancias:

- El uso de partes estándar producidas por medios industriales;
- La prefabricación de elementos personalizados;
- La fabricación de elementos en obra mediante la creación de sistemas de fabricación propios.

25 Ibid.,p. 178.

26 Giedion, Siegfried. *La Mecanización Toma El Mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 1978. P 44.

27 Op. cit., P 31.

28 Banham, loc.cit.

MÉTODOS DE ENSAMBLAJE

Si tradicionalmente los edificios se construían, a futuro se ensamblarían, afirmaba Viollet le Duc, vislumbrando unos de los acontecimientos más importantes durante el Siglo XX: la incorporación de la industrialización en la construcción de la arquitectura.²⁹

La incorporación de procesos industriales dentro del proceso constructivo tuvo ramificaciones en los métodos utilizados en su implementación. Los nuevos métodos de producción invaden las prácticas de ensamblaje en la construcción, fuertemente determinados por el uso de mano de obra sin mayor calificación, la economía de recursos y de material, la rapidez de montaje, y la estricta secuencia de ensamblaje.

La formulación de una estrategia constructiva heredada de los sistemas de producción en línea transformaría profundamente la práctica arquitectónica, con tres elementos críticos: una mano de obra de menor calificación, una economía de recursos (materiales, coste); y la rapidez de ensamblaje.

La mano de obra de menor calificación representa el traspaso desde una práctica constructiva artesanal a una industrializada o mecanizada, la cual busca una reducción del tiempo en la obra, posibilita que obreros de baja calificación puedan afectar tareas de mayor simplicidad, y reduce el margen de error durante la construcción.

En cuanto a la economía de recursos tanto económicos como de material aparece como una consideración fundamental para algunos autores: se pretende utilizar la menor cantidad de material, tanto en los elementos mayores de la obra como en encofrados.

La rapidez del ensamblaje intenta minimizar el trabajo en situ, implementando un fácil montaje de sus partes, mediante soldaduras, "Bolting", o "pour in place" o el vertido de hormigón en el sitio.

Se estudiaran estas estrategias, que acarrear profundas consecuencias no solo en la secuencia constructiva, la que debe implementar siguiendo un estricto protocolo, sino que en la definición y el diseño del detalle, el que debe de estar basado en el principio de cada parte dependiente del todo.

DE LA PARTE AL TODO.

Estos profundos cambios implican el reposicionamiento de los sistemas de producción de sus partes, el del ensamblaje in situ, que requieren de la resolución del detalle como un elemento crítico dentro del proyecto arquitectónico. Sin embargo, el detalle ha demostrado una fluctuante e inestable relación a través de la historia como expresión más íntima de la materialidad arquitectónica.

La lógica de las máquinas pasará a tomar un rol preponderante como un sistema de organización precisa compuesta por elementos separados pero interrelacionados en una cadena de interdependencias. Entendida como un "organismo independiente con una organización precisa y bien definida, la máquina reclama del constructor una expresión de concepto extraordinariamente precisa (...) un organismo interdependiente que manifiesta su función a la que todos los aspectos están subordinados." (Ginzburg, 1982?)³⁰.

El detalle se comienza a manifestar con una estrecha correspondencia entre sus partes. La generación de las formas deducida a partir del encadenamiento de elementos, donde cada parte es dependiente del todo, y cuando se diseñan no solo los elementos, sino que también los procesos necesarios para su construcción, se convertirán en uno de los aspectos más significativos del proceso de diseño arquitectónico. Se analizarán los detalles de uniones y nodos, en cuanto a su capacidad de adaptación a condiciones específicas, y a su secuencia de construcción.

Esta investigación procederá a estudiar los efectos del detalle arquitectónico en la formulación de cada proyecto. Se estudiará el detalle a partir de sus elementos base: Miembro; Nudo, enlaces; Apoyos, anclajes, fijaciones. Este capítulo procede a analizar, documentar y catalogar algunos de los proyectos seleccionados de acuerdo a los parámetros antes descritos: materialidad, detalle arquitectónico, producción, y ensamblaje.

30 Ginzburg, Moisei; Senkevitch, Anatole (transl.). *Style and Epoch*. Cambridge Mass. ; London : The Mit Press, 1982. Pp. 86.

MATERIALES Y METODOLOGIA

Este capítulo investiga los procesos de construcción basados en sus características relacionadas con Materialidad, Sistemas de Producción, Secuencia de Ensamblaje, y el Detalle Constructivo.

Esta parte de la tesis, intenta identificar, documentar, analizar, clasificar, y relacionar estos aspectos constructivos con los proyectos.

Dada la relación de encadenación entre factores, se elije estudiar las obras a partir de su material constructivo base, para luego desglosar el resto de elementos. Esta agrupación permite construir un discurso comparativo entre proyectos y autores, estructurada en los siguientes pasos:

Materialidad: Definir los avances científicos relativos a los siguientes materiales:

- Hormigón: Armado, Preformado, Pre-tensado;
- Acero; Componentes estándar (elementos), Mallas;
- Ladrillo;
- Madera;

Dado que cada material desarrolla procesos muy distintos, el análisis se realizara a partir de cada material evaluando los siguientes aspectos.

Sistemas de producción que incluye estándar, prefabricadas, y in situ.

Métodos de Ensamblaje: economía, rapidez y eficiencia, incluye in situ; off - site, y mixto;

Detalle constructivo:

- Parte o miembro;
- Nodo o conector;
- Apoyos y anclajes, o Fijaciones

En una conceptualización mas precisa y a modo de síntesis, se propone trabajar con modelos de análisis en cada una de estas practicas. Varios sistemas han sido identificados para clasificar proyectos similares, algunos enfocados en sus aspectos estructurales, o constructivos.

Se han identificado un modelo estratégicos de construcción según la base estructural de estas formas, elaborado por Serrablo (2004)³¹, quien define dos (pero identifica tres):

1. Bóvedas nervadas o modelo de huesos estructurales y piel. Se definen

31 Serrablo, op.cit., P 18.

como las estructuras cuya envolvente se define por barras o nervaduras, con diversos sistemas de apoyo, aunque suelen presentarse apoyadas en pórticos. Se propone trabajar con el termino "sistemas" nervados en vez de "bóvedas", para incluir un mayor rango de proyectos, y no solo los abovedados.³²

2. Fuselajes geodésicos, que se definen como una estructura resistente compuesta de mallas y nervios. Se caracterizan por una trama cruzada de elementos auto-estabilizadores (barras de pequeña longitud), en la que cualquier carga en cualquier dirección es equilibrada por las intersecciones de los bastidores. Una curva geodésica se define como la línea mas corta que se puede trazar entre dos puntos situados sobre una superficie curva.

2. Pielas estructurales, incluyendo las laminas autoportantes de Hormigon Armado y Albanileria Armada. Se definen como un envolvente monocasco o continuo, donde la envoltura actúa como estructura. Estas pieles portantes de superficie continua proporcionan estabilidad mecanica por forma mas que por resistencia de material. Se presentan en 3 versiones de curvaturas: membranas a traccion (monoclastica), a compresion (sinclastica); y laminas en flexo-compresion (anticlastica). Dentro de estas modalidades aparecen:

1. Laminas de hormigón armado;
2. Sistemas prefabricados;
3. Sistemas semi-prefabricados colaborantes;

Se utiliza esta clasificacion de Serrablo como un esquema operativo con las modificaciones antes expuestas, por su capacidad de sintetizar a la vez aspectos constructivos y estructurales. En cada sistema se estudia su Materialidad; Partes y elementos del sistema (miembro, conector, y fijaciones); y Secuencia de ensamblaje.

A continuacion se evaluan estos tres modelos en el conjunto de proyectos seleccionados.

3.3.5

RESULTADOS

El conocimiento constructivo compilado dentro de los proyectos seleccionados, devela las siguientes resultados.

Materialidad:

En cuanto a la materialidad, en los proyectos seleccionados aparecen los

32 Serrablo, Vicente. (Personal Communication, 29 July 2015).

siguientes materiales: Hormigón (71%), ya sea armado, preformado, o pretensado; Metal (22%); Ladrillo (4,5%); Madera (2,5%). Se observa una acentuada predominancia de los sistemas en hormigón, y el metal también se manifiesta como un material de cierta relevancia.

En cuanto a la distribución temporal del uso de materiales en los proyectos, se aprecia que el metal aparece a principios del SXX como el material constructivo dominante; el hormigón se expande a mediados de siglo en varias formas (preformado, encofrado y pre y post tensado); y el ladrillo y madera de modo mas esporádico.

Se presentan las siguientes manifestaciones importantes en el conocimiento:

- Teoría de estructuras de membranas (Theory of shell structures);
- 1960: Candela publica "General Formulas for Membrane Stresses in Hyperbolic Paraboloidal Sheels";
- 1958: El calculo de cascarones de doble curvatura, mediante ecuaciones en Diferencias Finitas". Traducción desde el alemán por Félix Candela;
- Finales de 1800: Guastavino desarrolla las bóvedas tabicadas;
- El desarrollo de la construcción en acero no pasa desapercibido por Vladimir Shukhov, quien viaja desde Rusia a USA para recolectar información de los adelantos técnicos, cuando visita la exposición universal de Filadelfia de 1876, las plantas de construcción de maquinaria en Pittsburg, y también estudia el sistemas del transporte ferroviario.³³ Este conocimiento se rescata cuando Shukhov desarrolla numerosas e innovadoras estructuras en metal, y para ello utiliza partes prefabricadas en la mayoría de sus proyectos, producidas por industrias locales. La torre de Shukhov se convertiría en un símbolo de esfuerzo colectivo, y habría requerido un total de 2200 toneladas de acero, y Lenin "personalmente tuvo que ordenar 240 toneladas de acero de alta calidad 'German Ruhr' desde las bases militares."³⁴

1. Sistemas de producción:

Se observan tres modalidades dentro de los sistemas de producción se distribuyen de la siguiente manera:

- Partes estándar producidas en industrias (24%);
- Prefabricación de elementos personalizados fuera de la obra (28%);
- En obra (48%) mediante la implementación de técnicas de vertido (46%), o mediante sistemas de fabricación propias (2%).

Los elementos estándar representan el 24% de los casos, los que utilizan mayormente los elementos estándar e idénticos para una mayor eficiencia,

33 Vladimir Grigorievich Shukhov. The Shukhov Tower Foundation. 2015. [viewed 9 August 2015]. Available from: <http://www.shukhov.org/shukhov.html>

34 Giovannardi, Fausto. *Vladimir G. Shukhov and the Lightness of Steel*. Creative Commons, 2007.

rapidez y economía. Se implementan en los proyectos de Shukhov, tanto en la primera estructura de doble curvatura, como en sus variadas torres. Las geodésicas como Zeiss I, Climatron, y la Expo 67 (Fuller) también utilizan elementos estándar, aunque de diversos largos para acomodar las variaciones geométricas requeridas por su geometría, y aunque calculo permite afirmar que las piezas están sometidas a diversos esfuerzos y por tanto podrían presentar variaciones para optimizar la economía de materiales.

Dieste utiliza piezas de albañilería estándar para desarrollar su obra en albañilería armada en el 4,5% de los proyectos estudiándolos; y su mayor innovación es crear estructuras de grandes luces con elementos estándar que requieren muy pocas horas de fraguado si se compara al hormigón armado.³⁵

Los sistemas de prefabricación mediante tecnologías emergentes o implementadas aparecen en muchos proyectos, como en los nuevos sistemas de ferrocemento preformado de Nervi, las bóvedas Gausiansas de Dieste, las geodésicas estandarizadas de Fuller, o el sistema low-tech implementado para las cáscaras de superficies regladas de Candela, los paneles reglados de Xenakis y Le Corbusier, Nervi y Tange; o las sofisticadas superficies tensadas de Otto, entre otras.

El uso de elementos prefabricados, es decir, construidos fuera de la obra en ambientes controlados y en piezas que son transportadas y ensambladas en obra a medida que avanza la construcción, aparece en el 28% de los casos. En este grupo se encuentran el ferrocemento, el sistema creado por Nervi de piezas de hormigón armado. Otros autores que utilizan este sistema son: Utzon, y Freissenet (cast-in place concrete). Finalmente, existen notables ejemplos de proyectos que elaboran sus sistemas propios de prefabricación en obra, como Le Corbusier y Xenakis en el pabellón Philips.

La fabricación in situ es el sistema mas tradicional de construcción, y consiste en el encofrado y vertido de hormigón, y se utiliza en casi la mitad de los proyectos estudiados (48%). La verdadera innovación aparece en el descubrimiento de generar curvas a partir de elementos rectos intentaba economizar y simplificar los encofrados y por tanto hacer factible su construcción. Este entrecruzamiento entre la geometría de los encofrados y su implementación en la obra, se convertiría en un elemento clave en toda la obra de Candela.

Finalmente se puede afirmar que existe una estrecha relación entre la definición geométrica de sus partes y los procesos constructivos, debido a que hay formas que se adaptan mejor a ciertos materiales, sistemas de ensamblaje y erección.

Se utilizan superficies regladas derivadas de elementos rectos para posibilitar el uso de elementos estándar a partir de perfiles metálicos rectos, como por ejemplo las hipérbolas de 1 hoja;

- Las parábolas permiten una estabilidad en la construcción de costillas o

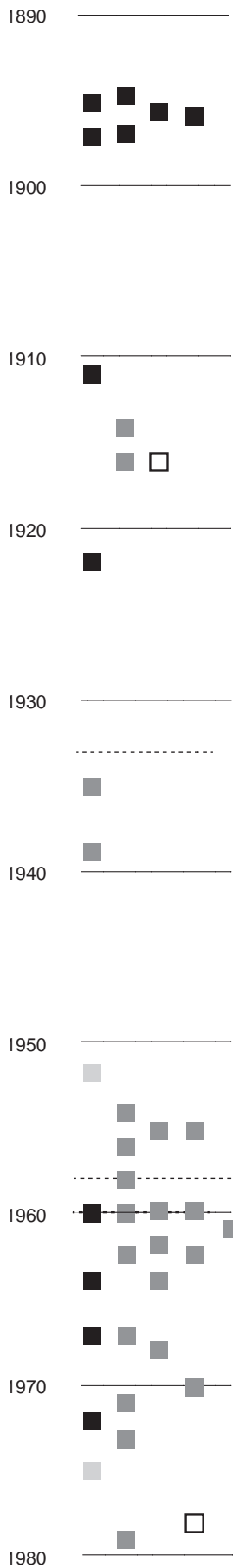
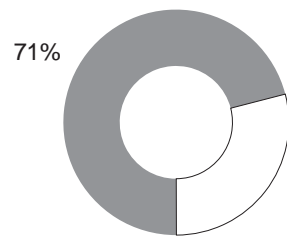
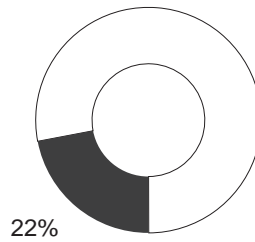


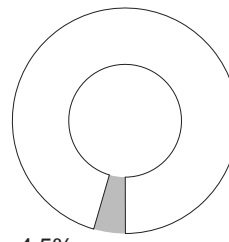
Fig. 3-3-2: Materiales de construcción en los proyectos. Metal (negro), Hormigón (gris oscuro), Albañilería (gris), madera (gris claro).



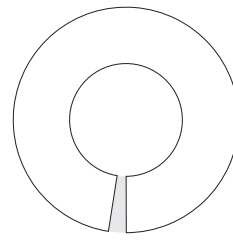
HORMIGON



METAL

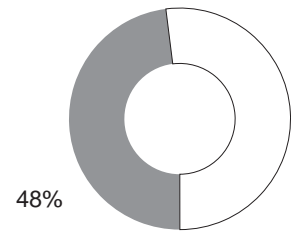


LADRILLO

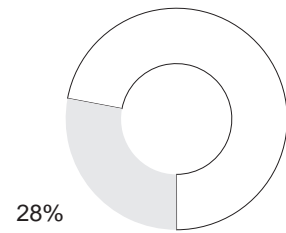


MADERA

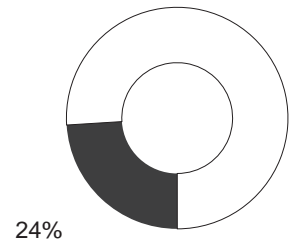
MATERIALIDAD



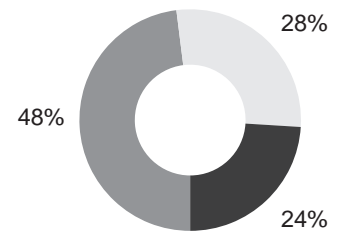
PERSONALIZADA



PREFABRICADA



STANDARD



TOTAL

SISTEMAS DE PRODUCCION

Fig. 3-3-3: Timeline con materiales de construcción en los proyectos. Metal (negro), Hormigón (gris oscuro), Albañilería (gris), madera (gris claro).

Fig. 3-3-4: Sistemas de producción en los proyectos seleccionados: Prefabricada (gris claro), Personalizada (gris), Estándar (negro).

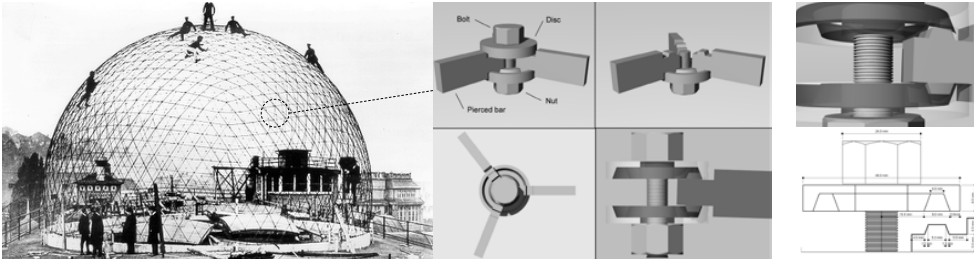
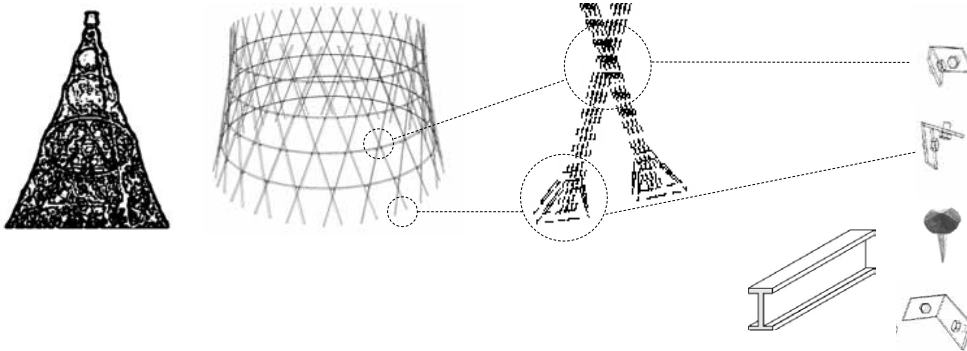


Fig. 3-3-5 & 3-3-6: Elementos constructivos estándar en algunos de los proyectos estudiados. Zeiss 1 de 1923, y Torre Shabolovka de 1922.



arcos, lo que permite implementar sistema de encofrados reusable y movable;

- El hyper (paraboloide hiperbólico) se relaciona con la implementación eficiente de un sistema de encofrado mediante generatrices rectas;
- Las geodésicas pueden ser montadas a partir de las barras desde su perímetro o generando un arco central, y por tanto no requieren de sistema de encofrados;
- Los hiperboloides de 1 hoja son superficies regladas y por tanto se construyen en un sistema de anillos conectados por directrices diagonales rectas y no requieren encofrados;

El detalle constructivo contiene toda la inteligencia del sistema, caracterizado por partes íntimamente interrelacionadas.

- Parte o miembro;
- Nodo o conector;
- Apoyos, anclajes, y Fijaciones.

SISTEMAS NERVADOS

Proyectos: 1st. superficie de doble curvatura (Shukhov, 1897), Las torres de Shukhov (1896 y 1911); Palacio de Cristal (Taut, 1914); Air Force - Eight Airplane Hangars (Nervi, 1935 – 42); Airship Hangar (Freissenet, 1916).

A continuación se desglosan estos proyectos en termino de su materialidad, elementos constructivos, y técnica de ensamblaje.

La primera superficie de doble curvatura (Shukhov, 1897) se construye a partir de elementos idénticos y estándar, lo que supuso una innovación técnica comparado a mallas metálicas anteriores, lo que permite eficiencia económica y un rápido ensamblaje. Perfiles angulares y placas metálicos de 600mm en la cuerda superior; mientras que perfiles L de varios tamaños, y perfiles 2-C @ 420mm conforman la cuerda inferior.³⁶ Los arcos se apoyan horizontalmente por catorce tirantes de 26mm de diámetro, mientras que dos barras se encuentran en la inclinación de la cuerda inferior. Doce barras se fijan al cordón superior de las armaduras en la posición media de la nave, un poco distanciada de la columna intermedia. Bisagras con una llave en hierro fundido poseen conexión con ranura. Los conectores son remaches, y la bisagra en el ápice tiene un perno de 75mm diámetro.

Las Torres de Shukhov (1896, 1911) se construyen a partir de elementos metálicos estándar, con perfiles L de tamaño variable (120 x 120 x 12), (75 x 75 x 8), (80 x 80 x 10). Las torres despliegan un singular sistema de ensamblaje, donde cada segmento de la torre (partiendo desde el más bajo) se comienza por construir a partir de los anillos superior e inferior, para instalar las generatrices diagonales uniendo los anillos. Para subsanar el giro requerido en cada generatriz en la parte superior, se tuercen cada una de las piezas a mano. Una vez finalizado el segmento, se continúan posicionando los segmentos siguientes de manera similar a un telescopio, al construir los anillos bajos en la periferia, y los segmentos más altos hacia el interior. Mediante máquinas, o poleas, se sube cada segmento a su posición final. De esta manera, los segmentos de las torres son a su vez estructura y andamio, reduciendo el tiempo y la cantidad de materiales utilizados, y también minimizando la mano de obra.

El proyecto de Air Force - Eight Airplane Hangars (Nervi, 1935 – 42) utiliza un sistema compuesto de vigas prefabricadas de ferrocemento para conseguir la máxima economía. Las vigas arqueadas de 1m de altura, y de 12 a 20cm de espesor, acogen paneles de forma cuadrada de aprox. 4,5m de

³⁶ Matthias Beckh, Rainer Barthel. *The First Doubly Curved Gridshell Structure - Shukhovs Building for the Plate Rolling Workshop in Vyksa*. Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus, May 2009.

lado. Los elementos prefabricados de la estructura reticular se enlazan de manera que forman una serie de rombos (cuadrados en el plano); al unir cuatro elementos. Las viguetas de la cubierta se posicionan en los ejes aseguradas por un sistema de encofrado. Los puntos de unión se resuelven con hormigón vertido y barras de refuerzo, capaces de transmitir cargas tanto de compresión como de tensión, las barras se dejan fuera para ser unidos mediante soldadura eléctrica. El vertido de la estructura de relleno es un conglomerado de supercemento de alta resistencia, la que no se realizó hasta que después de sucesivas pruebas de dosificación y granulometría de laboratorio permitió obtener probetas con cargas de rotura superior a 350 kg/cm².^{37 38 39 40}

El Airship Hangar (Freyssinet, 1916) fue una estructura de hormigón pretensado consistente en una serie de arcos parabólicos paralelos que forman una bóveda de 300m de largo, 90m de ancho, y 60m de alto (985' H, 300' W, 195' H). Cada arco se monta a partir de secciones de 7,5m de ancho (25'), de sólo 9 cms (3,5") de espesor. Situados uno al lado del otro, los arcos forman una superficie corrugada, proporcionando la rigidez necesaria "doblando" el hormigón en los arcos obteniendo resistencia por arriostramiento transversal de carga de viento lateral. El arco de hormigón conforma una superficie totalmente plegada y parcialmente acristalada fue construido mediante la adición de piezas prefabricadas de hormigón en forma de V, unidas mediante un vertido de hormigón en el encofrado de pino reutilizable. Las piezas prefabricadas se aseguraban en su lugar y sus conexiones son vertidas en moldes de madera contrachapada apoyados en un encofrado de madera movable de segmentos de 7,5m de ancho. Un hormigón de fácil compactación es utilizado para fluir en cada esquina de los complicados moldes, de fraguado rápido para que encofrado pueda ser removido y reutilizado rápidamente, y al mismo tiempo asegurar que los hangares serían impermeables. Las uniones son reforzadas con barras de acero de tensión pretensado, lo que se implementa con apoyos temporales en el encofrado de madera mediante una red de cables que asegura la tensión hasta que el hormigón desarrolle toda su fuerza. El peso propio de la estructura fue acomodado al aumentar el área de la sección transversal de los arcos cuando se acercan al suelo, donde las fundaciones se resuelven en plataformas horizontales profundas de hormigón con una pendiente hacia el centro de los hangares. Trágicamente, en 1944, la aviación estadounidense bombardeó estas estructuras revolucionarias y hermosas.^{41 42 43 44}

37 Powell, Kenneth (ed.), *The Great Builders*. London: Thames & Hudson, 2011. Pp. 203.

38 Mariano, Fabio; Milelli, Gabriele. *Pier Luigi Nervi : Una Scienza per L'architettura*. Roma : Istituto Mides, 1982. P. 3.

39 Ibid. Pág. 33.

40 Desideri, Paolo; Nervi, Pier Luigi; Positano, Giuseppe. *Pier Luigi Nervi*. Barcelona : Gustavo Gili, 1981. Pp.63-71.

41 Frampton, Kenneth; Futagawa, Yukio. *Modern Architecture : 1851-1945*. New York : Rizzoli, 1983, P 204.

42 Farrelly, op.cit., p 43.

43 Frampton, Kenneth; Futagawa, Yukio. *Modern Architecture : 1851-1945*. New York : Rizzoli, 1983, P 204.

44 Freyssinet, E. Concrete Airship Sheds At Orly, France, *Le Genie Civil*, September

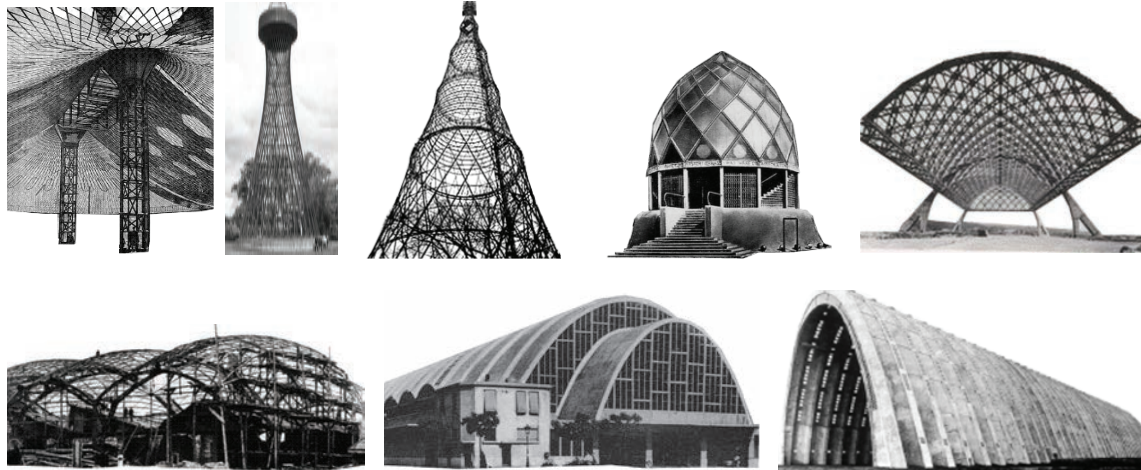


Fig. 3-3-7: Proyectos de nervaduras estructurales: Las torres de Shukhov (1896 y 1911); Palacio de Cristal (Taut, 1914); Air Force - Eight Airplane Hangars (Nervi, 1935 – 42). Columna inferior: 1st. double curvatura surface (Shukhov, 1897); Airship Hangar (Freissenet, 1916).

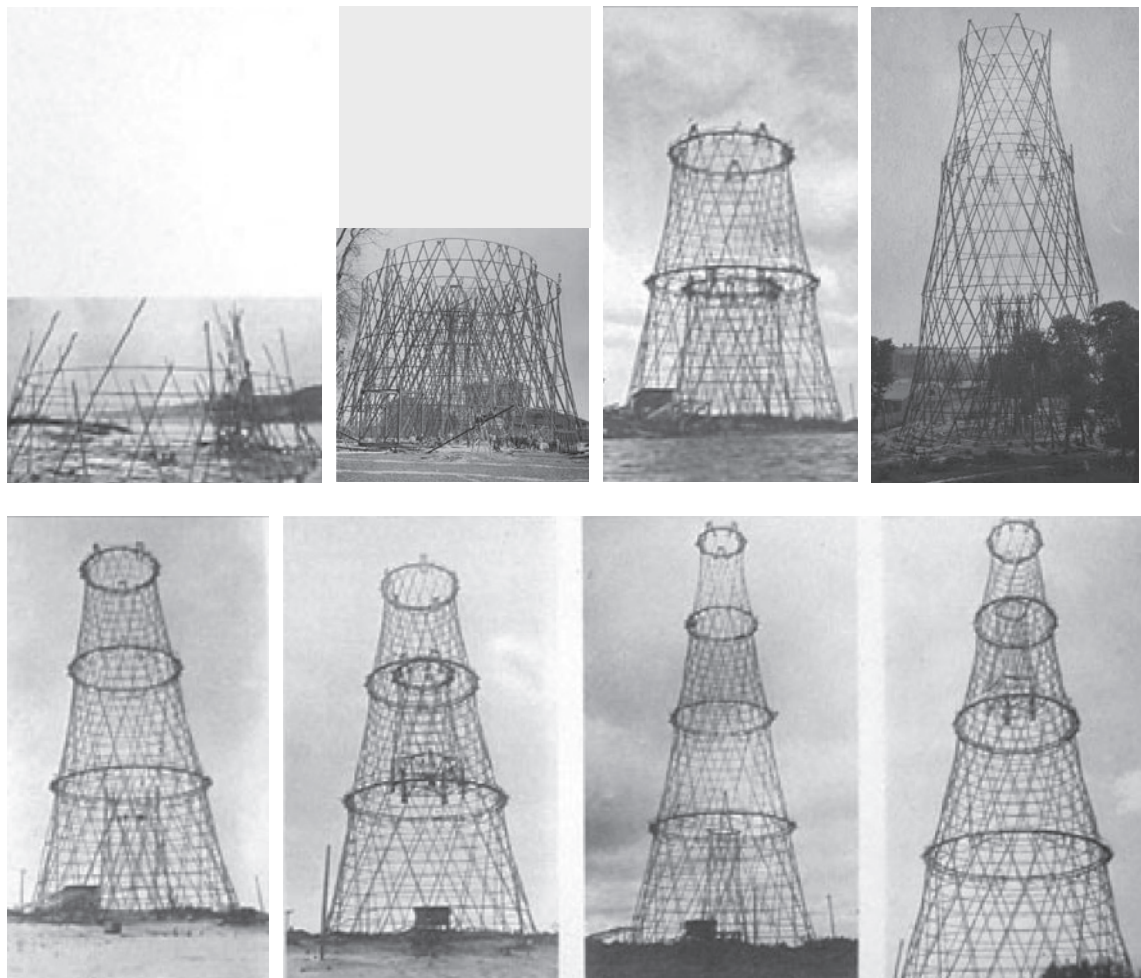


Fig. 3-3-8: Secuencia de construcción del proyecto las torres (Shukhov, 1896).

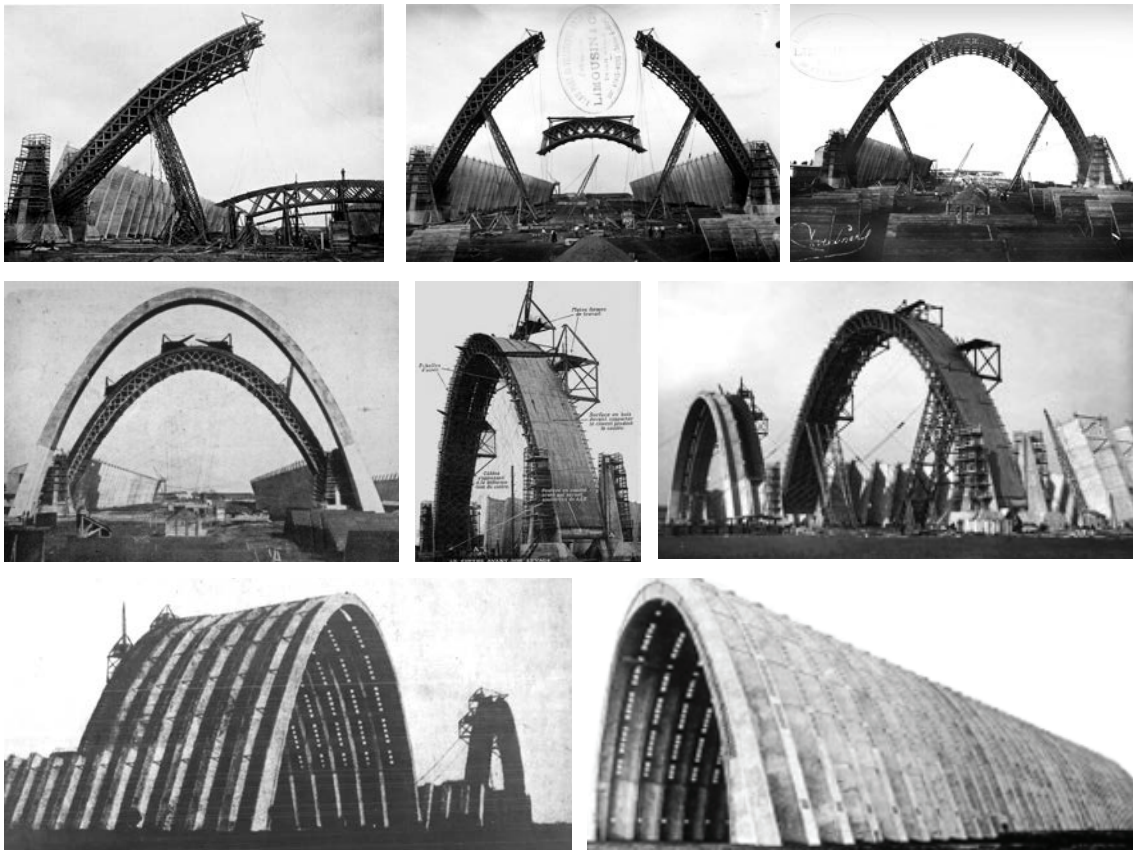


Fig. 3-3-9: Secuencia de construcción del proyecto de nervaduras estructurales, tomadas entre Abril y Setiembre de 1923.

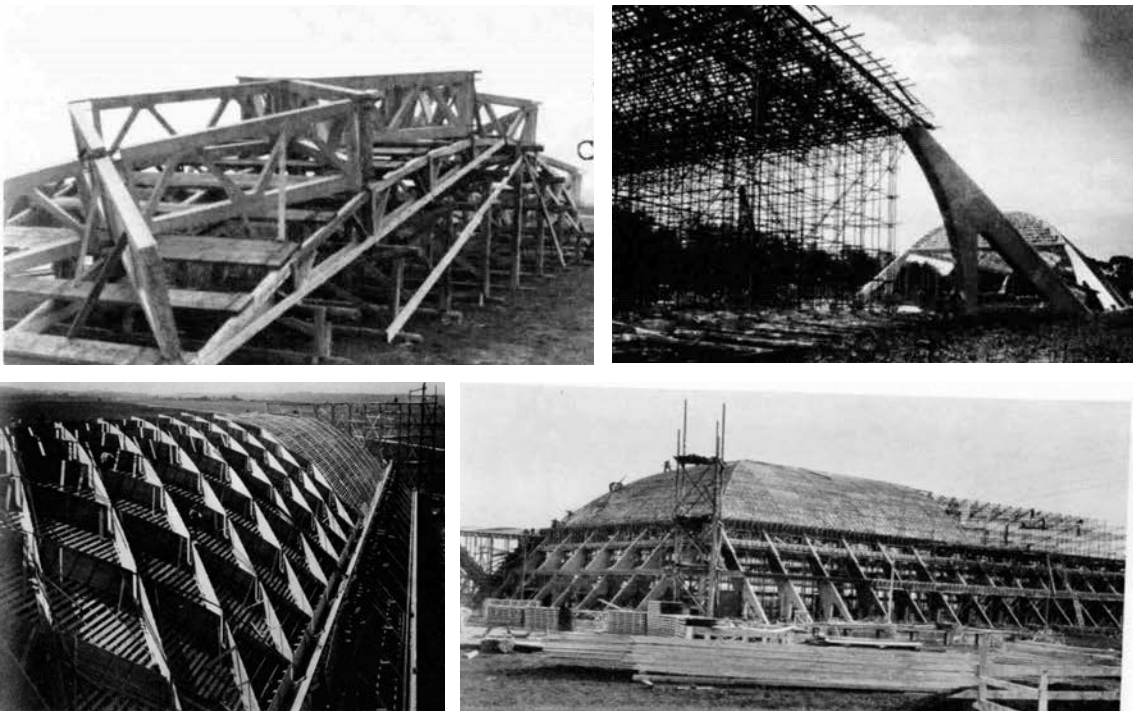


Fig. 3-3-10: Secuencia de construcción del proyecto de nervaduras estructurales.

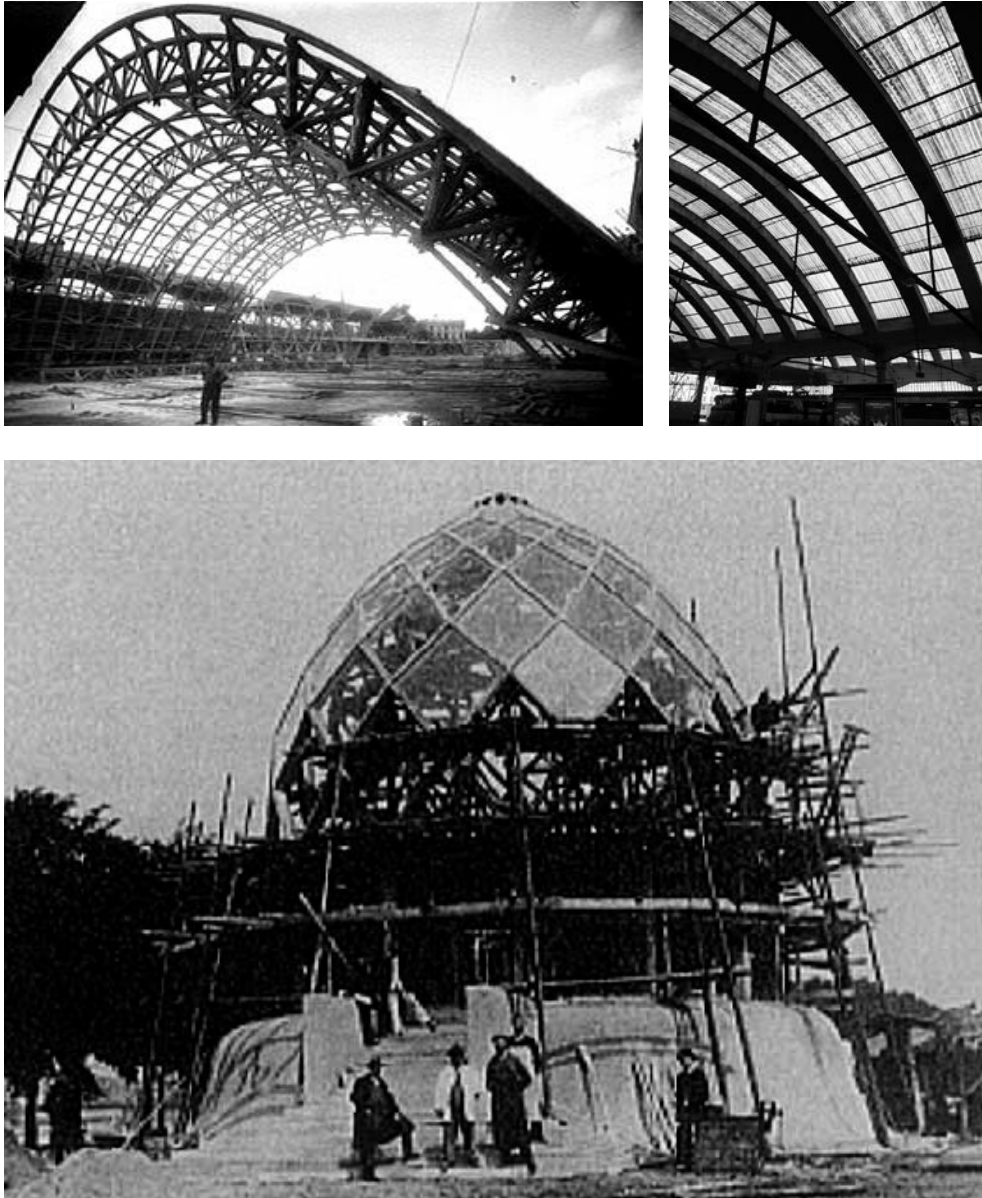


Fig. 3-3-11: Secuencia de construcción de proyecto de nervaduras estructurales. Airship Hangar (Freissenet, 1921-23), Palacio de Cristal (Taut, 1914).

Finalmente, el Glass Pavillion (Taut, 1914) trabaja con un sistema personalizado de hormigón vertido en obra, generando una “malla romboidal irregular de la cúpula se construyo con unos finos nervios de hormigón armado de difícil encofrado.”

3.3.5.2

FUSELAJES GEODÉSICOS

En los proyectos de cúpulas geodésicas se aprecia el uso predominante del metal (acero o aluminio), y en menos medida se usa madera.

Los proyectos incluyen : Zeiss I (1923), Cúpulas Geodésicas de Fuller (1950-1980), The Dome Restaurant (1952), Climatron (Murphy Mackey, 1960), Expo 67 (Fuller, 1967); Palacio de Deporte (Candela, 1968).

El Zeiss I (Dyckerhoff y Widmann, Walther Bauersfeld, 1922) es la primera cúpula geodésica construido mediante una malla triangulada. El domo de 16m de diámetro se construyo con barras metálicas perforadas de sección rectangular estándar de 8 x 20mm de largo variable (4600 barras de 72 largos de aprox. 60 cm long), montadas en obra usando discos en sus puntos de conexión, mediante pernos y tuercas para su fijación. El contacto entre la barras y el disco se basa en un ángulo de rotación máxima de las barras entrantes, un centro de la rotación (C) y el punto de contacto (P), ya que define los movimientos permitidos y determinan dónde el sistema podría fallar. Se ha construido con una precisión de 1/20 mm y el peso de la estructura metálica es de 9 kg/m².⁴⁵ Finalmente la estructura se ha recubierto con hormigón, convirtiéndola en la primera estructura laminar en hormigón armado, o lo que mas tarde se denominaría “Thin Shell structures” o “laminas de hormigón armado”.⁴⁶

El Climatron (Murphy & Mackey, 1960) es una cúpula de 21 m (70') de altura, con diámetro de 53m (175'), y 2,230m² (24,000sf) de área, compuesto de 2,425 panes, y 3,625 paneles de Plexiglas. La estructura se compone de perfiles de aluminio de sección circular de 15cm (6") de diámetro actuando bajo compresión, y tirantes actuando bajo tensión. La fijación se ha realizado por técnicas de pernos y tuercas. E domo se ha tenido que reconstruir por requerir refuerzo al ser reemplazados los paneles de plexiglás por vidrio, y la estructura debía soportar mayor esfuerzo que el contemplado en el diseño original.

La Expo 67 se construye con perfiles metálicos de sección circular, conectados mediante tensores y placas metálicas. Un sistema de ensamblaje por partes permitió su rápida y fácil construcción, donde muchas de sus com-

22 & 29, 1923.

45 Ibid. Pág. 31-32.

46 Vinyes, Raül. *Integrating Aesthetics And Statics: Study of a Geodesic Dome*. Proyecto Tesina de Master Especialitat Estructures, RMEE, UPC. 2009. Pp.31-33.

ponentes se ensamblaban en unidades hexagonales separadas antes de ser montados en la obra.

El Palacio de Deportes (Candela, Costaneda y Peiri, 1968) es un domo de 132m de luz y 40m de altura, que se construye con una lógica estructural que aseguraba una economía de los materiales y a su vez garantizaba su rápida construcción en solo 18 meses. La cubierta se resuelve como una gran cúpula esférica, subdividida por dos ejes de arcos de acero que siguen círculos meridianos de una esfera cuyos ejes polares son horizontales con entrecruzamientos a 90 grados cada 14m formando celosías de 5m de altura. Los arcos se apoyan en muros de ladrillo y en arbotantes de hormigón triangulados que aseguran la rigidez del conjunto, y los contrafuertes de hormigón asientan el edificio al suelo. Los espacios entre los arcos se cubren con paneles triangulados en forma de superficies hyper usando paneles de aluminio recubiertos con una doble capa de madera contrachapada, la cual fue impermeabilizada con fieltro asfáltico y rematada con planchas de cobre de 30 x 120cm para generar una gran coraza.⁴⁷

En cuanto a la secuencia de ensamblaje, las geodésicas presentan una clara ventaja frente a otros sistemas. Dada su estabilidad estructural, se pueden construir sin encofrados, de modo que los mismos elementos estructurales son los que se utilizan como andamios durante su construcción, lo que resulta en una economía en materiales, mano de obra, y reduce significativamente el tiempo de construcción. La secuencia de ensamblaje obedece a un protocolo muy preciso, desde las fundaciones como un anillo continuo, a partir de donde se erigen arcos centrales como en el proyecto Zeiss I (1922), y el Palacio de Deporte (Candela 1968); o a partir de su perímetro se construyen sucesivamente en capas hasta completar la esfera como en los proyectos de la Expo 67 (1967), los Domes (1950 - ...), Dome Restaurant (1952), o el Climatron (1960).

47 Candela, Félix; Seguí, Miguel. *Félix Candela : Arquitecto*. Madrid : Instituto Juan de Herrera, 1994. Pp 88-91.

Fig. 3-3-12 : Proyectos de Cúpulas Geodésicas: Zeiss I (1923), The Dome Restaurant (Fuller, 1952), Climatron (Murphy Mackey, 1960), Expo 67 (Fuller, 1967); Cúpulas Geodésicas (Fuller, 1950-1980), Palacio de Deporte (Candela, 1968).



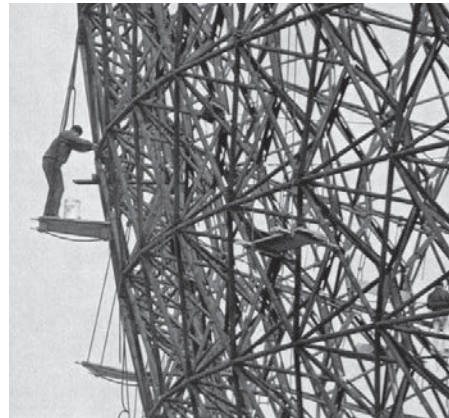
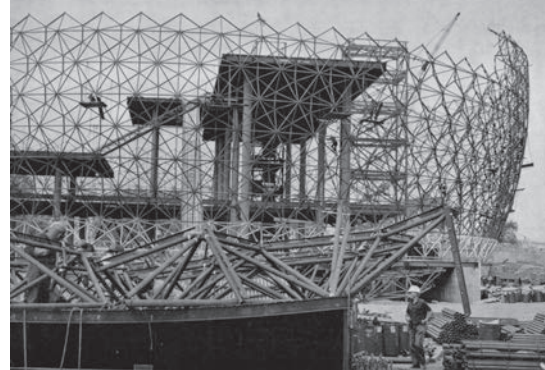
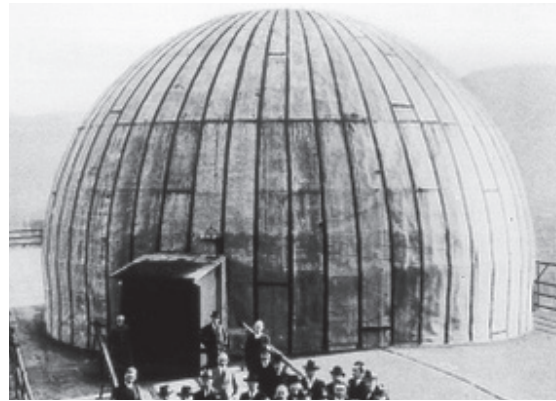
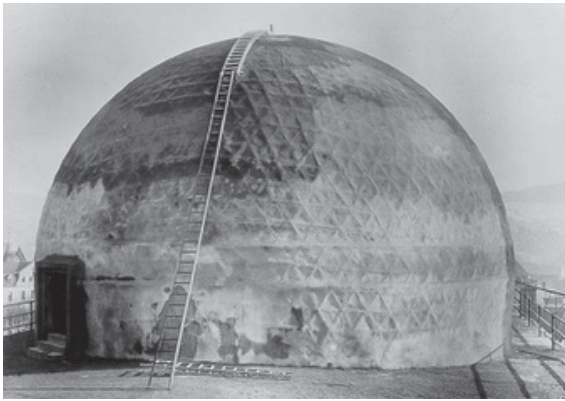


Fig. 3-3-13 : Secuencia de construcción de proyectos de cúpulas geodésicas. (Arriba) Zeiss I , 1923; (Abajo) Expo 67, Fuller, 1967.

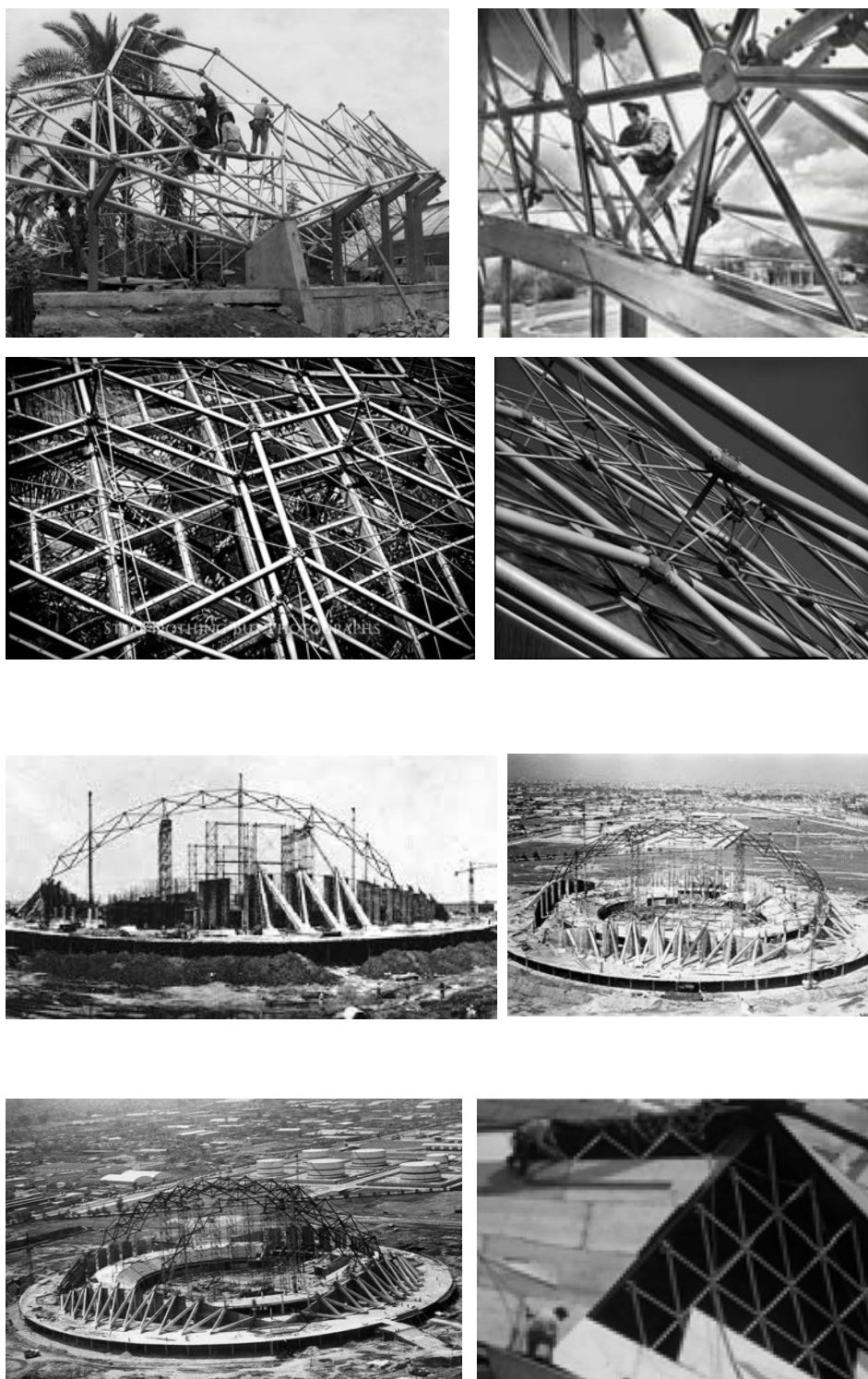


Fig. 3-3-14: Secuencia de construcción de proyectos de cúpulas geodésicas. (Arriba) The Dome Restaurant, Fuller, 1952; (Abajo) Palacio de Deporte, Candela, 1968.

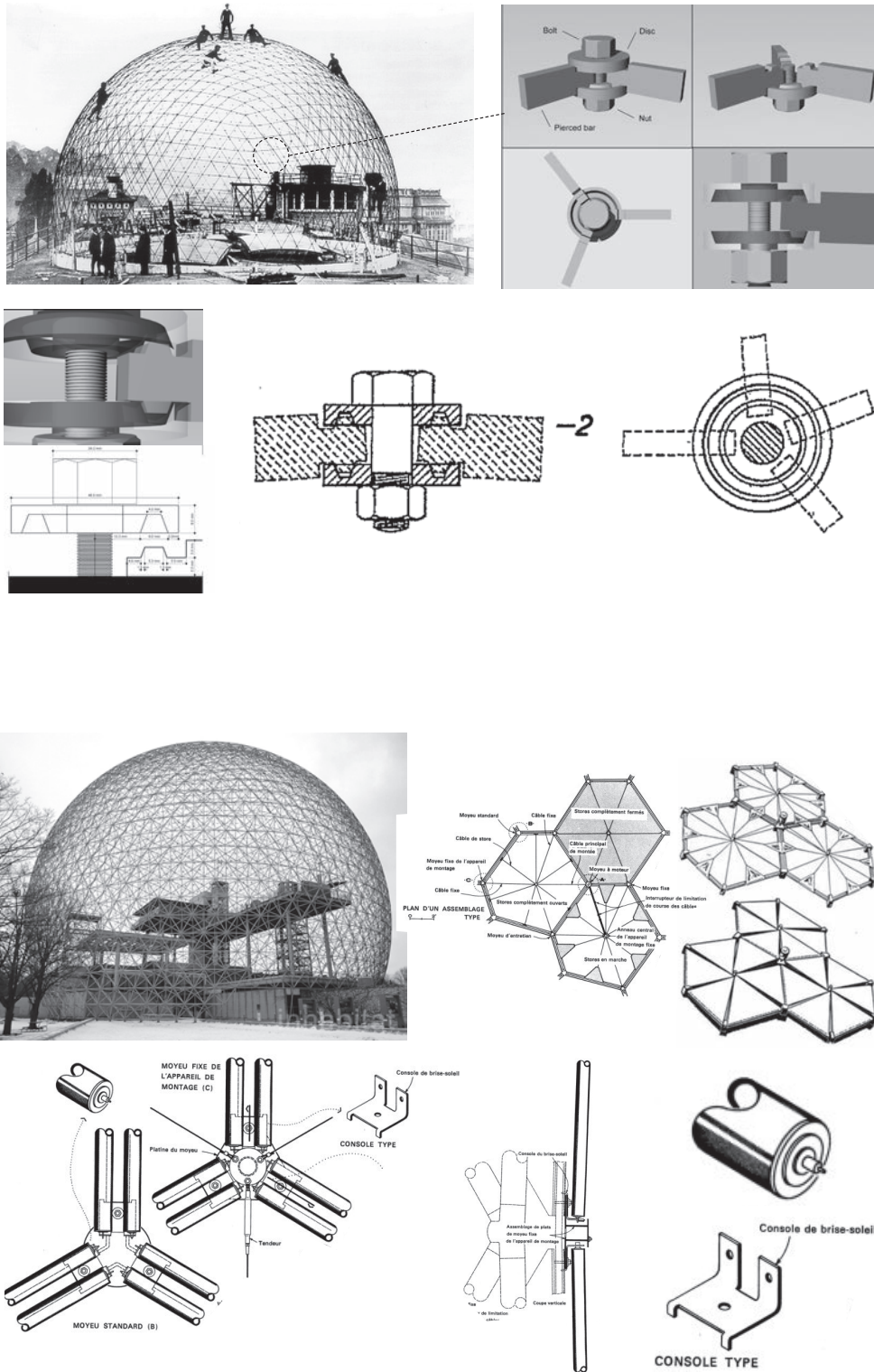


Fig. 3-3-15 & 2-3-16: Encadenamiento de sistemas detectadas en proyectos de cúpulas geodésicas.

PIELES ESTRUCTURALES

4.3 Pieles estructurales (envolvente monocasco, donde la envoltura actúa como estructura), incluyendo las laminas autoportantes de Hormigón Armado y Albañilería Armada.

Se han identificado tres modalidades:

1. Laminas de hormigón armado: Mercado de Algeciras (Torroja, 1933); Hipódromo de Madrid (Torroja, 1935); CNIT (1954-5); Capilla Nuestra Señora de la Soledad (Candela, 1955); Royan Market (Simon, Morisseau 1955); Iglesia San Antonio de las Huertas (Candela 1956); Manantiales (Candela, 1958); Ingalls Ice Arena (Saarinen, 1958); Iglesia de Santa Mónica (Candela, 1960); Iglesia Guadalupe (Candela, 1963); Heimberg Tennis Center (Isler, Ted Happold, Ove Arup, 1979).

2. Sistemas semi-prefabricados colaborantes: Airship Hangar (Freysinet, 1916); Phillip Pavilion (Xenakis, Le Corbusier, 1958); Iglesia de Cuernavaca (Candela, 1958); Luce Chapel (I.M.Pei, 1960); St. Mary's Cathedral (Tange, 1963); Saint Mary's Cathedral (Nervi, 1971); Sydney Opera House (Utzon, 1957-73); Palacio de los Deportes, Roma, Nervi (1958-9); Audience Hall Vatican (Nervi, 1964-71);

3. Sistemas prefabricados: Iglesia de la Atlántica (Dieste, 1960); Cadyl Horizontal Silo (Dieste, 1975-8); Escuela Sagrada familia (1926?). Eladio Dieste utiliza elementos estándar de ladrillo, como en el Cadyl Horizontal Silo, o en la Iglesia de la Atlántica.

Los sistemas semi-prefabricados colaborantes permiten trabajar con unidades prefabricadas más pequeñas que se unen mediante conexiones rígidas, lo que posibilita la definición de una superficie continua.

Utzon SOH (1957-73): La estrategia geométrica enlazada con la estrategia constructiva permite subdividir las cáscaras en segmentos esféricos con costillas de curvatura constante mediante el ensamble de dovelas modulares por piezas prefabricadas más pequeñas en forma de V. La prefabricación de las dovelas facilita su producción en serie, reduciendo la variación del molde; de ahí la elección final para que todas las superficies pudieran ser parte de una misma esfera de radio constante en pequeñas unidades bajo tolerancias predeterminadas, y ser ensamblado después en la obra como un rompecabezas tridimensional.^{48 49} Bajo estos mismos criterios, se

48 Serrablo, op.cit. P 24.

49 *Sydney Opera House : Utzon Design Principles*. Australian Government, Depart-

prefabricaron los paneles de acabado recubiertos con mosaico cerámico, proporcionando paneles que permiten un acabado con una superficie perfectamente lisa.⁵⁰ Esta estrategia constructiva facilita el montaje y ensamblaje de sus partes, asegurando la calidad de la construcción, evitando el uso excesivo de andamios y encofrados durante la construcción, y proporcionando una cierta economía.

Pabellón Phillip, Le Corbusier (1958): La geometría de este proyecto se compone de una serie de paraboloides hiperbólicos, y dada su complejidad formal, requirió del uso de piezas prefabricadas generadas en la misma obra. Un sistema de encofrado hecho de montículos de arena replicaron la geometría base, sobre las cuales se posicionan listones de madera para generar las directrices, rellenando las secciones interiores con armadura, para luego verter el hormigón, construyendo así componentes individuales y únicos en su tamaño que son posteriormente montados en obra. Estas partes prefabricadas son montadas in-situ mediante uniones por soldadura y atornillado.⁵¹

Torroja trabaja con los denominados "thin-shell structure", que han sido montados completamente in-situ, tanto el complejo sistema de encofrados como el vertido de hormigón, que aplica en el Hipódromo de Madrid (1933), y el Algeciras Market Hall (1933). En Algeciras, el hormigón armado de 10 cm de espesor min. se ha incrementado a 55cm en los bordes.

Candela explora en varios de sus proyectos (Cuernavaca, Capilla Nuestra Señora de la Soledad, Iglesia San Antonio de las Huertas, Manantiales; Iglesia de Santa Mónica; entre otras) el uso de superficies con curvatura porque claramente exhiben mayor resistencia. Pero Candela advierte que algunas curvaturas, si bien resulta fácilmente deducible por los métodos de cálculo, no resultan factibles dado el alto costo asociado a los aspectos constructivos, como por ejemplo las cúpulas que resultan complejos y en su construcción.⁵² Candela, quien se consideraba por sobretodo un constructor, se muestra avido de aprender de sus obreros los aspectos inherentes a las prácticas constructivas en México, en un complejo contexto con limitados recursos, tecnología rudimentaria, y de constantes seismos.⁵³ Como respuesta a este problema, propone una solución asombrosa basada en cascarones de formas complejas, pero fáciles de construir porque poseen una clara estrategia constructiva derivadas de sus aspectos geométricos. Para ello, determina las generatrices rectas para geometrías con doble curvatura dentro de las denominadas "superficies regladas", explorando extensamente el paraboloides hiperbólico (hypar). La capacidad de generar encofrados a partir de piezas rectas en madera facilitaron inmensamente su construcción, porque no solo resultaban fáciles de montar, sino que también podía reciclar el material. Los proyectos tienen menos de la mitad

ment of Environment. 2002. [viewed 22 October 2015]. Available from: <http://docslide.us/documents/22-sydney-opera-house-utzon.html>.

50 Serrablo, op.cit. Pp 23-24.

51 Serrablo, op.cit., P. 24.

52 *Felix Candela*. The Harvard Crimson. 1961. [viewed 29 October 2015]. Available from: <http://www.thecrimson.com/article/1961/11/17/felix-candela-pthe-norton-lecturer-for/>.

53 *Félix Candela : Construction Techniques*. Princeton University Art Museum. 2008. [viewed 13 June 2015]. Available from: <http://mcis2.princeton.edu/candela/techniques.html>

de espesor logrando una notable esbeltez de láminas de 4cm de espesor, y su armadura es relativamente sencilla. En superficies inclinadas, se usa un hormigón mas seco con armaduras mas cercanas para evitar la caída de hormigón en su estado liquido. La obra de Candela ha sido denominada como "... algo único, un mundo nuevo, una nueva familia de formas, una nueva arquitectura."^{54 55}

Eladio Dieste (Iglesia de la Atlántica, 1960; Cady Horizontal Silo, 1975-8) será ampliamente conocido como "el Señor de los ladrillos", y comienza a explorar la innovación dentro de la tradición, para construir bovedas en mampostería armada con formas onduladas.⁵⁶ La estrategia constructiva se basa en el uso de geometrías curvas para trabajar con formas resistentes, capaces de generar superficies abovedadas de gran luz (salvar luces de 30m). Para ello, desarrolla una técnica que denomina "cerámica armada", consistente en el uso de ladrillos de gran esbeltez con refuerzos en acero, caracterizada por el uso dramático de las formas curvas, un mínimo uso de material, el manejo sutil de la luz, la gran economía de recursos, y la rapidez de su ensamblaje. Para ello, Dieste implementa una estrategia basada en las laminas de hormigón armado⁵⁷, combinando superficies de doble curvatura mediante un plano de ladrillos encajados, con juntas continuas de mortero insertadas con armaduras de acero y un plano superior de mortero. En esta última capa se puede introducir un mallado adicional de armadura longitudinal y transversal, lo que permite que la estructura sea capaz de soportar una serie de esfuerzos de tracción que la albañilería es incapaz de absorber por si sola.^{58 59 60}

Palacio de los Deportes, Roma, Nervi (1958-9): Nervi desarrolla estructuras básicas en su cálculo estructural dentro de una inusitada sencillez. Su prominencia reside en su diseño paradigmático de gran intuición creativa, que desafió convenciones en su tiempo, y abrieron paso a la potencialidades de las estructuras de grandes luces en hormigón preformado. Generando piezas prefabricadas off-site (Loseta Prefabricada) y In-Situ (Nervadura en Hormigón Armado), crea un sistema de partes que no requieren encofrado. La secuencia constructiva y de montaje consiste en posicionar las piezas prefabricadas con estructuras de soporte, y el vertido in-situ de las conexiones, así como el montaje de piezas mediante técnicas de soldadura, y atornillado.

Auditorio Sede Unesco - PL Nervi, M Bruer, B Zehrfuss (1953-8): Este proyec-

54 Candela, Félix, and Miguel Seguí Buenaventura. Félix Candela : Arquitecto. Madrid : Instituto Juan de Herrera [etc.], 1994. Pp. 20.

55 Félix Candela : *Construction Techniques*. Princeton University Art Museum. 2008. [viewed 13 June 2015]. Available from: <http://mcis2.princeton.edu/candela/techniques.html>

56 *Ingeniero Eladio Dieste*. Comisión de Constitución, Códigos, Legislación General y Administración, Poder Legislativo, Cámara de Representantes, Republica Oriental del Uruguay. Carpeta N° 2116, 2007. [viewed 22 June 2015]. Available from: <http://sip.parlamento.gub.uy/repartidos/ AccesoRepartidos.asp?Url=/repartidos/camara/d2007101067-00.htm>.

57 Serrablo, Vicente. (Personal Communication, 29 July 2015).

58 Mas Guindal, Antonio; M^a Adell. Josep. Eladio Dieste y la Cerámica Estructural en Uruguay. *Informes de la Construcción*, Vol. 56, n° 496, Marzo-Abril 2005. Pp. 13-23.

59 Alarcón, Óscar. *Estudio Paramétrico de Bóvedas Parabólicas de Cerámica Armada Mediante el Método del Análisis Límite*. Tesina de Master, UPC. 2014. Pp. 7-8.

60 Mas Guindal, op. cit.

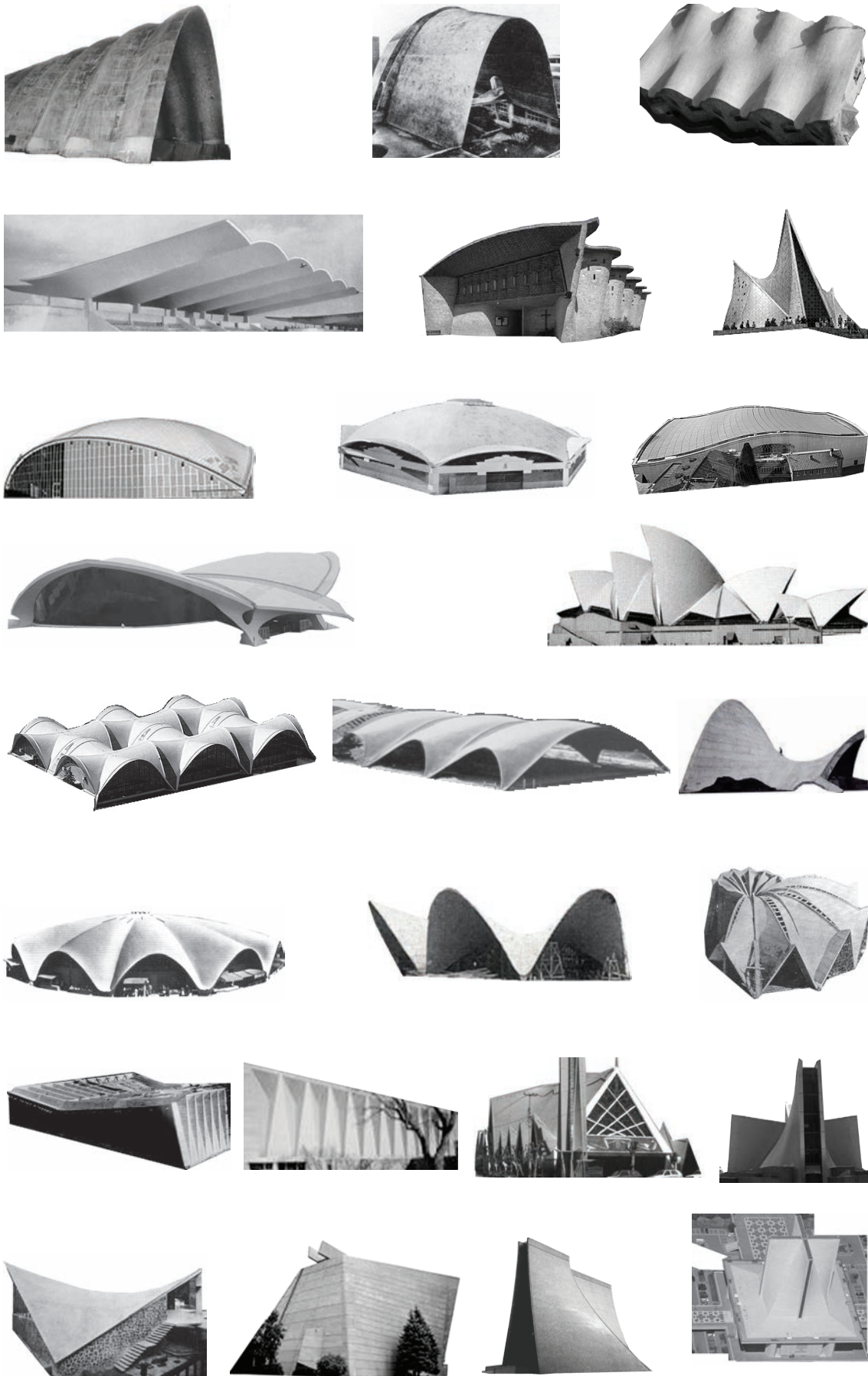


Fig. 3-3-17: Proyectos de pieles estructurales.

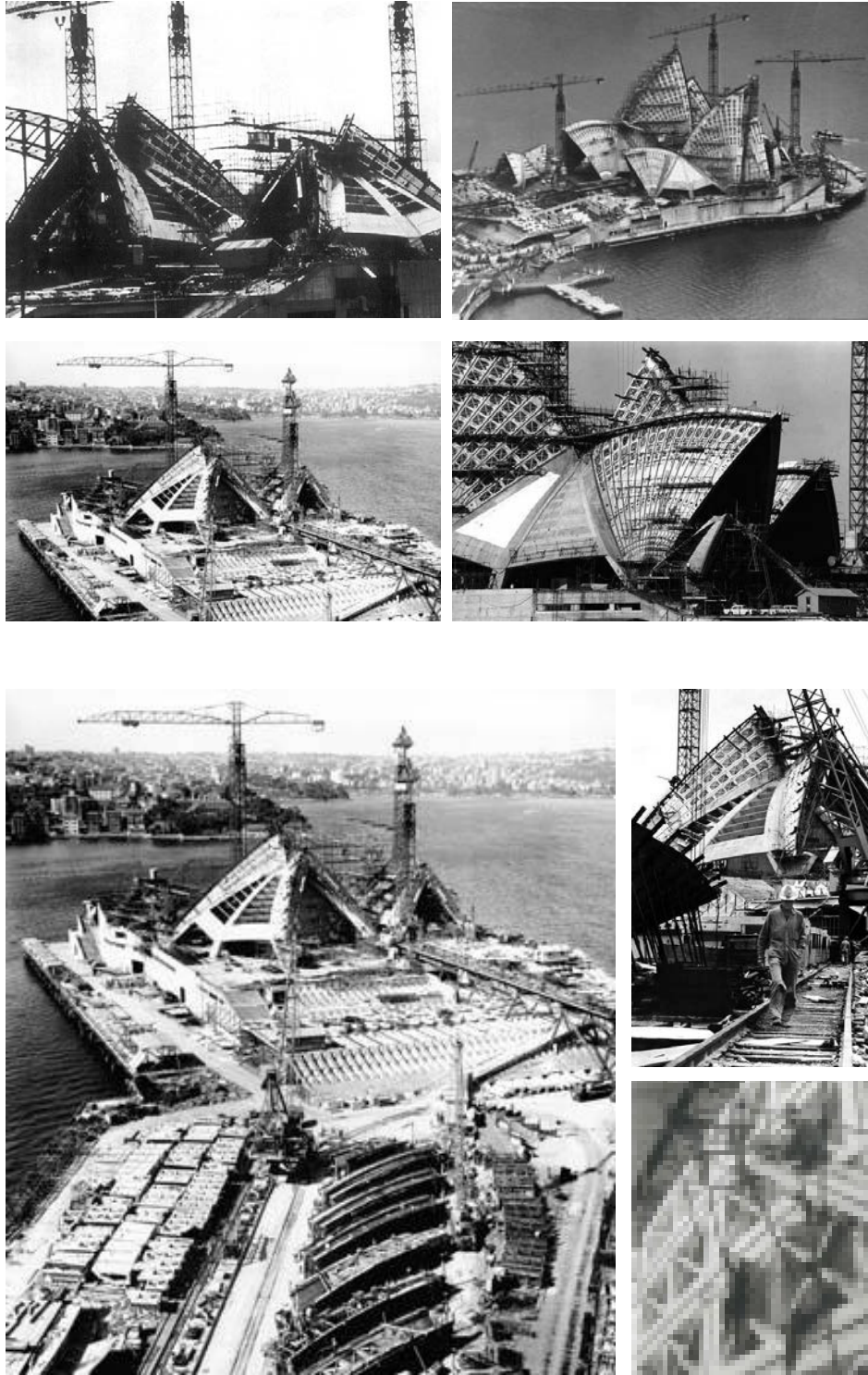
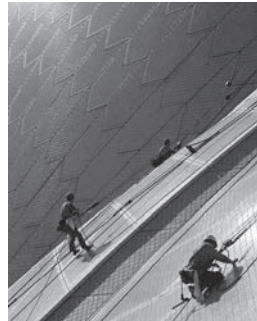
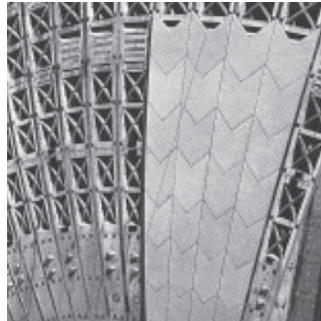
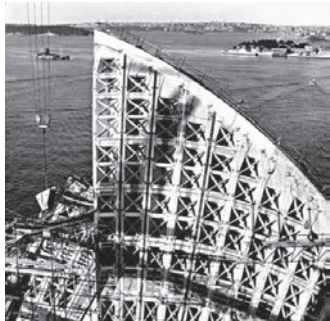
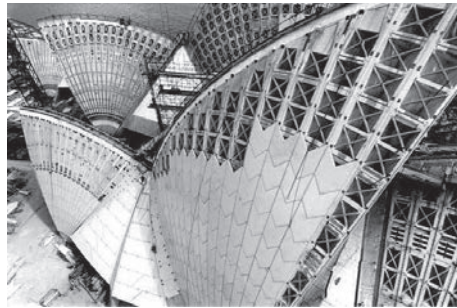
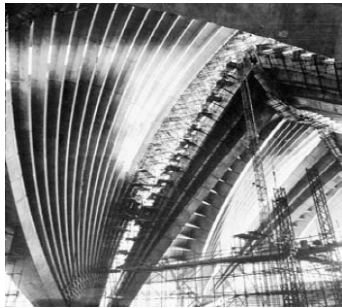
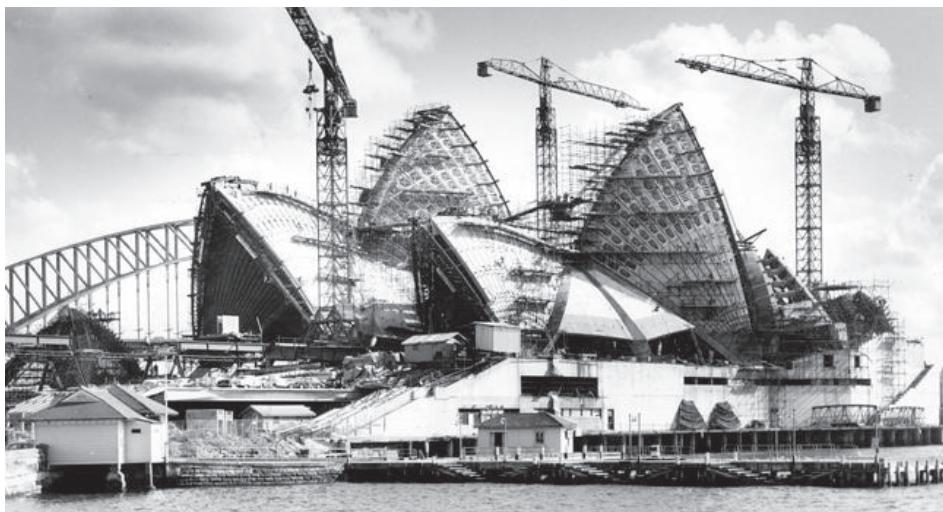


Fig. 3-3-18 y 3-3-19: Secuencia de construcción de proyectos de pieles estructurales en sistemas semi-prefabricados colaborantes implementado en el proyecto Sydney Opera House (Utzon, 1957-73).



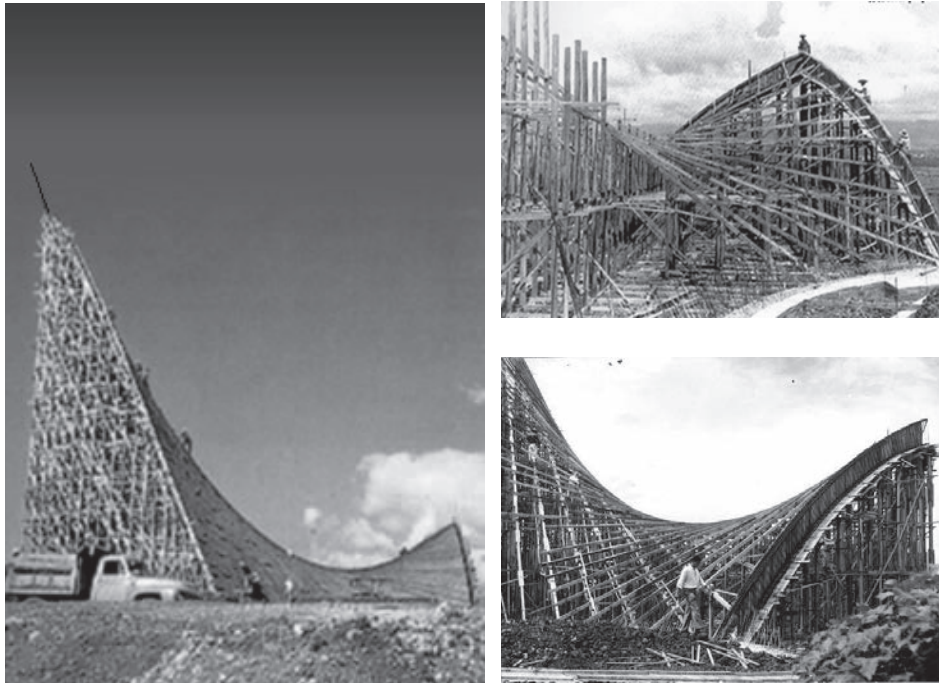


Fig. 3-3-20: Secuencia de construcción de proyectos de Candela, que muestra el encofrado a partir de líneas rectas.

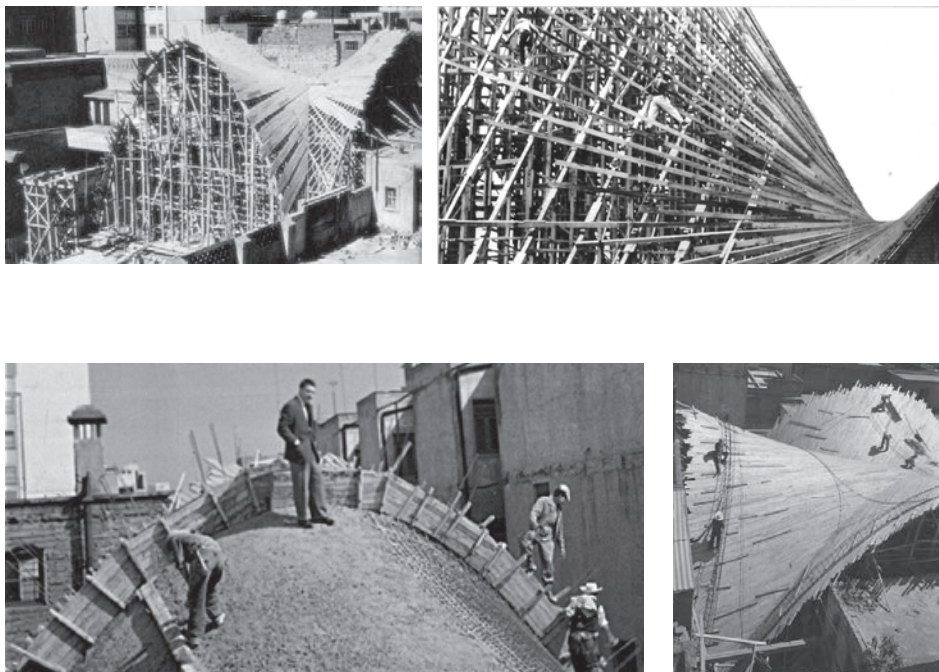


Fig. 3-3-21: Secuencia de construcción de proyectos de Candela, que muestra el encofrado a partir de líneas rectas.

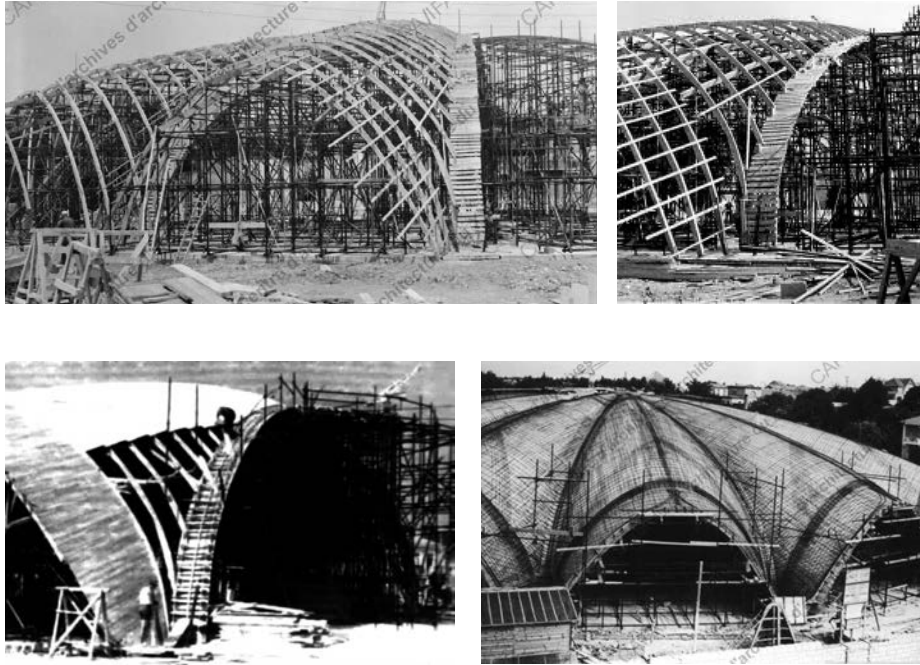


Fig. 3-3-22: Secuencia de construcción del proyecto en Royan, que muestran los sistemas de encofrados curvos.

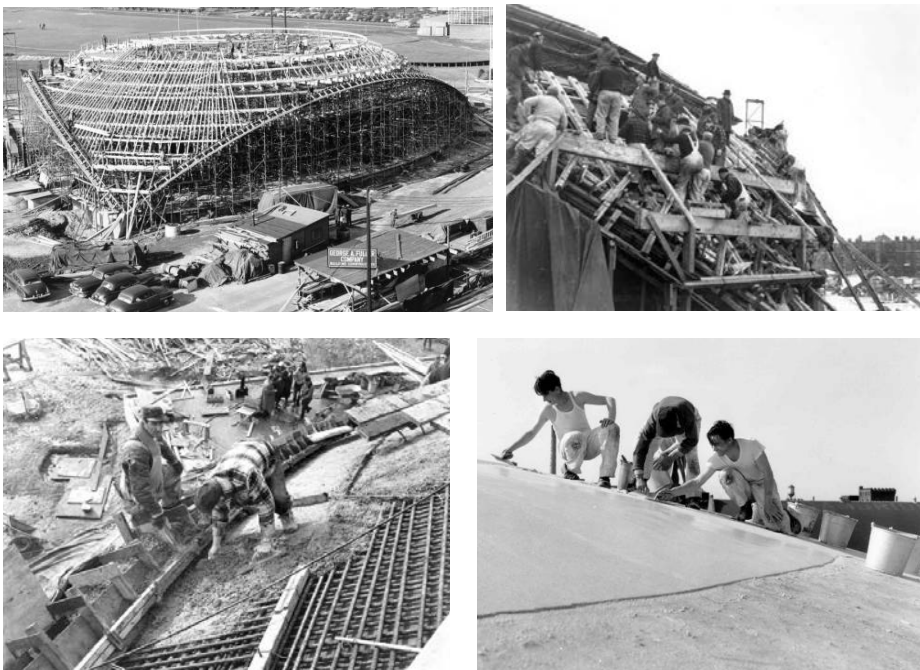


Fig. 3-3-23: Secuencia de construcción del proyecto del auditorio Kresge de Saarinen.

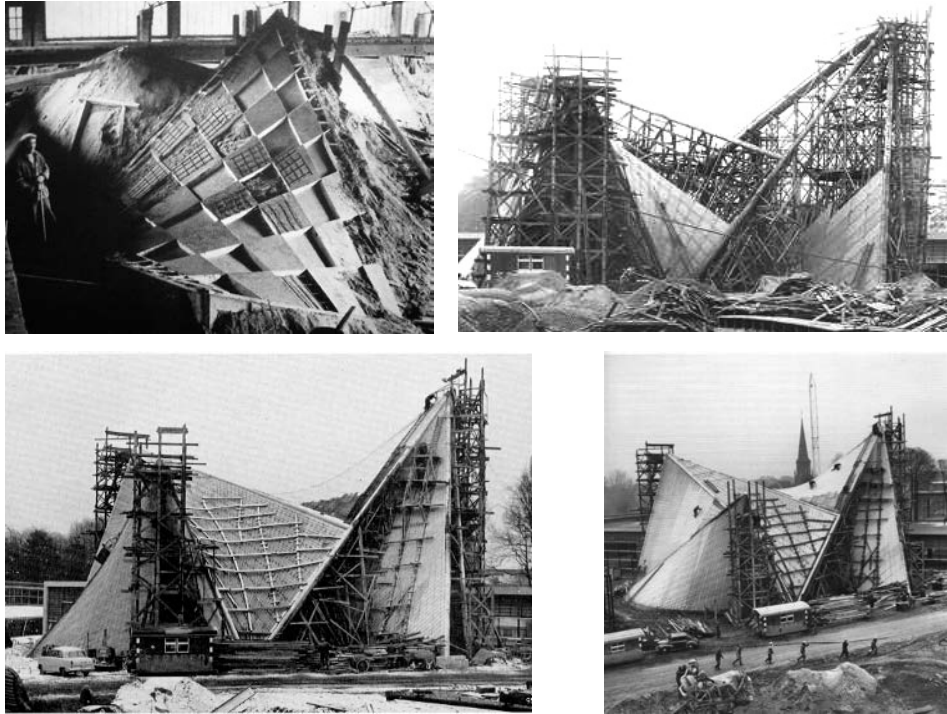


Fig. 3-3-24: Secuencia de construcción del Phillip Pavilion (Xenakis, Le Corbusier, 1958).

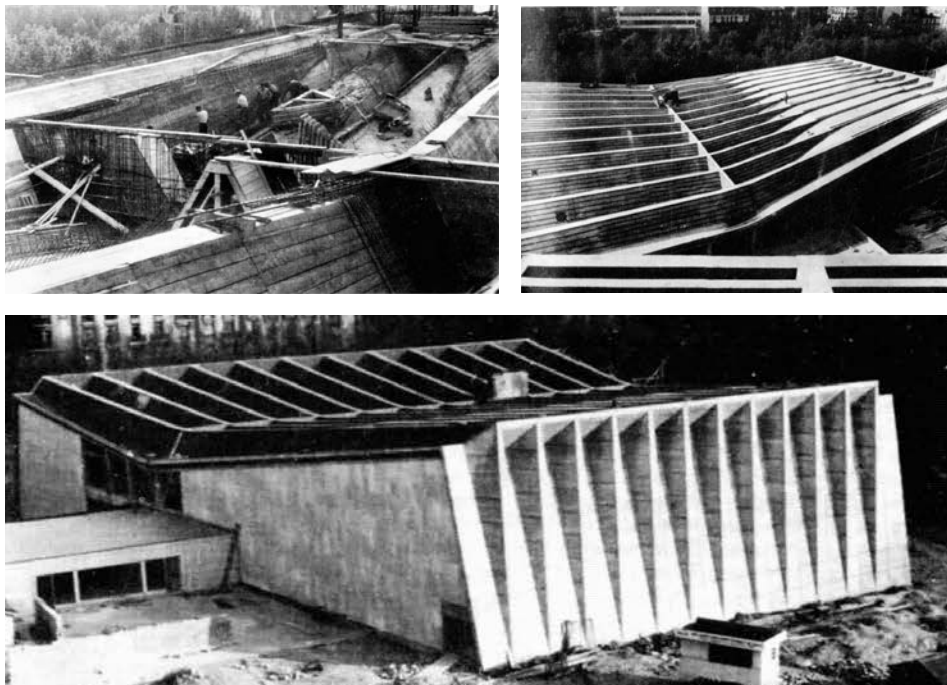


Fig. 3-3-25: Secuencia de construcción del proyecto Audience Hall Vatican (Nervi, 1964-71).

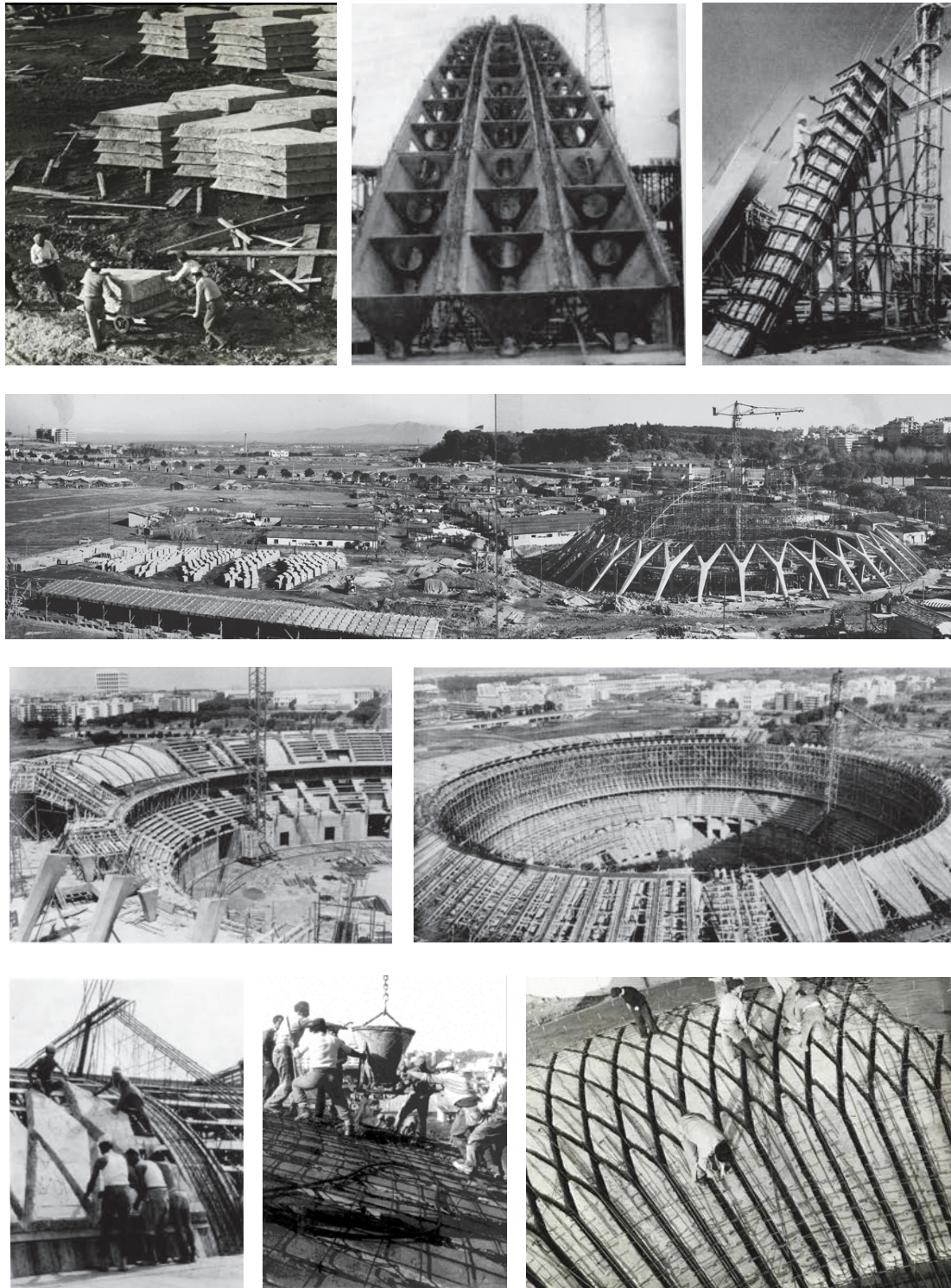


Fig. 3-3-26: Secuencia de construcción del Palacio de los Deportes, Roma, Nervi (1958-9).

to requería un espacio diáfano de 40m de luz, para lo cual se propone una estructura continua formada por una superficie ondulada de varias alturas, paralela a la variación de los momentos.⁶¹

3.3.6

CONTRIBUCIONES DE LA PRAXIS CONSTRUCTIVA

Este capítulo ha constatado que la influencia ejercida por la praxis arquitectónica-constructiva, manifiesta profundas y extensas repercusiones en el conjunto de proyectos estudiados, tanto en sus aspectos teóricos como prácticos.

En el ámbito teórico, a menudo se ha cuestionado la pertenencia de estos proyectos al Movimiento Moderno, entendido como una etapa de la arquitectura fuertemente determinada por los principios estipulados por la CIAM. A pesar de haber aparecido en el mismo periodo temporal, plantean nuevos paradigmas que distan de las preocupaciones que dominaron una parte importante de la arquitectura de la época. Sin embargo, se podría argumentar que los principios propuestos por la CIAM se basaron en los adelantos técnicos propios de su época, y por tanto, el Movimiento Moderno también se podría caracterizar por etapas de gran experimentación. El periodo del Siglo 20 contiene entonces notables intentos y sorprendentes ejemplos de incorporar los avances tecnológicos y científicos de su tiempo. Si la noción de lo moderno se basaba en un límite entre lo viejo y lo nuevo, como argumenta Banham, la modernidad se podría entender como la continua tensión entre estos dos conceptos, la que se presentaría de manera recurrente dentro de una continua ambivalencia a lo largo del Siglo 20, y quizás se continuaría manifestando hasta la actualidad.

Estos proyectos exponen a un grupo importante de arquitectos e ingenieros que estaban atentos a los avances de su tiempo para abrir nuevos caminos, para iniciar nuevos discursos, y para construir un futuro hasta entonces inexplorado en la arquitectura. Estos proyectos introducen nuevos conceptos, principios, metodologías, protocolos, y modos de pensar, dentro de una constante búsqueda de un pensamiento renovado muchas veces introduciendo ejemplos pioneros para su época. Esta actitud inquisitiva reclama una furiosa pertenencia a su tiempo, al intentar abrazar los adelantos técnicos, los avances en el conocimiento científico, e intentar vincularse a la cultura y el arte, planteando que quizás la innovación pertenece tanto a su tiempo como al futuro que intenta construir.

Dentro de este contexto, este capítulo ha verificado la importante influencia de ciertos adelantos científicos y tecnológicos en las prácticas constructivas, donde el proyecto arquitectónico se propone dentro de un espíritu de creciente experimentación, aprendizaje, y descubrimiento. Como lo han afirmado repetidamente Giedion y Banham, el trascendental rol de la tecnología, y en especial de principios de la mecanización, resultan influencias innegables en el conjunto de proyectos analizados.

Este capítulo ha intentado detectar la "similitud en métodos e intenciones" que plantea Giedion (1962 definido por Banham), para lo cual se han analizado un número importante de proyectos como un fenómeno interrelacionado. Estos proyectos revelan que estas manifestaciones resultan más generalizadas que lo supuesto inicialmente por los autores, donde los proyectos estudiados no aparecen aislados, sino que existe un cuerpo de conocimiento que se había estado construyendo, lo que se evidencia en las similitudes existentes entre ellos. Por lo tanto, se han estudiado proyectos estableciendo afinidades, detectando autores, intentando documentar y analizar métodos e intenciones en sus aspectos constructivos-estructurales-geométricos, lo que permite trazar ciertas agrupaciones. Se confirma así la tesis de Banham de que existió una cierta "similitud en métodos e intenciones", pero se verifica que muchas veces no existe una directa relación entre estos proyectos ni entre sus autores.

Se han reconocido algunos proyectos dentro de un discurso distinto al predominante en su época, donde se detectan lo que Banham denomina "métodos radicales", los que pueden enunciarse a continuación. Son proyectos pioneros en su época, que utilizaban los avances técnicos de su época y aplicaron métodos en la arquitectura antes inexplorados, frecuentemente utilizando geometrías radicales para aplicar técnicas constructivas singulares.

Banham habla de un cambio en el 'modo de pensar', el que se ha descrito como una actitud de adoptar el conocimiento presente mediante el estudio de las ciencias y la tecnología; la incorporación de los modos de producción y de ensamblaje basados en los principios de la industrialización y la mecanización; y en una radical concepción del espacio, los que se implementan extensamente en el conjunto de proyectos, confirmando que este nuevo modo de pensar constituye uno de los factores fundamentales para los avances en la disciplina. En conclusión, los aportes relacionados con aspectos de construcción de los proyectos seleccionados en este estudio evidencian un cambio de pensar, que podría resumirse en la búsqueda de una íntima correspondencia entre forma, estructura, construcción, y espacio.

Banham argumenta además que la incorporación de nuevos materiales supone una verdadera "revolución", afirmando que la práctica arquitectónica ha estado en alboroto desde entonces. Si bien podría argumentarse que Banham estaba en lo correcto cuando hablaba de una 'revolución', esta tesis ha demostrado que esta revolución habría comenzado hacia ya un largo tiempo atrás, y que quizás, estamos aun inmersos en ella. Dentro de este contexto, la arquitectura continuaría evolucionando en tiempo presente, y el legado de los maestros del siglo pasado continuaría ejerciendo innegable influencia en las prácticas actuales. La arquitectura se entendería como medio de especulación donde aplicar la visión de la innovación en una continua revolución.

ARQUITECTURA AUSENTE DEL SIGLO 20

Este estudio ha comprobado que existieron ancestros mas diversos, variados, y quizás de mayor repercusión dentro de los abovedamientos que Banham plantea fueron iniciados por Pier Luigi Nervi, y continuados por Torroja, Catalano, Fuller, Dafaille, Frei Otto, entre otros. Este estudio ha constatado que estos ancestros deben de ser expandidos y precisados.

Resulta imperativo mencionar el trabajo pionero y temprano de Shukhov dentro de los sistemas nervados y de mallas de doble curvatura en metal; la importante aportación de Guastavino respecto a las bóvedas tabicadas; el asombroso trabajo sobre geodésicas que raramente reciben una correcta atribución a Bauersfeld; al inspirador trabajo de Candela respecto a las laminas de hormigón armado; y la sorprendente obra de Dieste respecto a la mampostería armada, entre otros notables ejemplos. Estas omisiones conllevan importantes repercusiones para la historia y la teoría de la arquitectura, ya que reposicionan y esclarecen ciertas confusiones que se han generalizado de manera preocupante en la actualidad.

Una especial mención se merece el trabajo de Shukhov, bastante reconocido dentro de Rusia, pero relativamente incipiente en el conocimiento arquitectónico mundial. A pesar de la innegable importancia, su obra ha sido omitida por los teóricos mas importantes del siglo pasado, ya sea por desconocimiento o por otros motivos, lo que resulta desconcertante y preocupante. Sin embargo, se ha constatado un renovado interés en la obra de Shukhov en la actualidad, particularmente relacionados a esfuerzos de mantenimiento y reconstrucción de estos proyectos en serio peligro de colapso.

Otro referente fundamental con respecto a las geodésicas, que suelen ser atribuidas a Fuller, pero que sin embargo se remontan a los años 20 por Bauersfeld, quien realiza varias estructuras geodésicas como observatorios planetarios.

Otras temáticas emergen relacionadas con la irrupción de los sistemas de prefabricación en la arquitectura, como facilitadores de inexploradas formas.

Con respecto a las numerosas omisiones de obras notables en la historia de la arquitectura del ultimo siglo que ha detectado esta tesis, cabe destacar el prologo que Kenneth Frampton hace en su libro "Historia Crítica de La Arquitectura Moderna", donde reconoce que la historia de la arquitectura

ha estado caracterizada por cierto eurocentrismo, y por imperdonables omisiones.⁶² A este respecto, Giedion afirma que la historia de la arquitectura es permeable y dinámica, y por tanto, resulta pertinente una actitud continuamente atenta a rectificar y desvelar proyectos desconocidos y que permanecen indocumentados.

Finalmente, se podría argumentar que estos proyectos confrontan paradigmas siempre latentes en la historia de la arquitectura, reivindicando la innegable importancia de los aspectos constructivos, cuando algunos autores conciben la arquitectura como el "arte de construir" (Frampton), o argumentan que la construcción es el "inconsciente de la arquitectura" (Giedion). Este capítulo ha constatado que muchos de los autores reivindican el rol de la construcción: mientras que Dieste declara que "no puede haber Arquitectura sin Construcción" (Dieste)⁶³, Candela se consideraba por sobre todo un constructor. Sin lugar a dudas, los aspectos constructivos contribuyeron a la reconceptualización de la arquitectura durante el Siglo XX, basados en una praxis inquisitiva, alerta y atenta.

En el ámbito de la praxis arquitectónica, esta tesis propone que la forma construida en un conjunto de proyectos seleccionados aparece asociada a ciertas lógicas, las que han facilitado el proceso constructivo, y que resultaron decisivas en la implementación de estas propuestas. Estas lógicas responden a una búsqueda relacionada con avances en el conocimiento sobre la ciencia y la física de materiales que permiten su uso innovador, la incorporación de nuevos métodos de producción (ya sea de componentes o sistemas), y el uso de técnicas constructivas y de ensamblaje innovadoras (incluido el montaje y la correcta definición de detalles constructivos).

El conjunto de proyectos seleccionados en este estudio testifica que la innovación proviene de procesos que nacen desde la concepción misma de la arquitectura, donde los autores de estos proyectos tuvieron la necesidad de involucrar los avances de su tiempo de la tecnología, la ciencia, y las artes, como fuertes del diseño arquitectónico. Este periodo se presenta dentro de una experimentación generalizada, donde surgen nuevos materiales, nuevas tecnologías, nuevos sistemas productivos, una nueva cultura, todo ello enmarca un contexto fértil para la experimentación en el campo de la arquitectura y en la industria de la construcción. Dentro de este contexto de gran experimentación, la arquitectura se posiciona como un medio de experimentación donde se confronta la noción de métodos preestablecidos, y el proyecto pasa a ser una forma de exploración de ideas, especulación, testear y como amalgamador de conocimiento. Como tal, el proyecto también se expone vulnerable a los errores y fracasos que conlleva la experimentación, así como también puede proponer grandes aciertos.

Estas prácticas innovadoras requirieron de métodos, secuencias de trabajo, y protocolos particulares en su implementación, las que aparecen frecuentemente asociadas a un pensamiento basado en parámetros. Estos

62 Frampton, Kenneth. *Historia Crítica de la Arquitectura Moderna*. Barcelona : Gustavo Gili, 2009.

63 Mas Guindal, loc. cit.

medios de ejecución resultaron cruciales en la elección y la derivación de la forma arquitectónica, los que han sido estudiados en detalle.

3.3.6.2

RELEVANCIA DE LOS MATERIALES

Los asombrosos avances en el conocimiento detonaron del sentido de experimentación que guiaron gran parte de la libertad formal que se desarrolla durante el Siglo 20, con sobresalientes descubrimientos y referentes, representados por algunos de los proyectos seleccionados en esta tesis.

Si bien estos materiales ya habían sido utilizados con anterioridad, el conjunto de proyectos seleccionados presentan nuevas maneras de ser usados a escala arquitectónica, permitiendo una libertad formal antes inimaginable. También aparecen nuevos materiales y generan grandes interrogantes, al presentar insospechadas posibilidades que logran cuestionar los modelos preexistentes, y por ende provocan cierta inestabilidad a los principios ya aceptados como ciertos. El aporte de los nuevos materiales se basaba en los avances del conocimiento científico asociados a ellos, gracias a los cuales se descubren sorprendentes potencialidades relacionados con el entrecruzamiento de nuevos sistemas constructivos, formales, espaciales, y estructurales.

Las potencialidades del hormigón armado fueron exploradas por algunos ingenieros o arquitectos, quienes advierten la necesidad de usar una nueva aproximación al diseño estructural donde encontraron una libertad de formas previamente inexploradas. Los proyectos aparecen como gran experimentación como producto de la implementación de métodos precisos. El revolucionario uso del hormigón armado utilizado en la construcción de hangares en Orly, Freyssinet estudia métodos de ejecución a la vanguardia de las preocupaciones de su tiempo, y las formas descritas se han deducido de precisos medios elegidos, siendo este el objetivo principal de la investigación.⁶⁴

Pier Luigi Nervi fue uno de los primeros en vislumbrar las potencialidades de los nuevos materiales, los que requerirían nuevas aproximaciones al diseño estructural, y una mayor libertad en las formas, el uso mas amplio de esquemas estáticamente indeterminados, y el uso de las propiedades plásticas del hormigón, todo lo cual requería de una aproximación con una renovada frescura.⁶⁵

El legado de Felix Candela con respecto a los "Thin Concrete Shells" o las laminas de hormigón armado, constituye un importante paso hacia la

64 Freyssinet, loc.cit.

65 Nervi, Pier Luigi. *Structures*. Michigan : F.W. Dodge Corp., 1956.

conquista de una cierta libertad de las formas. Candela construye más de 800 cascarones, la mayoría de ellos aun en pie, en un contexto caracterizado por fuertes limitaciones, como la mano de obra poco calificada, la austera disponibilidad de recursos, severas limitantes tecnológicas, en un país con constantes seísmos. A menudo la obra de Candela ha sido considerada como "Arte Estructural" (Pepa Cassinello, 2010). Dentro de estas expresiones, Banham señala que Candela marco una época, al vislumbrar las potencialidades de las laminas de hormigón armado en abovedamientos, el cual relaciono con la geometría de estas curvas para obtener listones de madera y posibilitar su simple encofrado. Para Banham, este simple acto demuestra el poder de un listón de madera, convertido en paraboloides hiperbólicos en varias versiones, los que aparecen asociadas formalmente a las conocidas torres de refrigeración.⁶⁶

En cuanto al ladrillo, a pesar de sus magnificas capacidades de resistir a la compresión, la incapacidad de estas bóvedas tabicadas de resistir la tensión impulsan a Eladio Dieste a aprovechar el conocimiento desarrollado sobre las laminas de hormigón armado durante la época entre 1940-1960, para aplicarlo a la cerámica armada mediante la invención de la "cerámica armada", un sistema que permite tanto la compresión como la tracción al imbuir armaduras.⁶⁷

Completado el análisis de los tres sistemas, cabe destacar que esta investigación ha constatado el uso de sistemas híbridos que utilizan varios materiales a la vez. Por ejemplo, en los sistemas geodésicos, el proyecto de Zeiss I (1923) utiliza metal con una lamina en hormigón, o el Palacio de Deporte (Candela 1968) implementa una estructura en metal con superficies en madera.

3.3.6.3

MÉTODOS DE PRODUCCIÓN

El fenómeno de industrialización que afecta el Siglo XX, los métodos de producción demuestran ser uno de los parámetros más decisivos en la determinación de elementos constructivos del proyecto, donde los componentes pueden ser generados mediante sistemas de prefabricación existentes en el mercado, o adaptados para el proyecto, o métodos especialmente creados para el proyecto. Estos métodos comienzan a ser utilizados extensamente en la construcción, al implementar ciertas estrategias como el uso

66 Banham, Reyner. *Age of the Masters : a Personal View of Modern Architecture*. London: The Architectural Press, 1975. P 48.

67 Alarcón, Óscar. *Estudio Paramétrico de Bóvedas Parabólicas de Cerámica Armada Mediante el Método del Análisis Límite*. Tesina de Master, UPC. 2014. Pp. 11.

de elementos estándar, o la prefabricación de partes, o la incorporación de protocolos de ensamblaje en línea, entre otras. Se observa una tendencia a generar partes que sean fácilmente producidas por métodos de prefabricación industrializados, cuya capacidad depende de la tecnología de las máquinas disponibles, los que determinarán los parámetros constructivos de sus partes (tamaño, materialidad). En otros casos, cuando no es posible encajar en un sistema preexistente, se crea un sistema personalizado que se ha creado para su implementación, como es el caso de Candela (varios proyectos), o Xenakis & LC (Pabellón Philip).

Se exploraron los siguientes sistemas de producción:

1. Estándar: El uso de elementos estándar o producidos por la industria;
2. Los elementos prefabricados se basan en procesos de producción de partes en una industria, los que son transportados a la obra donde se hace el montaje de estas partes. El objetivo de estos sistemas es evitar el uso de encofrados in situ, encargando a la industria la fabricación de formas complejas en sus talleres en entornos controlados y con maquinaria especializada, facilitando así su montaje y el ensamblaje de partes.⁶⁸
3. In situ: Esos sistemas permiten un alto grado de personalización e individualidad en las respuestas;

La incorporación de los sistemas de producción en masa incorpora estas técnicas y métodos de construcción en la arquitectura, inicia un profundo cambio en todas las etapas del proyecto, que ofrecen ventajas como:

- Posibilita una mayor rapidez de ejecución de las partes fuera de la obra, minimizando el tiempo de erección en obra, resultando en una mayor velocidad en el tiempo de construcción;
- Minimizar el número de obreros durante la etapa de erección del proyecto;
- Reducir la relevancia de los factores climáticos durante la etapa de fabricación de sus partes, al efectuarse bajo ambientes controlados;
- Mayor precisión en la manufactura de los elementos y calidad de sus partes, que permiten asegurar una mejor calidad en las terminaciones,
- Reducción en el uso de material al optimizarse su uso;
- Mayor seguridad para los trabajadores al minimizarse el trabajo en obra;
- Permitir una mayor personalización de las partes;
- Reducción de costo total de la obra;

Estos procesos se relacionan estrechamente con ciertas lógicas basadas en parámetros, los que han facilitado el proceso constructivo al permitir la implementación de un pensamiento sistémico en un proceso de partes interrelacionadas. Estas estrategias se relacionan con técnicas y métodos de fabricación y el ensamblaje que facilitaron estos procesos, las que pueden describirse como:

- La posibilidad de subdividir las formas en componentes más peque-

ños implica establecer un sistema de relaciones entre la parte con un todo, se presenta como un método fundamental en la implementación de las estrategias constructivas entre los proyectos estudiados. Esto se ha denominado comúnmente “parametrizar” o “discretizar” la forma. La definición de partes o componentes fácilmente deducibles (ya sea por descripción matemática o geométrica), y que pueden exhibir grados de variabilidad, ofreciendo la capacidad de convertirse en elementos constructivos independientes, pero al mismo tiempo interrelacionados;

- La producción de partes variables ofrece la posibilidad de utilizar elementos estándar y repetitivos; o de partes variables utilizando sistemas de prefabricación industrializados; o bien de un sistema de fabricación propios.
- Las relaciones entre las partes del sistema se realiza mediante conexiones, nodos y enlaces o uniones mediante piezas y conectores. La relación de componentes pueden facilitar/reducir/minimizar el montaje; o pueden utilizar uniones rígidas in-situ que busca reducir al mínimo el uso de concreto y la mano de obra; o pueden utilizar sistemas monolíticos cuyos encofrados no requieren elementos secundarios.

La importancia de la economía de recursos en la arquitectura había sido enfatizado por Vitruvio, quien se refiere a la economía como la administración de materiales y de la obra, con un balance de costo y sentido común en la construcción del proyecto.⁶⁹ Uno de los aspectos más determinantes y recurrentes para el desarrollo de nuevos sistemas constructivos basados en la innovación consistió en promover una economía de recursos. En los proyectos estudiados, esta economía se expresa en varios aspectos: intentando utilizar la mínima cantidad de materiales, minimizando la labor manual; utilizando una mano de obra de poca calificación, maximizando la prefabricación de elementos, optimizando el uso de encofrados, reduciendo el tiempo de fabricación y de erección del proyecto, fomentando la rapidez de montaje al proponer modelos híbridos compuestos de elementos prefabricados (componentes), los que requieren una secuencia de ensamblaje precisa, y de terminaciones óptimas.

Con respecto a la mano de obra, un hecho particular se desarrolla a mediados de siglo, donde la construcción aparece definida con una urgencia y precariedad en la formación de mano de obra, los cuales ejercieron un impacto decisivo en los métodos de construcción a principios y mediados del Siglo XX. Esta falta de calificación obedece a un contexto social de 2 guerras mundiales que golpearon a gran parte de Europa, Rusia, y Japón, y de intensas guerras civiles en países como España e Italia, en lugares que deben de reconstruirse y requieren de soluciones efectivas. Este fenómeno ha sido abordado por varios autores, como por ejemplo Pier Luigi Nervi, quien desarrolla su obra a finales de 1940-50, tras una devastadora guerra que había sumido a Italia en una profunda crisis social, y para frenar el paro se implementan programas donde los obreros sin formación pueden trabajar en obras muy sencillas, económicas y rápidas. Pare ello, Nervi utiliza el ferrocemento de partes prefabricadas, con el objetivo de reducir el uso de mano de obra de alta calificación, y al mismo tiempo asegura la calidad

69 Vitruvius, op.cit., P 16.

de la obra.⁷⁰

Estos episodios enmarcaron una serie de manifestaciones y descubrimientos, como el desarrollo del ferrocemento desarrollado por Nervi en Italia, o las estructuras laminares de Torroja. En diferentes contextos, Candela en México, Dieste en Uruguay, o Fuller en USA se ven enfrentados a similares preocupaciones. Esta situación reclaman la creatividad y visión estratégica de sus creadores. ¿Cómo construir estructuras que cubrieran grandes luces con el mínimo de materiales y con mano de obra sin mayor capacitación? Las respuestas resultaron sorprendentes y en algunas ocasiones simplemente magníficas. Candela aseguraba que las láminas de hormigón podían producirse más baratas que cualquier otro material en México.⁷¹ A su vez, Fuller promulga su famosa frase “¿Cuánto pesa su edificio?”, y sus esfuerzos de implementar estructuras livianas y de rápido ensamblaje. Mientras que Dieste declara que sus estructuras nacen de la economía de recursos en un contexto de fuertes limitaciones tecnológicas, mano de obra sin calificación, donde el ladrillo aparece como el elemento más versátil y al alcance.

Aparece una correspondencia indisoluble entre geometría y los métodos constructivos. En el caso del uso de elementos estándar en metal, se exploran geometrías afines con estos elementos, como las superficies regladas. Las geodesicas favorecen el uso de pequeñas piezas metálicas estándar de variados largos que se ensamblan para generar una estructura de gran resistencia, evitando el uso de encofrados. El hormigón armado, por ser un material que se vierte en obra, y por tanto fuertemente dependiente del precio sus encofrados, para lo cual se usan superficies regladas (como los paraboloides hiperbólicos o los sistemas de generatrices rectas) conformadas por elementos rectos, como tablas de madera.⁷²

Estos aspectos han resultado críticos en la exploración de las capacidades del material, o bajo aspectos de estricta economía para minimizar el uso de materiales; o para optimizar los encofrados mediante el uso de superficies regladas fácilmente construidas mediante elementos rectos, o para facilitar los sistemas de producción y manufactura de cada una de sus partes en partes estandarizadas.

70 Pace, Sergio. *Pier Luigi Nervi y los otros: arquitectura e ingeniería en Italia después de la II Guerra Mundial* delivered at COAC conference. [Apuntes de la autora]. June 2013.

71 Felix Candela. The Harvard Crimson. 1961. [viewed 29 October 2015]. Available from: <http://www.thecrimson.com/article/1961/11/17/felix-candela-pthe-norton-lecturer-for/>.

72 Serrablo, op.cit., P. 22.

EL DETALLE , SEMILLA DEL SISTEMA

Este capítulo ha comprobado que la estrategia constructiva se basaba en establecer sistemas interrelacionados de componentes, logrando proyectos entendidos como un ensamblaje de partes. Arquitectos e ingenieros hacen uso de la forma parametrizada para establecer este sistema de correspondencia entre las partes y el todo, donde surgen ensamblajes basados en la premisa básica de garantizar la continuidad constructiva, geométrica y estructural de todos sus elementos.

Los sistemas parametrizados establecen estrechas relaciones entre sus partes, los puntos de conexión y las fijaciones, los que deben garantizar la continuidad y rigidez del sistema. Los métodos utilizados en el conjunto de proyecto seleccionados aparecen subordinados a una estricta secuencia de interdependencia entre sus partes, de manera que el detalle constructivo, o el nodo, se podría presentar como la semilla del diseño paramétrico, constituyéndose tal vez uno de los elementos más críticos dentro del proceso constructivo y arquitectónico. La importancia del detalle radica en su condición de “parámetro base”, que la definición de su capacidad de adaptación a condiciones cambiantes (rangos y constreñimientos) se propaga dentro de un sistema. El aspecto más importante dentro de estas estrategias es que incluyen al detalle como parte fundamental del sistema propuesto, donde cada cambio de la totalidad tiene una repercusión a nivel de nodo o conexión. El detalle constructivo se ha establecido entonces, como una especie de amalgamador y expresión más notable del conocimiento, constituyéndose innegablemente en uno de los fundamentos del proyecto, porque se posiciona como el punto de síntesis de materialidad, sistema constructivo, estructura y forma, proporcionando las claves del construir.

Se podría definir el detalle compuesto por modulo, nodo, y fijaciones. El nodo es el protagonista de las articulaciones entre las partes, el que contiene la inteligencia del sistema, y la capacidad de adaptación de componentes; se deben estudiar las múltiples condiciones y esfuerzos a las cuales el modulo es sometido a lo largo del proyecto. Las relaciones dinámicas enlazan los distintos componentes de un conjunto, que se rige por criterios específicos, donde la modificación de cada componente es capaz de generar significativos cambios morfológicos. Los sistemas pueden ser diseñados con inteligencia integrada que permite la adaptación y la reconfiguración, en respuesta a los parámetros específicos. La importancia de esta lógica se basa en un pensamiento de sistemas basado en procesos, de su correlación y capacidad de adaptación a situaciones específicas, y de responder a las fuerzas activas. Los miembros son los elementos constituy-

entes del sistema, constituido por elementos o entidades de condiciones cambiantes del módulo y de sus conexiones, y diseñar de acuerdo a estas condicionantes cambiantes. Las fijaciones son los sistemas de sujeción, las que aseguran la continuidad de las conexiones. A menudo se han utilizado remaches, soldaduras, etc. Esta noción de entrelazamiento entre los elementos y las fuerzas que operan en un sistema altamente dinámico resulta primordial, dentro de un sistema paramétrico de diseño.

El capítulo anterior referente a forma estructural permitió afirmar que, en la mayoría de los proyectos seleccionados en este estudio, se observa un alejamiento del uso de elementos superfluos y redundantes, acusándose una economía de la forma y la estructura, al implementar formas resistentes. La correspondencia entre forma y estructura se presenta como indisoluble, la cual aparece con una rotunda e innegable fuerza en la mayoría de los proyectos seleccionados. Este importante cambio afecta no solo sus lógicas generativas, sino que también su proceso de diseño y construcción.

La simbiosis entre los distintos elementos del proyecto, como la forma, estructura, envolvente, y su materialidad, revela la necesidad de un enfoque integral del proyecto, como resultado de las relaciones íntimas de la correspondencia, que en última instancia se refiere a una concepción sintética de la arquitectura. Los sistemas constructivos estudiados significan que los elementos tradicionales (jácenas /vigas, columnas, muros, techos) se disuelven en un todo proporcionado por una forma geométrica que define una envolvente y la estructura, que asume todas estas funciones a la vez. La riqueza y el interés que despliegan estas formas hace innecesaria cualquier decoración u ornamento, porque la forma es a su vez estructura, ornamento, envolvente, y espacio.

Se concluye que la exploración de nuevas formas ha estado íntimamente asociada a importantes consideraciones constructivas, las que incluyen aspectos de materialidad, sistemas de producción de sus partes, y de la resolución de detalles constructivos.

Este capítulo ha revelado que ciertas estrategias constructivas resultaron críticas en la implementación de los proyectos estudiados, y se manifestaron como un fenómeno recurrente, aunque muchas veces sin una directa relación entre sus autores. Fue tal su relevancia, que muchas veces constituyen los parámetros más importantes del proyecto. En este sentido, es posible afirmar que fue precisamente en la praxis constructiva donde se encuentra la fuerza para implementar los métodos radicales, convirtiéndose en el detonante del cambio en el pensar que proclamaba Banham.

La fundamental importancia que tuvieron los procesos constructivos en los proyectos estudiados revelan que la aparición de nuevas prácticas constructivas experimentan un desarrollo y preponderancia inusitadas durante el Siglo 20, a tal punto de llegar a ser un detonante y también un valioso generador de conocimiento.

CHAPTER 4



CONCLUSIONS



ABSTRACT

The recent emergence of various computational design tools based on parametric techniques has drastically impacted architectural practice, facilitating the development of a multitude of highly suggestive freeform projects. Simply put, these techniques enable the design of element behavior by linking them with changeable dimensions, resulting in the formulation of complex geometries.

The apparent lack of concepts and references to support this methodology has resulted in mixed reactions within the discipline. To that end, many definitions are appearing to clarify such terms as parametrics, parametricism or parametric design, and even parametric architecture.

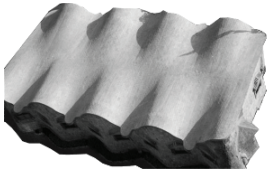
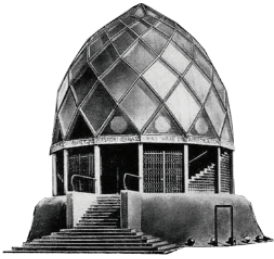
However, the proliferation of innovative forms was present throughout the 20th century, prior to the introduction of computation, with several architects and engineers formulating parametric concepts and projects. These remarkable references still remain widely unknown in the discipline, and their study allows the extraction of important concepts and lessons.

The thesis provides a comparative analysis of almost fifty unique paradigmatic projects built before the use of digital tools, which were reconstructed using parametric software, to unveil their generative logics and to extract their main parameters. Multiple associations between these projects were traced, allowing for the observation of relationships among innovative research agendas, and the positioning of current manifestations within larger historical developments.

This chapter confirms that parametric design it's not just a product of digital intelligence, but an important "logic" found persistently within the history of architecture. Finally, in light of the new findings, a redefinition for the term "parametrics" is proposed, opening multiple and expansive possibilities for their application into architecture.

Keywords. Parametric Design; Digital Tools, Design Methodology.

Note: Fragments of this chapter were published in: M. A. Schnabel and J-Y Tsou (eds.), *Cutting Edge in Architectural Science: Proceedings of the 47th International Conference of the Architectural Science Association*. 2013, pp. 147–156.



Architecture's progression into the digital age is fundamentally changing contemporary practice, largely due to the fast development of powerful digital tools. Computer aided modeling softwares, commonly known as Building Information Modeling (BIM), have reached unprecedented relevance within both academic and practicing architectural sectors. Usually based on parametric design, these modeling tools have produced a multitude of highly suggestive freeform projects that have been observed as banal products of digital intelligence (Meredith 2008)¹, highly superficial (Leach 2010), representative of a mature style (Schumacher 2008), and even as changing the basis of architectural practice. These differing positions coexist on a spectrum ranging from strong support to harsh criticism, creating concern and widespread confusion amongst academics and practicing architects due to the ambiguity and generalization of their underpinning principles. The consequences of these manifestations are several: an apparently increasing banal architectural practice, a systematic loss of coherence within design processes, and an alarming ignorance on how they are positioned within a larger context of architectural knowledge.

The key questions raised by this phenomenon are also several: What is parametric design? Can it be found in projects before computation, or is it simply a product of digital intelligence? Why is it preferable to traditional design methods? How can it influence contemporary architectural production? And what is the potential that these strategies offer for the 21st Century?.

This phenomenon also presents notable difficulties. First, a general confusion related to theoretical definitions currently existing around parametric design. Second, the unknown practices existing in other disciplines that could help clarify and amplify some concepts associated to these practices. Third, the lack of architectural references that inserts these practices within a broader architectural discourse. Fourth, the particular methodologies associated with parametric design are not evident. Thus, the identification of various project associations could unveil fundamental relationships and establish sequences of concepts, authors, and methodologies.

To address some of these questions, this research investigated the emergence of parametric design during the 20th Century before the use of computation, when remarkable efforts were made to implement forms previously unexplored at the architectural scale.

4.2 Towards a definition

In order to construct a relevant theoretical discourse, this research questions some of the superficial and misinformed opinions that currently abound within architectural-digital production. In regards to the topic of this thesis, some of the most relevant definitions around parametrics related to architecture today were reviewed.

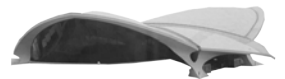
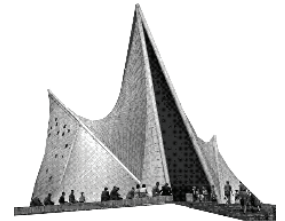
Fig. 4-1, 4-2 : Projects identified by relevant historians (Banham, Giedion, Frampton) during the Modern Movement.

1 Meredith, Michael. *Never Enough : transform, repeat and nausea*. In: Sakamoto, Tomoko; Ferré, Albert. *From Control to Design : Parametric Algorithmic Architecture*. Barcelona, New York: Actar-D, 2008. Pp. 6-9.

This research categorically clarifies a few important considerations:

First, despite the fact that most people associate parametrics with computational design, this research has verified that term was widely used and implemented before the use of computation. In fact, the first attempt to define the terms appears as early as 1940, when Pier Luigi Moretti identifies parametric or cross-disciplinary architecture as a “discipline that tends to introduce the phenomena of architecture and urbanism into the root of contemporary - and particularly scientific-thought structures”. Furthermore, Moretti defines parametric architecture as “a design method that follow parameters according to logical-mathematical, physical, electronic, biological, psychological, sociological, and economic.” (Moretti, 1940-2).² To explore this topic, Moretti establishes the research group “Institute for Operations Research and Applied Mathematics Urbanism” (IRMOU) in 1957. Their work was displayed at the 12th Triennial Exhibition in Milan at the Arts Palace from September-October 1960, titled “Exhibition of Parametric Architecture and of Mathematical and Operational Research in Town-Planning”.³ Thus, the legacy of the work of Moretti is the establishing of a “Research Group” intended to investigate the topic and its application to architecture and urban design. The group, composed of renewed scientists, developed some proposals with specific applications in architecture such as stadiums and theatres. However, this work remains vastly unknown.

Second, some relevant thinkers have identified parametrics as a logic deeply embedded within the history of architecture, coinciding with the findings of this research which confirm that parametric logics are manifested in projects throughout the 20th Century. Perhaps, for his profound disciplinary perspective, the most influential thinker in this group is Bernard Cache, who declares that “Parametric design and mechanics are not new in architecture: they were actually there from the very beginning of the written sources of our discipline. To understand this, we must return to classics such as works by Euclid, Plato, and Vitruvius. A renewed reading of those classics has the potential to bring contemporary architecture back into a historical tradition.” (Cache, 2012).⁴ An experienced digital fabricator and user of computation, Cache effectively proposes to go back in history to reframe contemporary paradigms that are faced by the discipline today. Similarly, Mark Burry states that parametrics is nothing new to architecture, and that “parametric models serve to constrain geometry to construction fabrication methods (...) and tie to the engineering analysis (materiality and structural load). The iterations of geometry are optimized and resolved to produced specific design parameters” (Burry and Burry, 2010). This canonical notion of parametrics was also confirmed by Javier Monedero,



2 Viati, Annalisa. *Un nuovo linguaggio per il pensiero architettonico: Ricerca operativa e architettura parametrica*. In: Moretti, Luigi; Reichlin, Bruno; Tedeschi, Letizia. *Luigi Moretti: Razionalismo e Trasgressività tra Barocco e Informale*. Milano: Mondadori Electa, 2010. P. 409.

3 Bucci, Federico; Mulazzani, Marco. *Luigi Moretti: Works and Writings*. DeConciliis, Marina (trans.). Princeton Architectural Press, 2002. P. 214.

4 *Instruments of Thought*. Cache, Bernard. Cornell University. [Conference delivered on October 4, 2012]. 2012 [viewed 29 October 2015]. Available from: http://events.cornell.edu/event/bernard_cache_lecture_instruments_of_thought

who formulates a wider definition by stating that “Parametric design is, in a sense, a rather restricted term; it implies the use of parameters to define a form when what is actually in play is the use of relations. I will use the term in a wide sense that covers what can be found in the literature under other headings such as relational modeling or variational design or constraint based design or other titles (...).”(Monedero, 2000).⁵

Third, the emergence of digital tools introduces several interpretations related to computation.

Some efforts to define parametrics in relation with contemporary software are widely understood. Neil Leach states that “The utilization of parametric modeling software (...) linking dimensions and parameters to geometry thereby allowing for the incremental adjustment of a part which then affects the whole assembly.” (Leach, 2009). Other definitions relate to modeling techniques, establishing that through the mastering of different skills than those required for non-parametric representations (Woodbury, R, Williamson, S, Beesley, P.: 2006), parametric modeling involves the critical recognition of key associative and relational elements in the early design process (Woodbury, 2010)⁶.

To finish this discussion, a highly controversial definition of “parametricism” was coined by Patrick Schumacher in 2008, when he declared it “a mature style rooted in digital animation techniques”, indicating that “style” had been defined as a mature research agenda (Schumacher, 2008)⁷. There are several problems with this definition. First, parametric design is rooted in architectural history and blossomed during the 20th Century, as demonstrated in this thesis. Second, style as a research agenda was extensively explored in various periods throughout the history of architecture, and what is particular about today’s developments is the explicit use of computation. Finally, the concurrent use of “ism” and “style” in this definition emphasizes the aesthetic qualities of architecture, whereas parametric logics have proven to be implemented across other realms, such as construction techniques, structural formulation, and mathematic definition.

This investigation allows for the formulation of a definition of parametrics as a design logic that has been present in various projects built throughout history. Parametric design is not only a product of digital intelligence. It is a significant logic found persistently within the history of architecture. Therefore, parameter based design surpasses notions of style, because it is a concept and an approach that transcends time, technology, and culture.

Parametrics can be defined as a dynamic design method that allows the establishing of element behaviors, based on parameters through powerful

5 Monedero, Javier. Parametric Design: a Review and some Experiences. In: *Automation in Construction*, no. 9, 2000. P. 369-377.

6 Woodbury, Robert. *Elements of Parametric Design*, London: Routledge, 2010. pp. 1-5.

7 Schumacher, Patrik. *Parametricism as Style : Parametricist Manifesto*. In: Darkside Club, 11th. Venice Architecture Biennale, 2008. Pp. 1–5.

relational links to changing dimensions, which propagate into larger assemblies (Fig. 4-1). This system has been widely implemented in computer aided design, exemplified by the organization of a set of variables (parameters) which are feeding a statement (an algorithmic equation), and are linked to a resulting geometry.

Parametric deployment at the architectural scale requires several considerations, including mathematical, engineering, and construction. A mathematical description must be formulated for its geometry; physics and structural engineering must prove the resistance; and construction methods related to materiality, fabrication techniques, and assembly methods must be contemplated.

4.3. Establishing References

Several architects and engineers formulated parametric concepts without the use of computation during the 20th century, inspired by the spirit of a new century that offered novel systems of production, unexplored materials, pioneering structural models, and distinctive construction practices. But despite their pivotal contributions and innovations, their legacy is currently absent from theoretical discourses and architectural practice, which lacks a larger framework of references, narratives, history, and forces (Meredith 2008). Not only does the search for exemplary solutions reveal such references for contemporary academia and practicing architects, but it also rescues a body of knowledge that still remains unknown to a vast architectural community.

This study identified relevant projects that used parametric logics during the 20th century, compiling over 100 exemplary works from 1890 until today. After careful consideration, it has been evidenced that the interest and quality of architectural production during the pre-digital period (1880-1980) was substantially relevant for architectural knowledge, just as it has been for the development of this thesis. This relevance has been previously identified by important architectural critics (Banham ⁸, Giedion ⁹, Frampton ¹⁰), who acknowledged the value of some of these projects, and attributed them to "Great Masters" (Fig.4-1, 4-2).

The investigation covers 90-year span, and close to 50 projects which demonstrate that these logics appeared with fluctuating intensity during the 20th century (Fig.4-3).

The group of projects selected for the analysis had to comply with strict criteria. They had to be constructed and host an architectural program. They had to be generated through a clear strategy derived from precise

8 Banham, Reyner. *Age of the Masters: a Personal View of Modern Architecture*. London: The Architectural Press, 1975.

9 Giedion, Siegfried. *Espacio, Tiempo y Arquitectura : el Futuro de Una Nueva Tradición*. 5a. Ed. Madrid: Dossat, 1978.

10 Frampton, Kenneth. *Historia Crítica de la Arquitectura Moderna*. Barcelona : Gustavo Gili, 2009.

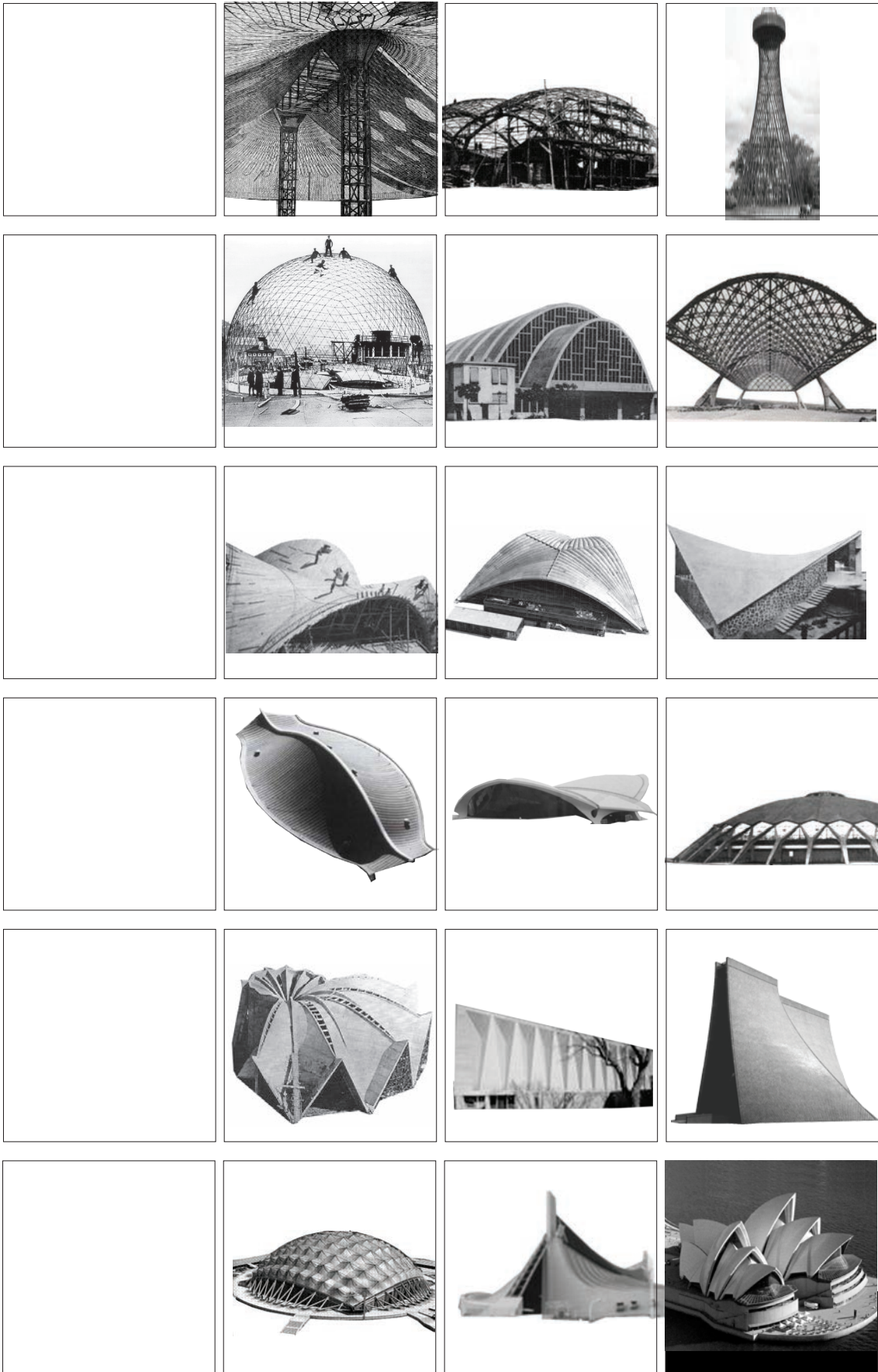


Fig. 4-3: Selected projects with parametric logics constructed between 1890-1980.

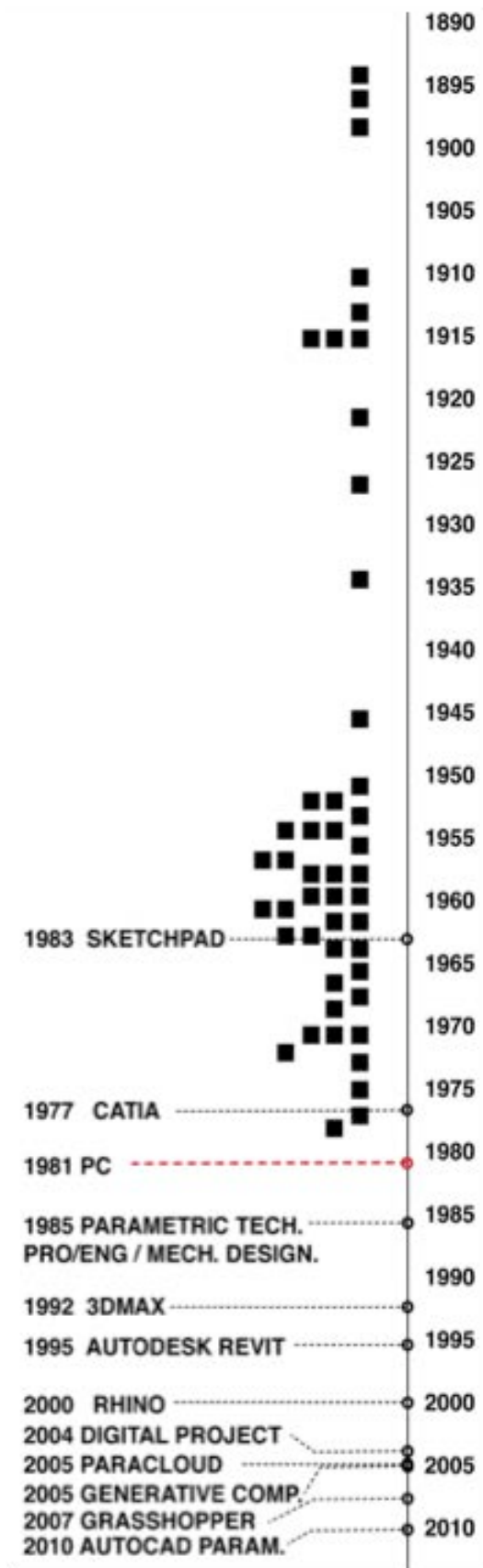


Fig. 4-4: Selected projects generated with parametric logics during the 20th. Century, confronted to the emergence of parametric software.

parameters throughout their conception, design and construction. Their morphology was defined by a surface that was at the same time the exterior envelope and the structural system. They had to present a clearly identifiable base module propagated into a larger assembly, exhibiting dimensional and geometrical variations. Finally, the existence of members and connectors with changing conditions encompassing a parametric system was also needed.

The timeline of the appearance of these projects, prior to the widespread use of digital tools from 1890-1980 (Fig 4-4), immediately reveals a new set of problems: What are the parametric logics used in architectural production before the advent of computation? And why, how, and where were these logics implemented?

The examples selected reveal that parametric design strategies during the 20th century have played a role in the formulation of previously unexplored architectural projects, structural systems, and construction methods. Furthermore, it was discovered that some of the selected projects represent pivotal examples within architectural history. Radically innovative solutions (first of their kind, worldwide) appear in about 12% of the studied projects, such as the first tensile steel gridshell (Shukhov, 1895), first double curvature lattice steel shell (Shukhov 1897), first hyperboloid steel structure (Shukhov 1896), first Thin Shell geodesic dome (Bauersfeld 1922-3), the Thinnest Shell Structure (Candela 1950's), and the first long span brick structure (Dieste 1960), among others (Fig. 4-5). Sadly, these crucial contributions are rarely acknowledged as references within current academic and professional research.

Driven by a strong spirit of innovation, a group of architects and engineers often called the "Master Builders" explored pioneering forms, materials, construction deployment and modeling techniques. These logics were pursued by relevant figures such as Shukhov, Gaudi, Torroja, Nervi, Fuller, Candela, Dieste, Otto, Tange, and Isler, and others (Fig.4-6). Furthermore, the frequent professional or academic collaborations between several of these architects and engineers revealed that the use of these logics was part of a larger body of knowledge. These master builders were capable of creating integrated networks to concentrate common interests and pursuits,

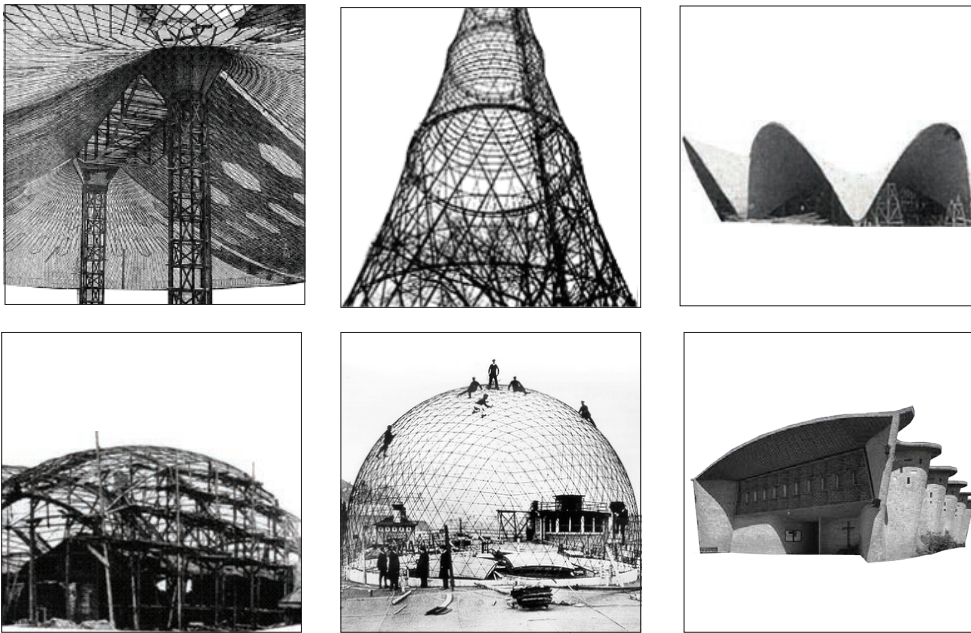


Fig. 4-5: Selected projects with innovative solutions: 1) Shukhov 1895, 2) Shukhov 1897, 3) Shukhov 1896, 4) Bauersfeld 1922-3, 5) Candela 1950's, 6) Dieste 1960.

surpassing geographical distance and disciplinary boundaries between architects, engineers, scientists, manufacturers and constructors (Fig. 4-7).

The close relationship between architecture and engineering is therefore revealed, wherein several engineers appear as architects, and engineers act as lead designers in several projects, such as in the case of Shukhov, Candela, Fuller, and Otto: architects performing in the roles of engineering. It also testifies to the legacy of structural engineering for the development of architecture during last century, with notable contributions from Shukhov, Nervi, Dieste, Arup, Happold, and Isler.

The results of these collaborations allow for the drawing of the following conclusions: many authors shared continuous, long-lasting, fruitful and close professional activity in various capacities, including academic and scientific, as well as in projects or friendships. Knowledge was produced as a result of the extensive research and continuous interaction between the authors, maintained through varied and systematic exchange in the areas of media, academia and practice. Major achievements arise from these intersecting discourses and collaborations. The close activity and collaboration between authors is exemplified by the exchanges between Torroja & Candela, Torroja & Nervi, Candela & Otto, Fuller & Otto, Otto & Isler, Candela & Nervi & Fuller, Saarinen & Utzon. Also important to note is the absence of collaboration in the respective works of Shukhov, Taut, and Dieste, all of whom developed their work in apparent isolation, though this may be due to the fact that they explored different thematic areas, received influences from other sources¹¹, or were pioneers in their field.

Despite their importance, it is disturbing that these valuable academic, professional and scientific legacies have remained largely unknown to the discipline.

11 Serrablo, Vicente. (Personal Communication, 29 July 2015).

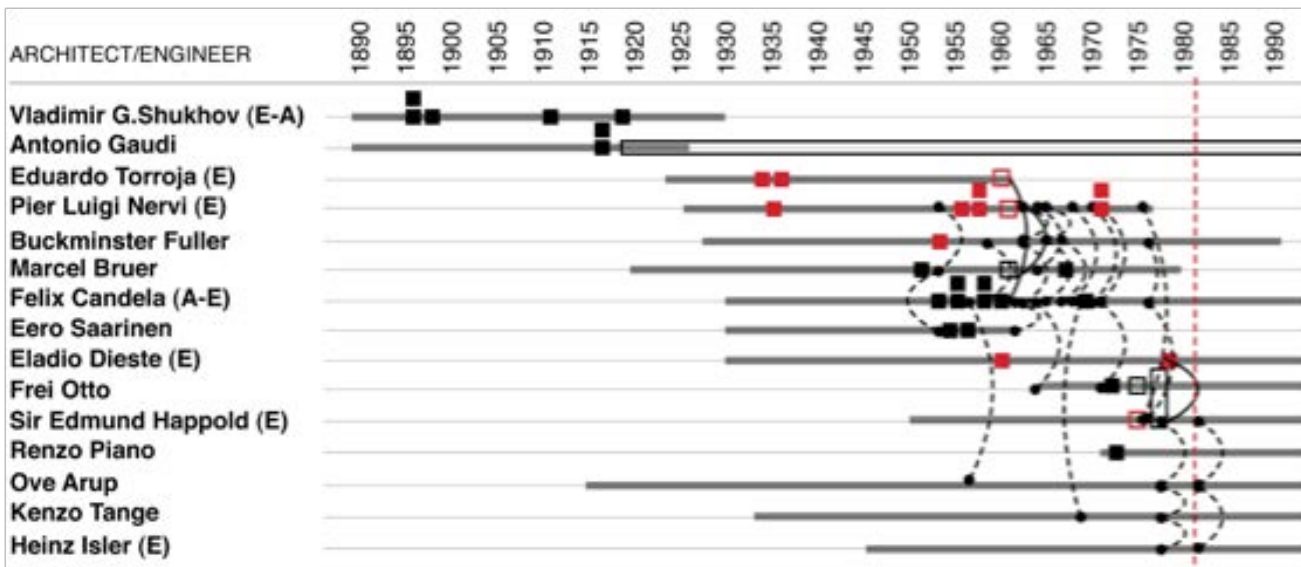


Fig. 4-6: Project authors (engineers noted with a letter E), with selected projects (squares), and additional collaborations (dashed lines).

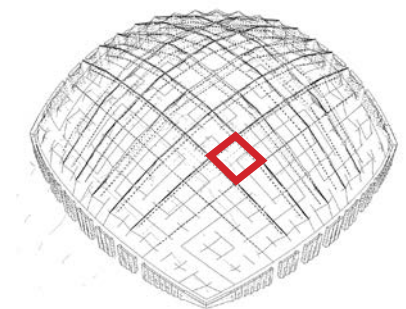
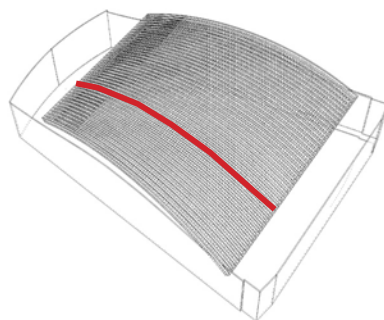
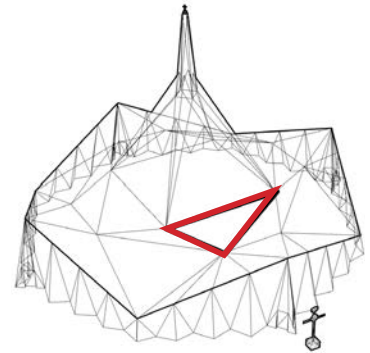
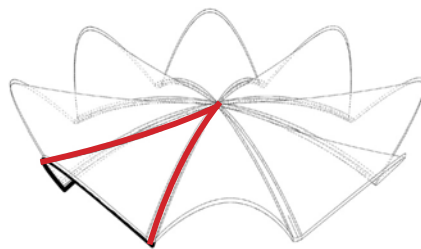
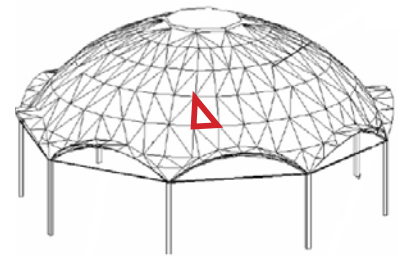
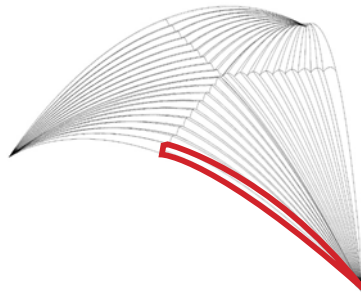
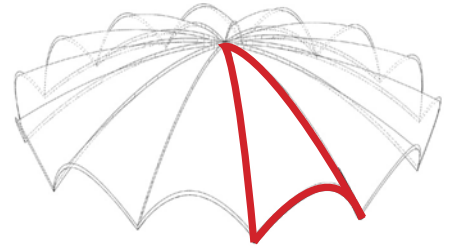
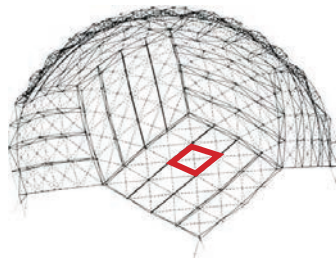
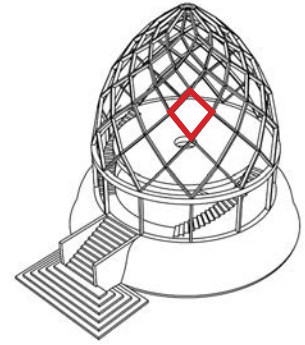
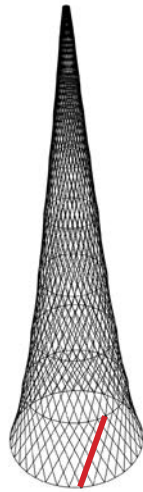
The conclusions extracted from this thesis reveal three periods that can be clearly distinguished during the last century in regards to the work of the form finders:

1) Early gestation period (1890-1920): Characterized by the emerging use of new materials, building systems and unexplored forms in architecture. In this initial period, it is possible to identify unique (and deeply relevant) cases of projects and architects or engineers working in isolation in a search for new materiality, construction systems and new production systems. The spirit of this period is reflected in the representative work of Shukhov, Freyssinet, and Torroja;

2) Development Period (1920-1960): Particularly interested in development, and characterized by rich architectural production, this period introduced a significant number of projects built through highly sophisticated practices, wherein relevant architects and engineers worked collaboratively to distribute and establish architectural knowledge. Representative works include Nervi, Candela, Fuller, and Saarinen;

3) Expansion Period (1960-1980): Characterized by an established and evident body of work, remarkably representative of the active development of collective knowledge around these practices. The spirit is reflected by Utzon, Nervi, Tange, Otto, and Isler.

During the final decades of last century, the gifted form finders ceased working or passed away. The only exception was Frei Otto, who continued to work in isolation, closely associated with the University of Stuttgart,



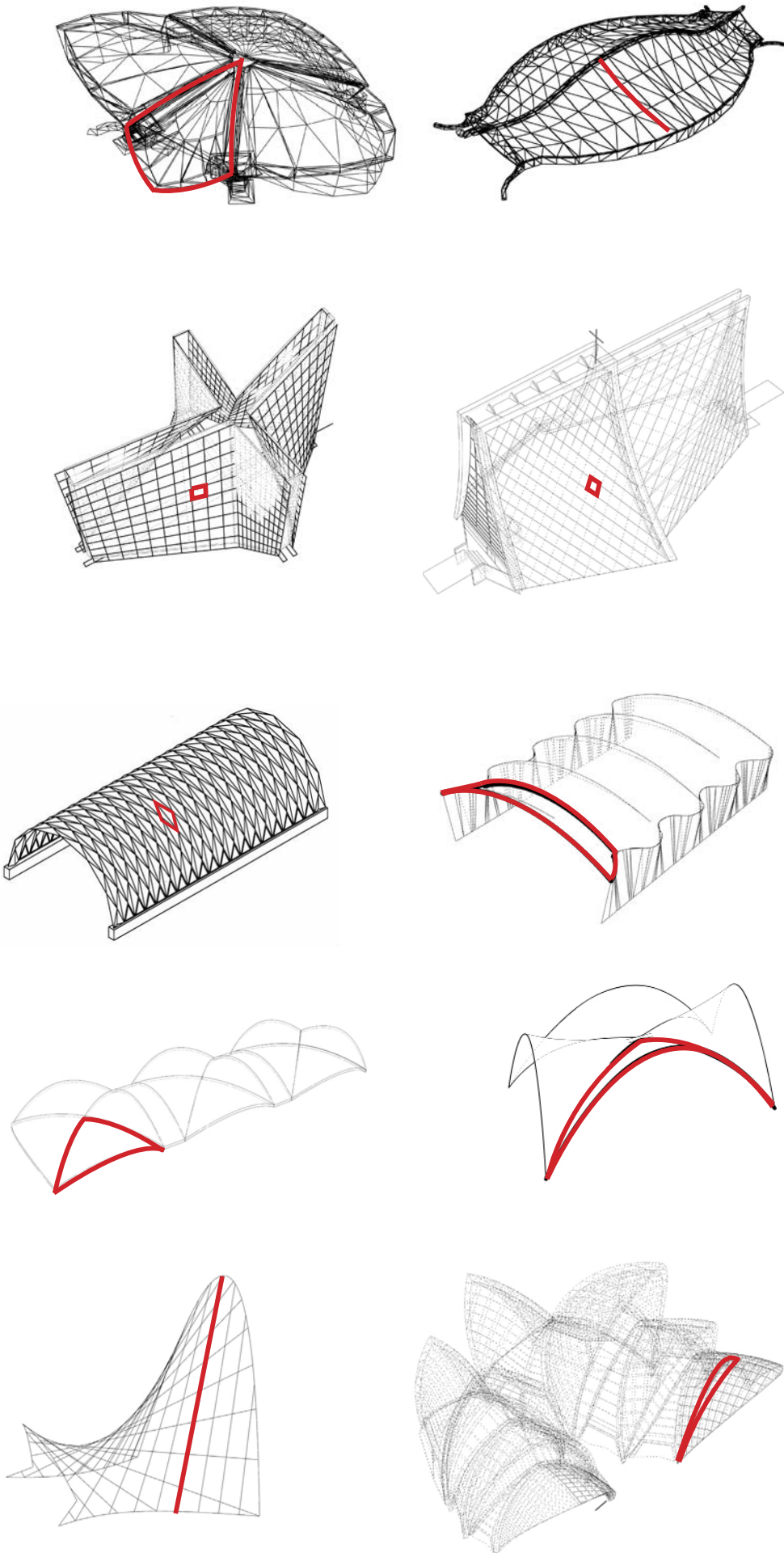
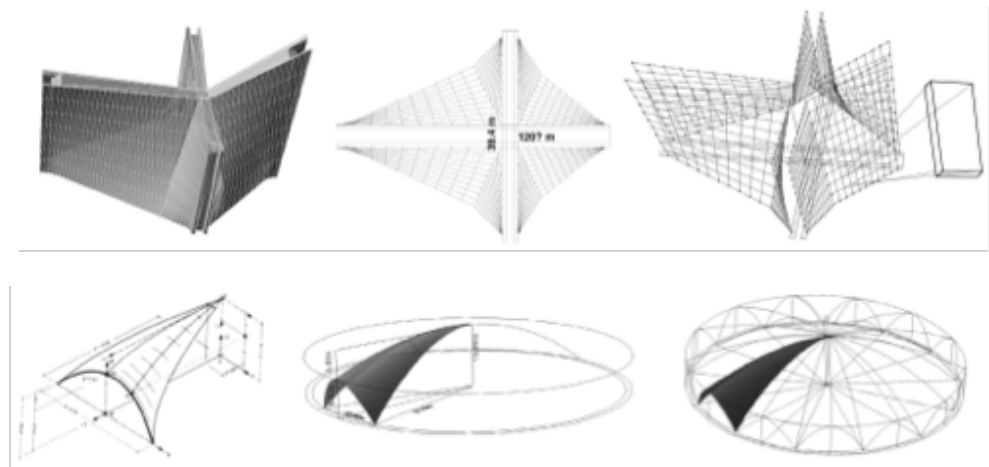


Fig. 4-8: Some of the selected projects built between 1890-1980, generated using parametric logics, showing part to whole relationship.

Fig. 4-9: Parametric Models showing 2 strategies (Whole to Part and Part to whole), featuring 2 projects: (1) Top: K. Tange 's St. Mary's Cathedral Church, Tokyo, (1963), and (2) Bottom: L. Simon & A. Morisseau's Royan Market (1955).



where he founded the prestigious Institute for Lightweight Structures in 1964.

Parametric Logics

Each selected project was digitally re-constructed using a parametric digital platform (Grasshopper for Rhino), a process that unveiled the existence of three important logics (Fig. 4-8):

- 1) **Mathematical Space:** Projects were defined first by selecting a specific geometry, deduced through a clear parametric mathematical formula;
- 2) **Adaptable Models:** Each project was usually translated into a study model;
- 3) **Construction Deployment:** A strategy was formulated considering materiality, production systems, components (members, nodes, and attachments), and sequence of assembly.

In order to detect how these logics were implemented, distinctive workflow strategies were used. These techniques included (1) Whole to part (the establishing an overall formal system to obtain the base parameter through a sequential and systematic subdivision of the surface), or (2) Part to whole (the defining of a base component and its proliferation throughout a geometric system) (Fig. 4-9).

The novel aspect of parametric design compared to other traditional design methods is the peculiar use of a strict rule system translated as a precise form making protocol, where parameters are formulated in advance and which have explicit characteristics. The formal bases of components and systems are fully disclosed as an integral part of an interrelated design process, intimately linking form to construction systems, materiality and structural performance.

Due to the fact that these characteristics are related to other disciplines such as mathematics, engineering, and material sciences, caution must be exercised in the implementation of these methodologies.

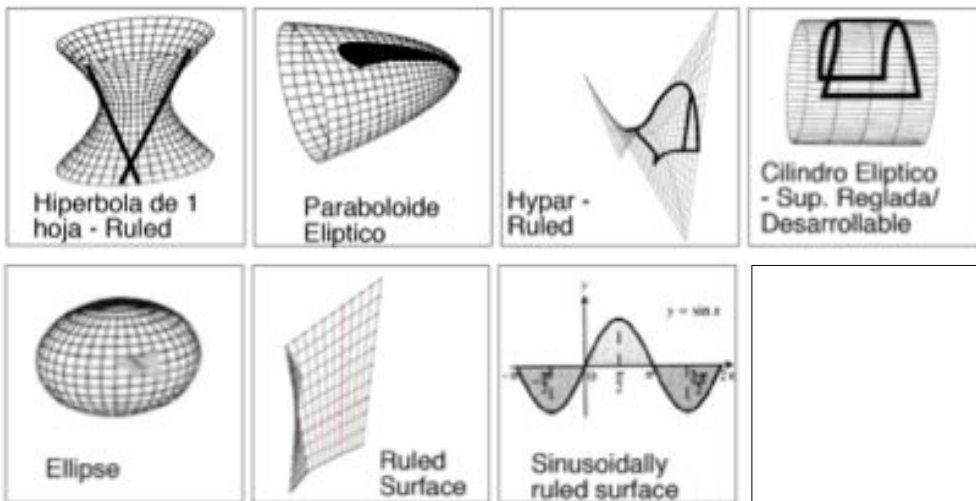


Fig. 4-10: Genealogy based on hosting geometry.

Mathematical Space

The form finders quickly discovered that through the act of curving or folding a planar surface, the resistance of the resulting form is dramatically increased. This simple observation had unprecedented consequences, leading to the common use of such surface manipulations (through curvature or folding) as a strategy for increased resistance of forms.

The encountering of form through the search for mathematical logics had introduced a fertile territory for experimentation. There are many explanations for this. First, mathematics had developed a variety of forms that could easily be defined through simple calculus. Second, these mathematical forms could be parameterized into smaller numerical elements, in a process called discretization. Third, many of these forms could be derived by linear elements, which made their implementation at architectural scale highly feasible. Finally, the curvatures obtained exhibited greater resistance and presented a precious opportunity for a more economic use of material.

This study confirmed that the first step required to correctly derive the form for the digital reconstruction of projects was the formulation of a mathematical description. The process started by identifying a geometrical hosting family, with its associated mathematical formula, and was tested using scripts that incorporated the dimensions of each project. It was immediately evident that some projects shared a base geometry (Fig. 4-10), and that some families were more commonly used. It is important to note that, despite the fact that the forms of many of these projects are considered to be non-Euclidian geometries, the totality of the calculations in this thesis were deduced through the use of formulas within the Euclidian system of calculus.

The most used hosting geometry strategies were hyperbolic paraboloids, ruled surfaces, and hyperbolas of 1 sheet, a trend that can be attributed to the inherent ability of these strategies to be constructed by straight lines, which greatly facilitated their construction. Also, geodesics appeared as

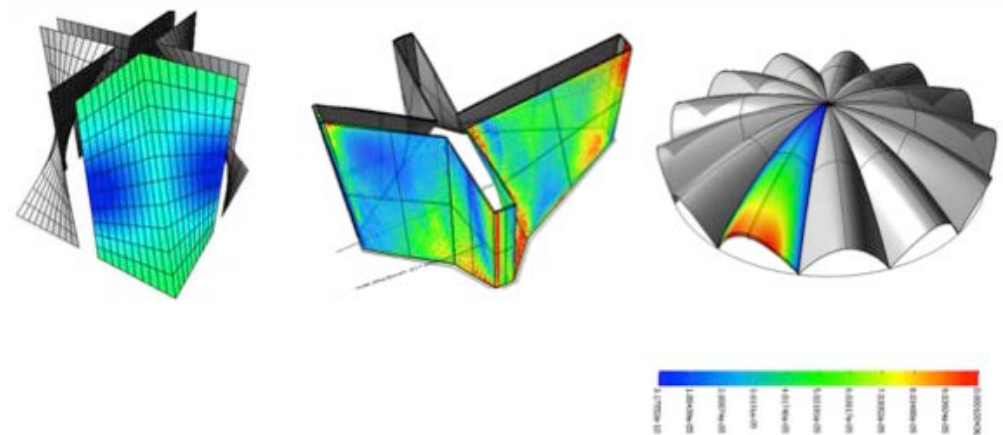


Fig. 4-11: Stress Test Model for three of the projects under study: (1) P.L. Nervi, Saint Mary's Cathedral, USA., 1971; (2) K. Tange St. Mary's Cathedral Church, Tokyo, 1963, and (3) L. Simon & A. Morisseau's Royan Market, France, 1955.

three-dimensional frames that were constructed by lines with the least amount of material. The use of ellipses, parabolic cylinders, elliptic paraboloids, folded planes, and catenaries was also present, but these strategies presented some challenges. Sinusoids, spirals, and Gaussian curves were used to a lesser degree.

These geometries were used because of the ease of their deduction through simple mathematical calculations that could be readily adjusted according to changing parameters. Furthermore, they were able to be simply constructed based on lines and points, and easily translated to construction elements, such as foamwork.

Mathematics provided a repertoire of forms to explore at the architectural scale, while also supplying a method for the definition and description of its parts. Most importantly, mathematics offered a solid tool to explore two specific underlying preoccupations of this era in history: the exploration of time and space.

Physical Modeling

The 20th century can be considered as a period in which physical modeling techniques flourished.

Josep Alberts started experimenting with the techniques of folding and curving in 1920, with students at the Bauhaus, exploring the capacities of these different forms to increase resistance and achieve a larger objective of reducing the overall use of material. His students developed physical models made with paper to create pieces of extraordinary beauty.

To support the pioneering nature of the formal solutions they proposed, the authors made extensive use of physical modeling strategies to test their forms under several conditions, implementing physical tests in over 36% of the selected projects.

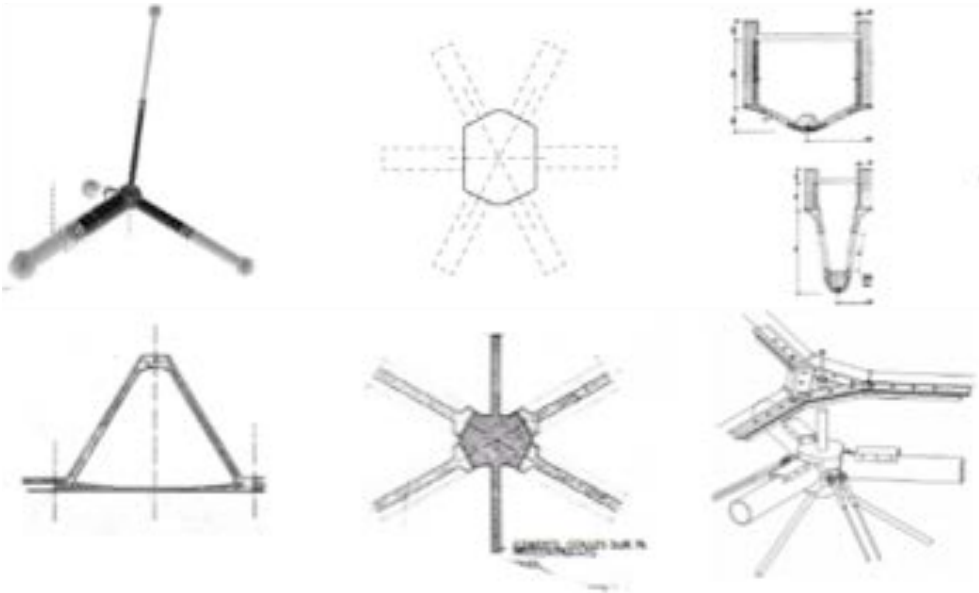


Fig. 4-12: Main logics for parametric design: (1) Base Component, (2) Hosting Geometry, and (3) Nodal connection.

While the particular emphasis of each model varied, they ranged from representation models to those of simulation, prototyping, generative and conceptual, and even digital models. As such, they attempted to achieve different objectives: the representation models facilitated the passage from the plane to the space; the simulation models allowed passage from the abstract to the performative, the prototyping models proposed passage from the space to the real; generative models facilitated the following of the laws of nature; digital models formulated a detailed geometric and mathematical description of shapes. The methodologies proposed by each type of modeling were used in a complementary manner in many cases, allowing the models to be cross-referenced with others for an exhaustive study of the project.

The form finders implemented physical test models that were already developed or proposed at an early point in history, revealing a surprising knowledge of the history of science and a remarkable desire of disciplinary continuity. Load test models were first proposed around 1665 by Galileo, resurfacing with Guastavino's thin shell brick structures in 1887, and later were used profusely by several form finders (Torroja, Nervi, Candela, Dieste, Xenakis-Le Corbusier, Utzon). The funicular polygon hanging model was implemented by Varignon in the 18th century, continued by Gaudi early in the 20th century, and again resurfaced with the models of Otto in the late 1900s. Mathematical models were available around 1872, and were continued by Gaudi, Xenakis-Le Corbusier, and Candela.

Attempts to insert their work as hallmarks, in the search for new methods and protocols for architecture, were made evident on several occasions. In some cases, it is revealed that these methods were implemented by the authors as a design, administration, logistic, and construction methodology, and were applied across several projects such as the "Nervi System", the Candela method, or the form finding techniques explored by Otto and Isler.










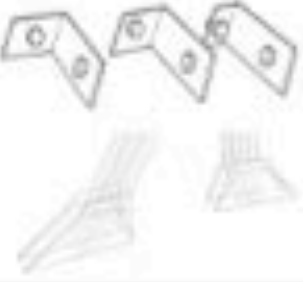


PROJECT			
MATH	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + z = z$	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + z = z$
GEOMETRY			
COMPONENT			
CONNECTOR			

Fig. 4-13: Main parametric logics for six selected projects: (1) Mathematical space defined by formula, (2) Model, and (3) Node connector.

$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} + z = 0$	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$

This study reveals the remarkable ancestries of some early applications of computation into architecture. Candela uses one of the first computers that existed in Mexico to perform calculations of his thin shells structure projects around 1960. Nervi performs numerous computational tests in the Polytechnic of Milan while associated with ISMES. In the late 1950s, Peter Rice uses an early Pegasus computer to resolve spherical roof profiles of the Sydney Opera House project through a detailed analysis, and to clearly define specific components during construction. Although mostly implemented for engineering purposes, these important precedents testify to the use of advanced methods to meet the preoccupations and challenges faced in implementing real projects. Surprisingly, they remain largely unknown by the discipline.

To prove the suitability of this design methodology, this study used digital modeling to verify the structural performance through simulations for each project, using a finite element analysis-FE (Scan & Solve Rhino Plugin), which considers geometry, material, restraints, and loads. This step facilitates an understanding of the behaviour of the proposed form and its components, with an emphasis on their dependence to material, restraint systems, and loads. It was proven that most of the projects performed successfully during these tests (Fig. 4-11), although further research could be conducted to optimize certain parameters, and it was made evident that these digital models served only as a reference and that a complete engineering analysis was necessary for the resolution of each project. This again testifies to a key relationship between architecture and engineering. However, the software notifies that "simulations are not intended to replace physical testing on prototypes, which is required to validate any design" (Scan & Solve 2013), thus corroborating the suitability of design methodologies used by the early pioneers of the 20th century, and supporting their suitability in the pursuit of current proposals, in both digital and analogue formats.

Perhaps one of the main legacies of the form finders was the extensive use of physical models, with the objective of fostering experimentation, invention, and exploration. This was unquestionably a newfound agenda within the architectural design process.

Physical models proved to be an influential part of design processes, becoming an active element with changeable inputs and outputs, especially when considering the proliferation of elements across a surface that is affected by changing forces, displacements, danger levels, and deformations.

In theoretical terms, it is evident that the introduction of various types of modeling techniques can be attributed doubly to the response to new challenges that have arisen from the incorporation of previously unexplored forms at the architectural scale, as well as the more general expansion of the concerns and focus of the architectural project.

Construction Assemblies

The influence of the architectural-constructive praxis displayed a profound

and extensive impact, both in theoretical and practical aspects. Many authors declared that architecture was “the art of building”, and that “there is no architecture without construction”, considering themselves firstly and mostly constructors, as in the cases of Candela and Dieste.

Indeed, knowledge of the important advancements in material and construction practices proved to be essential for the new applications, highlighted by the surfacing of seminal works related to the “Theory of shell structures”, “General Formulas for Membrane Stresses in Hyperbolic Paraboloidal Sheels” (Candela, 1960), and “Calculations for double curvature shells through finite equations” (Candela 1948), to name a few. Most of this knowledge was originated and acquired during the construction process.

The newly acquired knowledge about the capacities of materials transformed the way they were used and constructed, providing newly found freedom to experiment with forms. The dominant use of concrete reflected the advancements in techniques of reinforcing with pre- and post-stressing that were initiated by Freyssinet and Maillart, combined with prolific development of prefabrication, skillfully implemented in the work of Nervi and Utzon. The use of metal, which dominated during the first part of the century, was masterfully represented by the work of Shukhov. Though used in a reduced capacity, brick appeared at the end of the 19th century in the brilliant work of Guastavino, and reappeared in the similarly outstanding work of Dieste. Wood was only used in isolation.

Production systems employed in the processes of manufacturing construction parts also played a decisive role. The use of parts produced through industry standardization was crucial for implementing steel constructions, enabling the erection of remarkable lattice shells, truss systems, and geodesics. Prefabrication techniques became widely available, and the production of custom elements in concrete proved to be a highly efficient strategy to achieve economy of materials, quality of the elements, and fast onsite assembly. In some exceptional cases, customized manufacturing of prefabricated parts was implemented. Traditional onsite poured concrete was the dominant strategy, but its novelty lied in the implementation of innovative formwork techniques that were achieved through the use of doubly curved geometries. These ruled surfaces could be constructed from straight wooden planks moving along a guideline, allowing their easy construction in concrete, and a reduction in the use of material by enabling lesser thicknesses.

The resolution of construction details established some key relationships between members, nodes, supports and anchors (Fig. 4-12). This was a determining factor during the erection process, which had to be carefully formulated and planned, in order to provide precision, quality and speed of assembly. These details were defined in a parametric manner and played a key role in ensuring the relationship between parts and whole, accommodating dimensional fluctuations, and ensuring the integrity of the entire project (Fig. 4-13).

The construction processes were characterized by widespread experimen-

tation, due to the fact that new materials, technologies, production systems, and construction deployment strategies, provided fertile grounds for speculation. Despite that this tendency also made the projects vulnerable to errors, failures, and rectifications, the lessons learned became an intrinsic part of innovation.

Undeniably, the preponderant importance of construction processes in the selected projects clearly illustrates that their emergence, development and execution, became one of the main triggers and catalysts for the production of architectural knowledge.

It was precisely this knowledge that caused the appearance of the term "Master Builders"¹² of the 20th century.

Cultural Agenda

One of the underlying questions in this thesis is what has motivated the innovation of processes that lead to the production new built forms. It is theorized that the pursuit of new forms was strongly associated with an idea or a concept of society and with prevailing cultural paradigms, where projects were seeking to represent the society of the future, progress or technical advancement. Indeed, there are projects that fulfilled this social agenda, becoming cultural symbols or representative models for a future society.

Projects selected in this investigation clearly reflect such social agendas, demonstrating intentions toward new proposals and progress of society (Shukhov), new ways of living (Taut), ecology and manufacturing solutions (Fuller), symbols of permanence (Utzon), models of interactive technology (Xenakis-Le Corbusier); or even sensible responses to economy and local resources (Candela, Dieste and Nervi).

The work of Shukhov appears in Russia at the end of the 19th century, when the idea of a new society is invading the realms of arts and sciences. Shukhov's towers, masterfully represented in the famous photographs by Alexander Rodchenko in 1929 (Fig.4-14), and in the prints by Liubov Sergeevna Popova in 1921, became a symbol of this new society of Russian Constructivism that was characterized by technological advancements strongly mediated by the machine.

The Glass Pavilion (Taut, 1914) exhibits not only a remarkable expressive force, but also represents open and transparent space for living through the materialization of a dwelling in crystal. Often considered part of German Expressionism, the glass building symbolizes a rock that has been carved and polished to acquire various crystalline forms responding to light.¹³ It represents a physical manifestation of his original drawings for the Crystal Mountain, a massive landform building rising above the veg-

12 Banham, op.cit.

13 Taut, Bruno; Abalos, Iñaki (ed.), Abalos, M^a Dolores (trad.). *Escritos : 1919-1920*. Madrid : El Croquis, 1997. no. 6. Pp. 108-109. P 60.

etation.¹⁴ (Fig. 4-15-1)

“How heavy is your building?,” asked Fuller in 1978. His answer was in the form of geodesic domes, ranging from individual houses and military shelters to urban scale domes (Fig. 4-15-3, 4-15-4). The domes proposed the use of lightweight structures composed of standardized construction elements using the least amount of materials. Fuller’s work can be considered as depicting both dystopia and utopia: as visionary measures to protect society from an ecological disaster that consequents from the indiscriminate use of resources; and, proponents of an idealized society deeply immersed in ecology.

The Sydney Opera House became one of the most emblematic buildings of the 20th Century, and is considered “a compendium of many creative and innovative trends, both in terms of its architectural forms and in terms of its structural design.”¹⁵ While Utzon’s original concept was based on an arranging of sails around open terraces reminiscent of those from Greek temples, the building itself symbolizes a vision for the future of Australia.

Dieste, Nervi and Candela shared a similar set of problems. Candela moved to Mexico after the Spanish civil war, only to find challenging conditions in a context of limited resources, simple construction techniques, and labor without formal training (Fig. 4-15-2). For Dieste, limited resources had resulted from the pursuit of an economy of materials and increased efficiency from available means, and, through the implementing of reinforced masonry brick systems, he was able to masterfully resolve long spans.

Nervi finds a country in the mist of two world wars with high unemployment and unskilled labor, and his solution lied in prefabricated building components and systems which were easy to construct and fast to assemble.

The Philip Pavilion (Xenakis & Le Courbusier, 1958) proposed a vision of the future society as being facilitated by a mediated, interactive, intelligent, and fully immersed technological environment. As such, the architecture of the pavilion would support and encourage this interaction, and its complex shape was derived as the result of the sound projection along its surface (Fig. 4-15-5).

For Otto, the conditions of post-war Germany posed a need for the renewed symbolism of a democratic and optimistic society through a flagship project, the international event proposed a revolutionary design for the Olympic Stadium that sought to emulate the Alps mountain range, with impressive transparent structures which read more like topography than a building, realized with undeniable potency and technological precision.

14 Ibid, Pp. 108-109.

15 World Heritage List. Unesco, 2009. [viewed 29 October 2015]. Available from: http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=45692&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html



Fig. 4-14: Visions of society by artists using Shukhov's work.

(1) Alexander Rodchenko, Guard at the Shukhov Tower, 1929.

(2) Popova Liubov Sergeevna, 1921.

(3) Alexander Rodchenko, Shukhov Tower, 1929.



Fig. 4-15: Visions of society.

(1) Glass Pavilion. Sketch by Bruno Taut.

(2) Felix Candela, Construction workers.

(3) Buckminster Fuller and Shoji Sadao Dome Over Manhattan, 1960.

(5) Poème électronique composed by Edgard Varèse, written for the Philips Pavilion, 1958.

While the selected examples may appear with some degree of innocence or naivety, the intention of the architecture is greater when analyzed within a cultural context, representing new dreams, concepts and times, placing new emphasis on material, and reflecting a new reality for society and culture. From a distance, perhaps many of these attempts were unsuccessful and did not represent the spirit of their place and time, but their fiercely innovative spirit and their intention to provide answers to deep forces of social and cultural transformations are evident. An interesting aspect of these cases to remember is that they pursued such a wide range of objectives: from the symbolizing of new society and progress to the proposition of new ways of living; from seeking permanence and symbolism from an artistic and sculptural perspective to prophetically manifesting technological advances of the future information society; or, the modest and honest objective of finding appropriate materials and technologies for emerging countries. Perhaps their most significant legacy is that many of these projects seek to implement solutions tailored to their new reality, and reflect a spirit of innovation of its own time and culture.

Final Remarks

Reyner Banham argues that the master builders of the 20th century started a revolution. This revolution was initiated through the accumulation of a body of experience, to which the use of radical methods of tensioning the reinforcement in concrete shells, and the application of radical geometrical techniques, appeared as the last liberating gesture.¹⁶ For Banham, these master builders (such as Felix Candela), define the spirit of the epoch, because they could successfully combine the radical geometry of the hyperbolic paraboloid derived from straight lines, with the wooden planks used for the framing of concrete, resulting in highly resistant double curvature thin shell structures.

But the use of radical methods was not limited to the work of Candela.

This thesis confirmed that a group of distinguished architects and engineers employed a “similarity in methods and intentions”, and were slowly constructing a body of knowledge that had its roots at the beginning of the last century. This group of form finders, could successfully combine radical geometries, construction deployment, and modeling techniques.

The original impulse to explore these strategies was instantiated by rather traditional design goals, such as achieving long spans or increased height, seeking material economy (member size), reducing the number of different construction connectors (member length and vertex angles), and to find intelligent solutions of nodal connectors that were usually exposed as an important aesthetic element (Knippers 2011).

To achieve these goals, the use of parametric logics proved to be highly instrumental, because it helped to solve equations of interrelated factors, and provided a strict and coherent associativity between them.

16 Banham, op.cit.

Parametric logics require the implementation of a precise design methodology, where projects are formulated as an interrelated system composed of parts (parameters), descriptive critical relationships (associations), and linkage through adaptable connectors. The design process displays a precise rule-based strategy that must be carefully formulated in advance, and which implies a particular structure of thinking about design.

The effectiveness and flexibility provided by parametric logic identified it as a substantially more robust design methodology than traditional methods, because of its ability to change parameters in order to optimize to certain conditions. This is especially evident prior to the appearance of digital tools. Some of the advantages of using parametric logics over traditional design methods include:

- Radical geometries: These form-generative processes allow the use of algorithms that can be both generators and provokers of novel architectural forms (Hsu and Krawczyk, 2003)¹⁷, reclaiming mathematics as an important discipline for architects;
- Modeling techniques: Since the formal definition is based on algorithmic equations, the base model offers an opportunity to adjust parameters in response to certain considerations. Therefore, designers are able to follow a process of systematic optimization for a given form, through modeling tests and adaptation sequences, generating the most suitable solution according to several aspects (loads, winds, material, construction, etc).
- Construction deployment: the use of parametric definitions helps in defining the construction elements in an associative manner, allowing the continuous adaptation of material thickness, member sizes and angles, and nodal connectors. They also facilitate the production strategies, such as the use of standard elements, the prefabrication of parts, or the production of customized elements. Finally, they allow for the method of assembly to be embedded in the sequence of construction.

The three logics appear simultaneously in the studied works and are deeply interrelated. By using mathematics as a tool to create forms, by generating a series of testing models, and by challenging the production systems associated with their construction, these projects have transformed the theoretical and technical models prevalent of their time. The interconnected study of these projects has allowed for the construction of a body of knowledge and a set of prominent references with considerable relevance, and it is the hope of this thesis to make a small contribution in situating these innovations within a larger, more coherent and rigorous architectural knowledge.

It is difficult to ponder the effect of this legacy in current and future prac-

¹⁷ Hsu, Y.; Krawczyk, R. *New generation of computer aided design in space planning methods: A survey and a proposal*. In: CAADRRIA; Choutgrajank. A. (ed.). *Proceedings of the 8th international conference on computer-aided architectural design research in Asia*, Thailand: Rangsit University, 2003. pp 101–116.

tices, as well as in academic research. However, it appears that the body of knowledge constructed throughout the 20th century will remain as a vivid example of how innovation was formulated and developed with a deep knowledge of the discipline of architecture, and how it emerges in response to its own time and its own culture.

Although the splendor of the era of magnificent structures of reinforced concrete shells, or astonishing metal lattice structures, is a thing of the past, these projects have greatly contributed to the advancement of the discipline, by proposing innovative concepts, unexplored methodologies, and remarkable technical achievements.

It can be argued that since 1980, the knowledge and experience accumulated throughout the last century was mostly lost, because the insertion of computation created an excessive preoccupation on the form-making capacity of software and its aesthetics aspects. However, in recent years, the legacy of the form finders of the 20th century seems to be resurfacing, due to the scrutiny and doubts associated to the quality of recent architectural digital production.

Parametric logics have proven to provide a solid design methodology for architecture before the widespread use of computation, but still remains largely unexplored within academic research and practice. Considering current developments in the field of computation, mathematics, engineering, material science, modeling techniques, and construction methods, these practices will likely be expanded, redefined, and fully embedded within architectural design.

In recognition of the various important precedents identified in this thesis, future research should continue to study the architectural references of exemplary built projects. Design methodologies must be explored as rule-based processes, dependant on precise parameters, instead of just imagery. These rules of thumb for designers and architects should be implemented early in the process, and include non-linear logics. Finally, experimentation and simulation techniques should be explored, both in analogue and digital formats, to facilitate the formulation of unexplored design solutions.

Perhaps the revolution initiated by the master builders more than a century ago is far from over.

CAPITULO 5

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

Aclaraciones previas

La organización de la bibliografía responde a la estructura de esta tesis organizada en capítulos: el primero referente a definiciones; el segundo respecto a referentes; el tercero relativo a los casos de estudios en sus aspectos matemáticos, modelos físicos, y consideraciones constructivas; y el cuarto en relación a las conclusiones que fundamentan los conceptos y aportaciones de teoría y praxis en el proyecto arquitectónico.

La bibliografía incluye diversas fuentes consultadas, como libros, revistas, webs, y otras aportaciones. Es necesario aclarar que debido a la novedad del tema, los registros en revistas y web resultaron decisivos.

La bibliografía incluye también material que ha sido utilizado en la redacción de capítulos relevantes articulando algunas reflexiones enunciadas en la investigación, a pesar de no haber sido citadas explícitamente en el texto.

Capítulo 1

Banham, Reyner. *Theory and design in the first machine age*. Cambridge, Mass. : MIT Press, 1983.

Baudrillard, Jean. *El Sistema de los Objetos*. Madrid : Siglo XXI, 2010.

Burry, Mark. *Between Intuition and process: Parametric Design and Rapid Prototyping*. In: Kolarevic, Branko (ed.). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York : Taylor & Francis, 2004. P. 210.

Burry, Mark. *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*. Chichester, West Sussex : Wiley, 2011. P. 18.

Cache, Bernard. De Architectura: On the Table of Content of the Ten Books on Architecture. *Candide. Journal for Architectural Knowledge*, Dec. 2009, no.1, pp. 9–48.

Castells, Manuel. *La Era de la Información: Economía, Sociedad y Cultura*. Vol. 1. México : Siglo XXI, 1996.

Christenson, Mike. Testing the relevance of parameterization to architectural epistemology, *AIA Architectural Science Review*, 2009, vol. 52, no.2, p. 135-141.

Converso, Stefano; Bonatti, Fabrizio. *Parametric Model for Architectural Design*. In: Oosterhuis, Kas (ed.); Feireiss, Lukas (ed.). *Game Set and Match: On Computer Games, Advanced Geometries, and Digital Technologies*. Rotterdam: Episode Publishers. 2006. Pp. 242–247.

Davis, Daniel. *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. PhD dissertation, RMIT University. 2013.

Dürer, Vitruvius, Plato: Instruments of Thought. Bernard Cache. Archinthemaking. 2013. [viewed date October 29, 2015]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=VxzdW4H4aww>

Focillon, Henri. *La Vida de las Formas y Elogio de la Mano*. Madrid: Xarait, 1983.

Giedion, Siegfried. *Espacio, Tiempo y Arquitectura: el futuro de una nueva tradición*. 5ª ed. Madrid : Dossat, 1978.

Giedion, Siegfried. *La Mecanización Toma El Mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 1978.

Kubler, George. *La Configuración Del Tiempo*. Madrid: Alberto Corazón, 1975.

Leach, Neil. On Parametricism - A Dialogue between Neil Leach and Patrik Schumacher. *Time + Architecture*, 2012, no. 5. p. 8.

Leach, Neil. *Parametrics Explained*, n.d. Texto sin publicar.

Meredith, Michael. *Never Enough : transform, repeat and nausea*. In: Sakamoto, Tomoko; Ferré, Albert. *From Control to*

Design : Parametric Algorithmic Architecture. Barcelona, New York: Actar-D, 2008. Pp. 6-9.

Monedero, Javier. (Personal Communication, September 2010).

Monedero, Javier. Parametric Design: a Review and some Experiences. In: *Automation in Construction*, no. 9, 2000. P. 369-377.

Moretti, Luigi; Bucci, Federico; Mulazzani, Marco; deConciliis, Marina. *Luigi Moretti: Works and Writings*. Princeton Architectural Press, 2002. P. 214.

Moretti, Luigi; La Spina, Vicenzina (Trad.). La estructura como forma. *Spazio*, no. 6, 1952.

Parametric Approaches. Michael Silver lecture - III Symposium, CITA Center for Information Technology and Architecture at the Royal Danish Academy of Fine Arts School of Architecture. 2009 [viewed May 10, 2013]. Available from: <http://vimeo.com/43249089>

Schumacher, Patrik; Leach, Neil. (ed.). Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design. *Architectural Design*, no. 79 (4), 2009, pp. 14-23.

Schumacher, Patrik. *Parametricism as Style : Parametricist Manifesto*. In: Darkside Club, 11th. Venice Architecture Biennale, 2008. Pp. 1–5.

Schumacher, Patrik. Patrik Schumacher on Parametricism : Let the Style Wars Begin. *Architects' Journal*, 2010, pp. 1–9.

Viati, Annalisa. *Un nuovo linguaggio per il pensiero architettonico: Ricerca operativa e architettura parametrica*. In: Moretti, Luigi; Reichlin, Bruno; and Tedeschi, Letizia. *Luigi Moretti: Razionalismo e Trasgressività tra Barocco e Informale*. Milano: Mondadori Electa, 2010. P. 409.

Vitruvius, Pollion. *The Ten Books on Architecture*, Cambridge : Harvard University Press, 2006. P. 5.

Woodbury, R, Williamson, S, Beesley, P. *Parametric Modelling as a Design Representation in Architecture: A Process Account*. In: Canadian Design Engineering Network. Third CDEN/RCCI International Conference on Education, Innovation, and Practice in Engineering Design. Toronto, July 2006.

Woodbury, Robert. *Elements of Parametric Design*. London : Routledge, 2010.

Capítulo 2

Braun, Marta. *Picturing Time: The Work of Etienne-Jules Marey (1830-1904)*. Chicago: University of Chicago Press, 1992. Pp.150-151.

Dürer, Albrecht; Camerarius, Joachim. *Alberti Dureri Clarissimi Pictoris et Geometrae de Symmetria partium humanorum corporum Libri quatuor, è Germanica lingua, in Latinam versi* [online]. Paris: in officina Caroli Perier, in vico Bellouaco, sub Bellerophonte, 1557 [viewed 28 October 2015]. Available from: <http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-9247>

Dürer, Albrecht. *Géométrie*. Peiffer, Jeanne (ed.). Paris : Seuil, 1995.

Gabo, Naum; Pevsner, Antoine. *The Realistic Manifesto*. In : *The Tradition of Constructivism*. Bann, Stephen (ed.). New York : Da Capo Press, 1974. Pp 3-11.

Henderson, Linda. *The Fourth Dimension and Non-Euclidean Geometry in Modern Art*. Princeton [N. Jersey] : University Press, 1983. P 128.

Kenneth Frampton Architecture Extras Interview. Ar buckle Industries, 2014. [viewed 6 September 2015]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=NzZ1VsrUyXU>

Manuel DeLanda. *A New Philosophy of Society: Assemblage Theory and Social Complexity*. London : A&C Black, 2006.

Mumford, Lewis. *Technique et Civilisation*. Paris: Editions du Seuil, 1950. p.343.

Negroponte, Nicholas. *El Mundo Digital*. Barcelona : Ediciones B, 1995. P 96.

Negroponte, Nicholas. *Soft Architecture Machines*. MIT Press, 1976.

Negroponte, Nicholas. *The Architecture Machine: Toward a More Human Environment*. The MIT Press, 1973. pp. 9–12.

Negroponte, Nicholas. *Towards a Theory of Architecture Machines*. Journal of Architectural Education, 23 (2), 1970. Pp 9-12.

Rifkin, Jeremy. *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World*. New York : St. Martin's Press, 2011. Pp.37.

Thompson, D'Arcy Wentworth. *Sobre el Crecimiento y la Forma*. Madrid : Akal, 2011. Pp. 257-308.

Capítulo 3

Grasshopper™, Version 1.0, 2007. Robert McNeel & Associates.

Rhinoceros ©. Version 5, 2014. Robert McNeel & Associates.

Scan&Solve™. Version 2014.6.16.0, 2014. Intact Solutions, Inc.

Capítulo 3-1

- Abu Abd Allah Muhammad ibn Muadh Al-Jayyani. O'Connor, J.; Robertson, E. 1999. [viewed 16 April 2014]. Available from: <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/Al-Jayyani.html>
- Alsina, C.; Casabó, J.; Jacas, J.; Monreal, A.; Tomás, M^a. *Càlcul per a l'Arquitectura*. Barcelona : Edicions UPC, 2008. Pp. 163-181.
- Botey, Josep. *Oscar Niemeyer : Obras y Proyectos, Works and Projects*. Barcelona : Gustavo Gili, 2002. Pp. 164-170.
- Burry, M and Burry J.: 2010. *The New mathematics of architecture*, London: Thames & Hudson, pp. 37-39.
- Burry, Mark. Geometry Working Beyond Effect. *Architectural Design*, 2011, no. 81 (4). pp. 80–89.
- Cassinello Plaza, Ma. Josefa. *Félix Candela : Centenario 2010 : La Conquista de La Esbeltez*. Madrid : Fundación Juanelo Turriano, 2010. p. 10.
- Ching, Frank, Barry Onouye, and Douglas Zuberbuhler. *Manual de Estructuras Ilustrado*. Barcelona : Gustavo Gili, 2014. P. 26.
- Clinton, J. D. *Geodesic Math*. In: Kahn, Lloyd et al. (eds.). Domebook 2. Bolinas, [CA] : Shelter Publications, 1972.
- Engel, Heino. *Sistemas de Estructuras = Sistemas Estruturais*. Barcelona : Gustavo Gili, 2001. Pp. 18.
- Félix Candela : Dorothy Candela*. Princeton University Art Museum. 2008 [viewed June 13, 2015]. Available from: <http://artmuseum.princeton.edu/legacy-projects/Candela/dorothy.html>
- Félix Candela. The Harvard Crimson, 1961 [viewed June 13, 2015]. Available from: <http://www.thecrimson.com/article/1961/11/17/felix-candela-pthe-norton-lecturer-for/>
- Giralt, Miracle. *Gaudi: Nature in Architecture*. In: Filali Ansari, Abdul. *Los Mediterráneos*. Barcelona : Icaria Editorial, 2015. pp 249.
- Heynen, Hilde. *Architecture and Modernity: A Critique*. Cambridge, [MA] : MIT Press, 1999. Pp. 38-41.
- High risk: Moscow's iconic Shukhov Tower is under threat*. The Calvert Journal. 2014 [viewed April 28, 2014]. Available from: <http://calvertjournal.com/comment/show/2280/shukhov-tower-under-threat>.
- Jahnke, Eugene; Emde, Fritz. *Tables of Functions with Formulae and Curves*. New York : Dover Publications. 1945.
- Klein, Felix. *Elementary Mathematics from an Advanced Standpoint: Geometry*, Dover, 1948 [reprint of English translation of 3rd Edition, 1940. First edition in German, 1908]. pp. 176.
- Menelaus of Alexandria*. O'Connor, J; Robertson, E F. 1999 [viewed April 16, 2014]. Available from: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Menelaus.html>
- Monreal Pujadas, Amadeo. Parametrizació de Còniques i Quàdriques. *Apuntes Docentes de DEA Departamento de Estructuras el la Arquitectura*, ETSAB, UPC.
- Monreal, Amadeo. *Afirmació i Argumentació de que la Forma Bàsica de la Catedral de Brasília, de Oscar Niemeyer no s' Ajusta a un Hiperboloide de Revolució d' una Fulla*, Unpublished article. n.d., p. 1–6.
- Montreal, Amadeo. *Definiciones propuestas por el autor*. DEA Departamento de Estructuras el la Arquitectura, ETSAB, UPC.
- Superficies sinclásticas y anticlásticas*. Patronaje UPC. n.d. [viewed 20 Octubre 2015]. Available from: <http://tecno.upc.edu/wintess/manual/pat/introduccion.htm>
- Treib, Marc. *Space Calculated in Seconds: The Philip Pavilion*. Princeton, [NJ] : Princeton University, 1996. p. 22.
- Vinyes, Raül. *Integrating Aesthetics And Statics: Study of a Geodesic Dome*. Projecto Tesina de Master Especialitat Estructures, RMEE, UPC. 2009. Pp.31-33.
- Vitruvi Pol·lió, Marc. *Los Diez Libros de Architectura*. Toledo: Antonio Pareja, 1999.
- Wagensberg, Jorge. La matemática en aforismos. *El País*. 11 de enero de 2014. [viewed 18 Feb. 2014]. Available from: <http://blogs.elpais.com/tormenta-de-ideas/2014/01/la-matematica-en-aforismos.html>

Capítulo 3-2

- Adriaenssens, Sigrid; Block, Philippe; Veenendaal, Diederik; Williams, Chris. *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. London : Routledge, 2014. Pp.38-40.
- Alberti, Leon Batista. *The Architecture of Leon Batista Alberti in Ten Books*. London: Edward Owen, 1755. Pp.54-57.
- Allen, Edward. *Form and Forces : Designing Efficient, Expressive Structures*. Hoboken, N.J. : John Wiley & Sons, 2010. Available from: <http://tecno.upc.edu/wintess/manual/pat/introduccion.htm>
- Beckh, Matthias. *Hyperbolic Structures : Shukhof's Lattice Towers--Forerunners of Modern Lightweight Construction*. Chichester, West Sussex : Wiley Blackwell, 2015. P. 87.
- Bohigas, Oriol; Giralt-Miracle, Daniel; Casanova, Rossend. *Gaudi*. Barcelona : Planeta : Ajuntament de Barcelona, 2002. P.169.
- Bologna, A.; Neri, G. *Pier Luigi Nervi in the United States. The height and decline of a master builder*. In: *Structures and Architecture: New Concepts, Applications and Challenges*. CRC Press, 2013.
- Brufau, Robert. *Las bóvedas gausas*. DPA: Documents de Projectes d'Arquitectura, 2001, 15, pp. 18-25.

- Chi e' Pier Luigi Nervi. *Costruire Correttamente*, 2012. [viewed 28 October 2015]. Available from: http://costruirecorrettamente.org/site/chi-e-pier-luigi-nervi/index.php?doc_id=76.
- Chiorino, M; Chiorino, C. Pier Luigi Nervi: Architecture as Challenge. In: da Sousa Cruz, Paulo J. (Ed.), *Structures and Architecture: New Concepts, Applications and Challenges*. CRC Press : Har/Cdr Edition, 2013, pp. 13-24.
- Darling, David. *The Universal Book of Mathematics: From Abracadabra to Zeno's Paradoxes*. Vol. 0. John Wiley & Sons, 2004. P 245.
- Davis, Lara. *Applied Structures I : Sudu Design I Building*, 2010. [viewed 28 October 2015]. Available from: <https://sudu1construction.wordpress.com/2010/11/12/applied-structures-i-%E2%80%93sudu-design/>
- De Lagrange, M. Fabre. *A Catalogue of a Collection of Models of Ruled Surfaces*. New York : HardPress, 2012. Pp.111-112.
- Duque, Conde. *Félix Candela: La Conquista de la esbeltez*. 2010. [Guía de Exposición realizada en la Sala de las Bóvedas, del 23 de febrero al 18 de abril de 2010]. Madrid: Ayuntamiento de Madrid, 2010.
- Eliasson, Olafur. *Los Modelos son Reales*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- Engel, Heino. *Sistemas de Estructuras : Sistemas Estructurales*. Barcelona : Gustavo Gili, 2001. Pp. 18.
- Engineer Biography : Peter Rice*. Engineering Timelines. 2015. [viewed 10 October 2015]. Available from: http://www.engineering-timelines.com/who/Rice_P/ricePeter3.asp.
- Ferranti Pegasus, Perseus and Sirius: Delivery Lists and Applications*. Computer Conservation Society. 2003 [viewed 10 October 2015], Available from: <http://www.ourcomputerheritage.org/ccs-f3x1.pdf>
- García-Gutiérrez, Javier; Huerta, Santiago. *Las Bóvedas de Guastavino en América*. Madrid : Ministerio de Fomento. 2001. P. 290.
- Gohnert, M; Fitchett, A; Bulovic, I; Bhlkhoc, N. *Structurally Efficient Housing Incorporating Natural Forms*. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2013, 55 (3), pp. 96-102.
- Joseph Plateau : *Liquide Glycérique*. Museum voor de Geschiedenis van de Wetenschappen [webpage], 2015. [viewed 7 October 2015]. Available from: <http://www.mhsgent.ugent.be/engl-plat10.html>
- La Catenaria en la Arquitectura*. Departamento de Matemáticas, UPM, Material Docente., p. 11.
- Larsen, Olga; Tyas, Andy. *Conceptual Structural Design: Bridging the Gap Between Architects and Engineers*. London : Thomas Telford, 2003. P. 63.
- Mariano, Fabio. *Pier Luigi Nervi: una Scienza per l'Architettura*. Roma: Istituto Mides, 1982. P. 3.
- Millais, Malcolm. *Building Structures : From Concepts to Design*. London : E , 2005, p. 382.
- Nervi, Pier Luigi; Munné, Antonio (Trans.). *Pier Luigi Nervi : Construcciones y Proyectos*. Barcelona : Gustavo Gili, 1958. P. 28.
- Nervi, Pier Luigi. *Costruire Correttamente : Caratteristiche E Possibilita Delle Strutture Cementizie Armate*. Milano : Hoepli, 1965. P.105.
- Otto, Frei; Schanz, Sabine. *Frei Otto, Bodo Rasch : Finding Form : Towards an Architecture of the Minimal*. Stuttgart : Axel Menges, 1995. P.107.
- Otto, Frei. *Frei Otto: Conversación con Juan María Songel*. Barcelona : Gustavo Gili, 2008,p. 39.
- Páez, Alfredo. Cincuenta años de hormigón armado en España. *Revista de Obras Públicas*, 1956, no. 5, Vol. CIV (2892), p. 209.
- Pier Luigi Nervi*. ISMES Experimental Institute for Models and Structures. 2007 [viewed 28 October 2015]. Available from: <http://www.ismes.org/>
- Sarrablo, Vicente. La construcción de formas complejas. *Tectónica*, 2004, no. 17. Pp.18-29.
- Serrablo, Vicente: *Contribución a la viabilidad de cubiertas laminares de cerámica armada mediante soluciones semiprefabricadas. Propuesta para láminas cilíndricas de pequeña luz*. Departamento de Estructuras en la Arquitectura. UPC, Julio de 2002, pp. 38-39.
- Siegel, Curt. *Les Formes structurales de l'Architecture moderne*. Paris : Eyrolles, 1965.
- Songel, J. *Form and structure in engineering and visual arts*. In: Cruz (Ed.). *Structures and Architecture*. London : Taylor & Francis Group, 2010. Pp. 652-658.
- Tessmann, Oliver. *Collaborative Design Procedures for Architects and Engineers*. Norderstedt : BoD Books on Demand, 2008, p. 30.
- Tomlow, J. La evolución de la innovación estructural de Gaudí : Los proyectos de la sede de la Misión Franciscana, la iglesia de la Colonia Güell y el templo de la Sagrada Familia. *OP Ingeniería y Territorio*, 2002, no. 59, p. 48-57.
- Traces of Peter Rice*. Arup. 2012. [viewed 10 October, 2015]. Available from: <http://video.arup.com>
- Treib, Marc. *Space Calculated in Seconds : the Philips Pavilion*, Le Corbusier, Edgard Varèse. Princeton, [NJ] : Princeton University, 1996.

Capítulo 3-3

- Alarcón, Óscar. *Estudio Paramétrico de Bóvedas Parabólicas de Cerámica Armada Mediante el Método del Análisis Límite*. Tesina de Master, UPC. 2014. Pp. 7-8.
- Banham, Reyner. *Age of the Masters : a Personal View of Modern Architecture*. London: The Architectural Press, 1975. P 48.
- Banham, Reyner. *Teoría y Diseño Arquitectónico en la Era de la Máquina*. Buenos Aires: Nueva Visión, 1977. P. 26.
- Candela, Félix; Seguí, Miguel. *Félix Candela : Arquitecto*. Madrid : Instituto Juan de Herrera, 1994. Pp 88-91.
- Conrads, Ulrich (ed.); Bullock, Michael (tran.). *Programs and Manifestoes on 20th.-Century Architecture*. Cambridge, MA: The MIT Press. 1971.
- De Witt Schuyler Morgan. *Living and Working Together*. New York : C. Scribner's Sons, 1931. P.68:
- Desideri, Paolo; Nervi, Pier Luigi; Positano, Giuseppe. *Pier Luigi Nervi*. Barcelona : Gustavo Gili, 1981. Pp.63-71.
- Farrelly, Lorraine. *Construction + Materiality*. AVA Publishing SA, Lausanne, Switzerland, 2009. P. 43-46.
- Félix Candela : Construction Techniques*. Princeton University Art Museum. 2008. [viewed 13 June 2015]. Available from: <http://mcis2.princeton.edu/candela/techniques.html>
- Felix Candela*. The Harvard Crimson. 1961. [viewed 29 October 2015]. Available from: <http://www.thecrimson.com/article/1961/11/17/felix-candela-pthe-norton-lecturer-for/>.
- Foster, Norman. Chrystal Palace : el edificio favorito del arquitecto Norman Foster, *El País Semanal*. 2015 [viewed: August 8, 2015]. Available from: http://elpais.com/elpais/2015/08/05/eps/1438784243_593178.html
- Frampton, Kenneth; Futagawa, Yukio. *Modern Architecture : 1851-1945*. New York : Rizzoli, 1983, P 204.
- Frampton, Kenneth. *Estudios sobre cultura tectónica : Poéticas de la Construcción en la Arquitectura de los Siglos XIX y XX*. Madrid : Akal Ediciones, 1999.
- Frampton, Kenneth. *Estudios Sobre Cultura Tectónica*. Madrid : Ediciones Akal, 1999. P 47.
- Frampton, Kenneth. *Historia Crítica de la Arquitectura Moderna*. Barcelona : Gustavo Gili, 2009.
- Freyssinet, E. Concrete Airship Sheds At Orly, France, *Le Genie Civil*, September 22 & 29, 1923.
- Giedion, Siegfried. *Espacio, Tiempo y Arquitectura : el Futuro de una Nueva Tradición*. Vol. 5a. Madrid: Dossat, 1978.
- Giedion, Siegfried. *La Mecanización Toma El Mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 1978.
- Ginzburg, Moisei; Senkevitch, Anatole (transl.). *Style and Epoch*. Cambridge Mass. ; London : The Mit Press, 1982. Pp. 86.
- Giovannardi, Fausto. *Vladimir G. Shukhov and the Lightness of Steel*. Creative Commons, 2007.
- Giovannardi, Fausto. *Vladimir G. Shukhov and the Lightness of Steel*. Creative Commons, 2007. P 8.
- Ingeniero Eladio Dieste*. Comisión de Constitución, Códigos, Legislación General y Administración, Poder Legislativo, Cámara de Representantes, Republica Oriental del Uruguay. Carpeta N° 2116, 2007. [viewed 22 June 2015]. Available from: <http://sip.parlamento.gub.uy/repartidos/AccesoRepartidos.asp?Url=/repartidos/camara/d2007101067-00.htm>
- Mariano, Fabio; Milelli, Gabriele. *Pier Luigi Nervi : Una Scienza per L'architettura*. Roma : Istituto Mides, 1982. P. 3.
- Mas Guindal, Antonio; M^a Adell. Josep. Eladio Dieste y la Cerámica Estructural en Uruguay. *Informes de la Construcción*, Vol. 56, n° 496, Marzo-Abril 2005. Pp. 13-23.
- Matthias Beckh, Rainer Barthel. *The First Doubly Curved Gridshell Structure - Shukhovs Building for the Plate Rolling Workshop in Vyksa*. Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus, May 2009.
- Nervi, Pier Luigi. *Structures*. Michigan : F.W. Dodge Corp., 1956.
- Pace, Sergio. *Pier Luigi Nervi y los otros: arquitectura e ingeniería en Italia después de la II Guerra Mundial* delivered at COAC conference. [Apuntes de la autora]. June 2013.
- Powell, Kenneth (ed.), *The Great Builders*. London: Thames & Hudson, 2011. Pp. 203.
- Puente, Moisés. Pabellones de Exposición: 100 Años. Barcelona : Gustavo Gili, 2000.
- Serrablo, Vicente. (Personal Communication, 29 July 2015).
- Serrablo, Vicente*. La Construcción de Geometrías Complejas. *Tectónica*, no. 17, 2004. p.22.
- Sydney Opera House : Utzon Design Principles*. Australian Government, Department of Environment. 2002. [viewed 22 October 2015]. Available from: <http://docslide.us/documents/22-sydney-opera-house-utzon.html>.
- Viollet-le-Duc, Eugène-Emmanuel. *The Architectural Theory of Viollet-le-Duc: Readings and Commentary*. Cambridge, [MA] : The MIT Press, 1990. Pp. 175-177.
- Vitruvius, Pollion. *The Ten Books on Architecture*, Cambridge : Harvard University Press, 2006. P. 16.
- Vladimir Grigorievich Shukhov*. The Shukhov Tower Foundation. 2015. [viewed 9 August 2015]. Available from: <http://www.shukhov.org/shukhov.html>
- Weston, Richard. *Materiales, Forma y arquitectura*. Barcelona: BLUME, 2003, p. 148.
- Wiryomartono, Bagoes. Reyner Banham and Modern Design Culture. *Frontiers of Architectural Research* 1, 2012, no. 3 [September 2012]. pp. 272–79.

Woodbury, Robert. *Elements of Parametric Design*, London: Routledge, 2010. pp. 1-5.

Capítulo 4

Banham, Reyner. *Age of the Masters: a Personal View of Modern Architecture*. London: The Architectural Press, 1975.

Bucci, Federico; Mulazzani, Marco. *Luigi Moretti: Works and Writings*. DeConciliis, Marina (trans.). Princeton Architectural Press, 2002. P. 214.

Frampton, Kenneth. *Historia Crítica de la Arquitectura Moderna*. Barcelona : Gustavo Gili, 2009.

Giedion, Siegfried. *Espacio, Tiempo y Arquitectura : el Futuro de Una Nueva Tradición*. 5a. Ed. Madrid: Dossat, 1978.

Hsu, Y.; Krawczyk, R. *New generation of computer aided design in space planning methods: A survey and a proposal*. In: CAADRIA; Choutgrajank. A. (ed.). *Proceedings of the 8th international conference on computer-aided architectural design research in Asia*, Thailand: Rangsit University, 2003. pp 101–116.

Instruments of Thought. Cache, Bernard. Cornell University. [Conference delivered on October 4, 2012]. 2012 [viewed 29 October 2015]. Available from: http://events.cornell.edu/event/bernard_cache_lecture_instruments_of_thought

Meredith, Michael. *Never Enough : transform, repeat and nausea*. In: Sakamoto, Tomoko; Ferré, Albert. *From Control to Design : Parametric Algorithmic Architecture*. Barcelona, New York: Actar-D, 2008. Pp. 6-9.

Monedero, Javier. Parametric Design: a Review and some Experiences. In: *Automation in Construction*, no. 9, 2000. P. 369-377.

Monedero, Javier. *Parametric Design: a Review and some Experiences*. In: *Automation in Construction*, no. 9, 2000. P. 369-377.

Schumacher, Patrik. *Parametricism as Style : Parametricist Manifesto*. In: Darkside Club, 11th. Venice Architecture Biennale, 2008. Pp. 1–5.

Serrablo, Vicente. (Personal Communication, 29 July 2015).

Taut, Bruno; Abalos, Iñaki (ed.), Abalos, M^a Dolores (trad.). *Escritos : 1919-1920*. Madrid : El Croquis, 1997. no. 6. Pp. 108-109.

Viati, Annalisa. *Un nuovo linguaggio per il pensiero architettonico: Ricerca operativa e architettura parametrica*. In: Moretti, Luigi; Reichlin, Bruno; Tedeschi, Letizia. *Luigi Moretti: Razionalismo e Trasgressività tra Barocco e Informale*. Milano: Mondadori Electa, 2010. P. 409.

Woodbury, Robert. *Elements of Parametric Design*, London: Routledge, 2010. pp.

World Heritage List. Unesco, 2009. [viewed 29 October 2015]. Available from: http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=45692&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Aclaraciones previas

La organización de las ilustraciones se organiza de acuerdo a los cuatro capítulos de esta tesis. Las imágenes sin referencia corresponden a la autora.

Capítulo 1

Fig. 1-1: Maite Bravo.....	16
Fig. 1-2: Maite Bravo.....	17
Fig. 1-3: Federico Bucci and Marco Mulazzani 2000. In: Davis, Daniel. Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture. PhD dissertation, RMIT University. 2013. pp. 17.....	20
Fig. 1-4: Exposicion sobre “Parametric Architecture and of Mathematical and Operational Research in Town-Planning: 12th. Triennial Exhibition, Milan, Arts’ Palace, September-October 1960”. In: Moretti, Luigi, Bruno Reichlin, and Letizia Tedeschi. Luigi Moretti : Razionalismo E Trasgressività Tra Barocco E Informale. Milano : Mondadori Electa, 2010. pp 419.	20
Fig. 1-5: Fig. 1-5: Luigi Moretti, Diseño para un cine. Circa 1950. In: Moretti, Luigi, Bruno Reichlin, and Letizia Tedeschi. Luigi Moretti : Razionalismo E Trasgressività Tra Barocco E Informale. Milano : Mondadori Electa, 2010. pp 412.	21
Fig. 1-6: Fig. 1-6: Luigi Moretti , Diseño para un estadio. In: Davis, Daniel. Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture. PhD dissertation, RMIT University. 2013. pp. 17.	21
Fig. 1-7: Maite Bravo.....	24-25
Fig. 1-8: Maite Bravo.....	30
Fig. 1-9: Maite Bravo.....	31
Fig. 1-10: Objeto dimensionado (izquierda) y objeto paramétrico (derecha). In: V. Vogler, [unpublished]. 2010.....	33

Capítulo 2

Fig. 2-1 & 2-2: Transformaciones en coordenadas (circa 1524), y estudios de proporción (1528). In: Dürer, Albrecht. Alberti Dureri De Symmetria Partium Humanorum Corporum Libri Quatuor, È Germanica Lingua, in Latinam Versi. in officina Caroli Perier, in vico Bellouaco, sub Bellerophonte, 1557. Pp 78-88.....	36
Fig. 2-3: La teoría de las transformaciones de D’Arcy Thompson aplicadas a peces con una variedad de deformaciones. In: Thompson, D’Arcy Wentworth. On Growth and Form. New York : Dover, 1992. pp. 1062-1064.	37
Fig. 2-4: Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eadweard_Muybridge_Locomotion_442_1887.jpg	40
Fig. 2-5: Braun, Marta, and Etienne-Jules Marey. Picturing Time: <i>The Work of Etienne-Jules Marey (1830-1904)</i> . Chicago: University of Chicago Press, 1992, p.83.	40
Fig. 2-6: Braun, Marta. <i>Picturing Time: The Work of Etienne-Jules Marey (1830-1904)</i> . Chicago: University of Chicago Press, 1992. Pp.120-121.	41
Fig. 2-7: (Arriba) Eadweard Muybridge. Mujer bajando la escalera, 1887. In: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Female_nude_motion_study_by_Eadweard_Muybridge_(2).jpg	44

(Abajo Izquierda) Marcel Duchamp. Nude Descending a Staircase, No. 2 (1912). Philadelphia Museum of Art.....	44
(Abajo Derecha) Eliot Elisofon. Time & Life Pictures. Getty Images. 1952.....	44
Fig. 2-8: Escher, Metamorphosis II, 1939-1940 y Metamorphosis III, 1967-1968. In: http://www.wikiart.org/	45
Fig. 2-9: The Work of Naum Gabo © Nina & Graham Williams. Tate, London 2014.....	45
Fig. 2-10: Paul Baran. Centralized, Decentralized and Distributed Systems. 1964. In: http://www2.cfn.ca/usha/part-iii-article-by-pramod-dhakal/129-the-law-of-rule-centralized-decentralized-and-distributed-systems	48
Fig. 2-11: Maite Bravo	48
Fig. 2-12: Ivan Southerland. Sketchpad.1963. In: Davis, Daniel. Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture. PhD dissertation, RMIT University. 2013..p.1-2.....	49
Fig. 2-13: Primera versión del programa CATIA, en 1977. Fuente: A short history of CATIA & Dassault Systems, Francis Bernard, May 2003.	49
Fig. 2-14: Maite Bravo	52-53
Fig. 2-15: Maite Bravo	54
Fig. 2-16: Maite Bravo	55
Fig. 2-17: Bernard Rudofsky, 1964, <i>Architecture without architects</i>	56
Fig. 2-18:	57
(a) Bóveda de la Sala de Dos Hermanas. Palacio Nazarí de la Alhambra. S. XIV. In: http://otraarquitecturaesposible.blogspot.com.es/2011/04/elementos-primarios-de-la-arquitectura_17.html	
(b) Cúpula del Mirhab Gran Mezquita de Tremeccén, Argelia. 1082.. In: http://otraarquitecturaesposible.blogspot.com.es/2011/04/elementos-primarios-de-la-arquitectura_17.html	
(c) Domo Mocárabe Mausoleo de Nur al-Din in Damascus. Siria.1167-68. In: http://web.mit.edu/4.615/www/images/1065.html , y Taj Mahal Cúpula Interior, 1632–1653.	
Fig. 2-19: Borromini. Interior Domo, Iglesia de San Carlo alle Quattro Fontane.1638-41.	58
Fig. 2-20:	59
(a) Vladimir Tatlin, Monument to the 3th. International, 1920. In: pixshark.com	
(b) IM Pei, Office Tower at Grand Central. New York, 1956. In: http://www.thecityreview.com/byard.html	
(c) Foster & Partners. Millenium Tower. 1989. In: http://www.fosterandpartners.com/projects/millennium-tower/	
Fig. 2-21:	60
(1) Shukov or Shabolovka Radio Tower, 160m high hyperbolic structure, Russia, 1922.	
(2) Canton TV Tower, Guangzhou, China, Mark Hemel/Barbara Kuit (IBA) arch, Arup (eng.), 610m tall, 2nd largest structure in the world to date, 2010. In: http://www.arup.com/Projects/Guangzhou_TV_Tower.aspx	
Fig. 2-22:	60
(1) Bruno Taut. Taut Glass Pavilion, Cologne, Germany, 1914. In: http://architectuul.com/architecture/glass-pavilion	
(2) , Foster & Partners. Swiss Re, Londres, 1997-2004. In: http://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe/	
Fig. 2-23: (1) Vladimir Shukhov, Vyksa , 1897. In: www.snipview.com	61
(2) Weald and Downland Gridshell, Singleton, UK. Edwards Cullinan. In: http://www.culture24.org.uk/asset_arena/3/34/35433/v0_master.jpg	
Fig. 2-24:	61
(1) Eladio Dieste Church, 1958. In: Pedreschi, Remo. Eladio Dieste : the engineer's contribution to contemporary architecture. London : Thomas Telford, 2000.P.73.	
(2) Switzerland Biennial Pavillion, Venice, Gremazio Kohler, 2008. In: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/142.html	

Capítulo 3

Fig. 3-0-1: Maite Bravo	66
Fig. 3-0-2: Maite Bravo	68
Fig. 3-0-3: Maite Bravo	69
Fig. 3-0-4: Maite Bravo	70 - 73

Capítulo 3-1

Fig. 3-1-1:

(1) Available from: http://alligater.org/publ/3-1-0-436	76
(2) Available from: http://www.jtbullitt.com/tech/earthsound/speaker-placement/index.html	76
Fig. 3-1-2: Trigonometría Esférica. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_trigonometry	77
Fig. 3-1-3: Wolfram Demonstration Project. Available from: http://demonstrations.wolfram.com/SphericalTrigonometryOnAGnomonicProjection/	78
Fig. 3-1-4: Geometrías no- euclidianas, clasificadas de acuerdo a su curvatura en monoclásticas, anticlásticas, y sinclásticas. Available from: http://geolmag.geoscienceworld.org/content/140/6/721/F4.large.jpg	80
Fig. 3-1-5: Geometrías no-euclidianas a partir de las secciones de un cono. In: Material Docente, DEA Departamento de Estructuras el la Arquitectura, ETSAB, UPC.....	81
Fig 3-1-6: Maite Bravo	86
Fig. 3-1-7: Maite Bravo	87
Fig. 3-1-8: Maite Bravo	88
Hipódromo de Madrid: Antuña, Joaquín. Las Estructuras De Edificación De Eduardo Torroja Miret. Tesis Doctotal. UPM, Madrid. 2002.	
Fig. 3-1-9: Maite Bravo	91
Fig. 3-1-10: Maite Bravo	92
Fig. 3-1-11: Maite Bravo	95
Fig. 3-1-12: Maite Bravo	96
Fig. 3-1-13: Maite Bravo	97
Fig. 3-1- 14: Maite Bravo	100
Fig. 3-1-15: Maite Bravo	102
Fig. 3-1-16: Maite Bravo	103
Fig. 3-1-17: Maite Bravo	104-105
Fig. 3-1-18: Amadeo Monreal.....	109
Fig.3-1-19: Maite Bravo	110
Fig. 3-1-20: Maite Bravo	113
Fig. 3-1-21: Maite Bravo	117
Fig. 3-1-22: Maite Bravo	119
Fig. 3-1-23: Esdar Varesse In: Treib, Marc. Space Calculated in Seconds: The Philip Pavilion Le Corbusier, p.22.....	121

Capítulo 3-2

Fig 3-2-1: Úbeda Blanco, Marta. La Maqueta Como Experiencia Del Espacio Arquitectónico. Valladolid: Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial, 2002. p.26.....	131
Fig 3-2-2: St. Peter Maqueta. 1558-61. Available from: http://www.michelangelomodels.com/m-models/st-peters/st_peters_index.html	131
Fig 3-2-3: Vladimir Tatlin. Monumento a la Tercera Internacional, 1919. Available from: http://www.michelangelomodels.com/m-models/st-peters/st_peters_index.html	131
Fig. 3-2-4: Ródchenko: Spatial Constructions, 1918-1921	131
(a) Available from: http://41.media.tumblr.com/851fb98c0588e14c32adb9ab417c837/tumblr_meuovivNaz1r8a-j4co1_500.png	
(b) Available from: http://payload.cargocollective.com/1/1/63512/938538/MuseoMagazine-AlexanderRodchenko-Oval-HangingConstructionNo12-1920_1_800.jpg	
Fig. 3-2-6: Endless House Model, ca. 1959 © Austrian Frederick and Lillian Kiesler Private Foundation. Available from: http://www.kiesler.org/cms/index.php?lang=3&idcatside=31&mod11_1=print	132
Fig 3-2-7: Available from: http://www.arquine.com/wp-content/uploads/2015/05/011.jpg	132
Fig. 3-2-8 a 3-2-11: Sammlunge N H.Wiene R un D P.Treutlein Math Model-1912. Pp. 4, 33, 47.	134
Fig. 3-2-12, 3-2-13: In: Galilei, Galileo; Crew, Henry (tra.); de Salvio, Alfonso (tra.). Dialogues Concerning Two New Sciences. New York: Macmillan, 1914. Pp xxvi , p. 154	138
Fig 3-2-14: A load test (50 people standing on the roof) in a double curved square shell (7,3 m x 7,3 m) with a thickness of only 1,5 cm and reinforced with a steel net of 3 mm (Dischinger-Finsterwalder,1932). Source: Vinyes Raso, Raul, 2009, Integrating Aesthetics and Statics: Study of a Geodesic Dome, UPC, Pp. 27.	138
Fig. 3-15, 3-16: Archivo Guastavino, Universidad de Columbia.	138

(1): In: *Las bóvedas de Guastavino en America*, Madrid : Ministerio de Fomento [etc.], DL 2001, Lamina 10, P 24.

(2) : In: *Las bóvedas de Guastavino en America*. Madrid : Ministerio de Fomento [etc.], DL 2001, Lamina 10, p. 342.

- Fig.3-2-17: Funicular Polygon, Pierre Varignon (1725). Available from: <http://eat-a-bug.blogspot.com.es/2010/05/graphic-statics.html>. 141
- Fig. 3-2-18: Polígono funicular utilizado para el calculo grafico de las estructuras.). Available from: <http://simplesupports.wordpress.com/2013/06/06/an-introduction-to-graphic-statics/> 141
- Fig. 3-2-19: Modelo Colgante de Poleni para verificar la estabilidad de la cúpula de San Pedro según el 2º. principio de la ley de Hooke (1748). In: Otto, Frei. *Bionique : architecture et constructions naturelles*. Denges : Delta et Spes, 1985. Pp.56 141
- Fig.3-2-20: Sacos colgantes en modelo de estudio de Gaudí. (Rubio I Bellver, 1913) Available from: <http://www.hhofstede.nl/modules/gaudi.pdf> 141
- Fig. 3-2-21, 3-2-22: (Arriba) original Hanging Model of Colonia Güell, Antonio Gaudí (1916). (Abajo) Reconstrucción por equipo Frei Otto (1983). Available from: http://www.rolfdietermill.de/pictures/tragwerkslehre082_Page_3.jpg 142
- Fig 3-2-23: Model demonstrating the efficiency of a double-curved shell made from thin plastic compared to a similar plastic sheet acting as a wide flat beam over the same span. The load on the shell is 30 times the load on the flat sheet. The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture. P 33. 143
- Fig. 3-2-24 y 3-2-25: Joseph Alberts con sus alumnos en la Bauhaus, utilizando modelos físicos para explorar las técnicas de curvas y los pliegues para dar estabilidad a las formas. 143
- Available from: http://pre.cloudfront.goodinc.com/posts/full_1355502700Bryant_Yee-05.JPG
- Available from: <https://www.flickr.com/photos/87334865@N08/85655058>
- Fig. 3-2-26 y 3-2-27: In: Otto, Frei, Sabine Schanz. Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal: The Werkbund Shows Frei Otto, Frei Otto Shows Bodo Rasch: Exhibition in the Villa Stuck, Munich, on the Occasion of the Award of the 1992 Deutscher Werkbund Bayern Prize to F. Stuttgart: Axel Menges, 1995. P.152-3. 146-147
- Fig. 3-2-28: In: Otto, Frei; Songel, Juan. Frei Otto: Conversación con Juan María Songel. Barcelona: Gustavo Gili, 2008 . p.33 148
- Fig. 3-2-29: Izquierda: Figuras de alambre para estudiar los Films de jabón. Joseph Plateau. Photo MD. Museum for the History of Sciences, Ghent. 148
- Derecha: Figuras de alambre para estudiar la catenoide. From: J.Plateau "Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires", 1873. University Library Ghent. 148
- Derecha: Stereo pictures of laminar soap films formed on the wire shapes by Plateau. Photo: Neyt, A.L. Ghent, about 1880. Collection J.Plateau, Ghent. 148
- Fig. 3-2-30: Experimentos con pompas de jabón por Frei Otto. Available from: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/236x/32/5b/42/325b428241d4fb64afe9e115c4bf738a.jpg> 148
- Fig. 3-2-31: Maite Bravo 150-151
- Fig. 3-2-32: Maite Bravo 153
- Fig. 3-2-33: Modelos de Pruebas de Gorensteijn, 1959. In: Beckh, Matthias. Hyperbolic Structures: Shukhof's Lattice Towers. Forerunners of Modern Lightweight Construction. Edited by West Sussex: Wiley Blackwell Chichester, 2015. P. 87. 154
- Fig. 3-2-34: Sin autor. Prueba de carga de la marquesina del Hipódromo en la parte posterior de la Facultad e Filosofía y Letras. Sin fecha. [Fotografías]. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo. Id.: I-ETM-115-09, I-ETM-115-06, I-ETM-115-05, I-ETM-115-10, I-ETM-115-XX. [Consulta: Nov. 18, 2013]. Disponible en: <http://www.cehopu.cedex.es/etm/pict/I-ETM-115-09.htm> 155
- Fig. 3-2-35: (Superior) Fuller and class testing strength of dome, Black Mountain College, summer 1949. Photographs Masato Nakagawa, courtesy Black Mountain College Project. Source: <http://greg.org/2009/09/> 156
- Fig. 3-2-36: (Inferior) Buckminster Fuller's students at the 1949 Summer Institute, Black Mountain College, demonstrate the lightness of the "Necklace Dome." Pictured: Jeffery Lindsay (sunglasses), Louis Caviani (far right). From North Carolina Digital Collections. <http://socialarchhistory.blogspot.com.es/2011/07/living-lightly-on-land-bernard-judges.html> 156
- Fig. 3-2-37: Candela. Paraboloide Hiperbólico. Faber, Colin. Las Estructuras de Candela. Méjico : CECSA, 1970. p.85..... 157
- Fig. 3-2-38: 1963-65 Candela Torroja-Modelo Estructural-Parroquia de Nuestra Señora de Guadalupe, Madrid. Colaboración entre Candela, José Antonio Torroja(E), José Ramón Aspiazu (A), Enrique de la Mora y Palomar. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. 158
- Fig. 3-2-39: Available from: <https://pp.vk.me/c622027/v622027650/45681/KDCo61QLhqo.jpg> 160
- Fig. 3-2-40 y 3-2-41: Numerosas maquetas de estudio del proyecto. In: Treib, Marc. Space Calculated in Seconds: The Philip Pavilion. Princeton, [NJ] : Princeton University, 1996. 160-61
- Fig. 3-2-42: Van Dijk. In: Serrablo, Vicente: Contribución a la viabilidad de cubiertas laminares de cerámica armada mediante soluciones semiprefabricadas. Propuesta para láminas cilíndricas de pequeña luz. Departamento de Estructuras en la Arquitectura. UPC, julio de 2002. P 38-39. 162
- Fig. 3-2-43 & 3-2-44: Eladio Dieste. The ingeniers's contribution to contemporary architecture, pp.52. 162

Fig.3-2-45:	163
(1), (2), (3), (4) Vista de Eero Saarinen y Kevin Roche trabajando en la maqueta del TWA. Claude de Forest, Copyright Cranbrook Archives/Claude de Forest Papers. Available from: http://aqua-velvet.com/blog/images/09_nov/16_twa14.jpg , http://aqua-velvet.com/blog/images/09_nov/16_twa14.jpg	
(5) y (6): Accession Number: 1995-68. Architect/Designer: Eero Saarinen & Associates. Title: TWA Model, Subject: Architectural Models Corporate: Subject Eero Saarinen and Associates. Description: View of the 3/4 size study model for the TWA terminal. Notes: Copy neg CEC3576-3. Date 1957. Original Format negative Photographer: Claude de Forest. Credit Line Copyright Cranbrook Archives/Claude de Forest Papers.	
Fig 3-2-46: Modelos en celuloide para la primera y segunda series de hangar en el Model and Construction Testing Laboratory en el Politécnico de Milano. Available from: http://costruirecorrettamente.org/site/chi-e-pier-luigi-nervi/index.php?doc_id=76	164
Fig 3-2-47: Pier Luigi Nervi. ISMES Experimental Institute for Models and Structures. 2007 [viewed 28 October 2015]. Available from: http://www.ismes.org/	165
Fig. 3-2-48: Maqueta de la catedral de San Francisco a escala 1:36.89 para la prueba de carga dinamica, 1965. Archivo Historico ISMES.	166
Figure 3-2-49: Gabriele Neri. Politécnico di Milano, 1964.	167
Figure 3-2-50: Archivo Historico ISMES.	168
Fig. 3-2-51: Otto, Frei, and Sabine Schanz. Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal: The Werkbund Shows Frei Otto, Frei Otto Shows Bodo Rasch: Exhibition in the Villa Stuck, Munich, on the Occasion of the Award of the 1992 Deutscher Werkbund Bayern Prize to F. Stuttgart: Axel Menges, 1995. P.107	170
Fig. 3-2-52: Otto, Frei, and Sabine Schanz. Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal: The Werkbund Shows Frei Otto, Frei Otto Shows Bodo Rasch: Exhibition in the Villa Stuck, Munich, on the Occasion of the Award of the 1992 Deutscher Werkbund Bayern Prize to F. Stuttgart: Axel Menges, 1995. P.107.	171
Fig. 3-2-53: a) Joern Utzon muestra un diagrama del Sydney Opera House. Photo: Reuters	172
Fig. 3-2-54: Available from:	173
(1) http://www.smh.com.au/ffximage/2008/11/30/joern_utzon2_gallery__532x400,0.jpg	
(2) https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/236x/92/a8/bb/92a8bbca4f93bff82d39d324eedd7e0b.jpg	
(3) https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/50/1e/2b/501e2bc8f676d6703bfc74e7c2438e7a.jpg	
Fig. 3-2-55: Wooden model of the Sydney Opera House roof, used for wind tunnel testing (c.1958). Physical testing . Southampton University. Team headed by Professor Peter Morice.Photo: © Peter Morice	173
Fig. 3-2-56: Arup - Sydney Opera House structural roof model B under vertical load testing at Southampton University (c.1958). Photo: © Peter Morice.	174
Fig. 3-2-57: Arup - Sydney Opera House structural roof model B under vertical load testing at Southampton University (c.1958). Photo: © Peter Morice.	175
Fig.3-2-59: Figura X: Hanging form model made from reinforced glassfiber with epoxy, metal and wood by Heinz Isler of the gas station in deitingen, switzerland, 1967. Image © designboom Available from: http://www.designboom.com/architecture/13th-international-architecture-exhibition-arup-by-zaha-hadid/	176
Fig.3-2-60: Hanging form model made from reinforced glassfiber with epoxy, metal and wood by Heinz Isler of the gas station in deitingen, switzerland, 1967. image © designboom. Available from: http://www.designboom.com/architecture/13th-international-architecture-exhibition-arup-by-zaha-hadid/	176
Fig.3-2-61: Ordenador Pegasus expuesto en el London Science Museum pt. 5. by Marcin Wichary. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:London_Science_Museum_by_Marcin_Wichary_-_Pegasus_computer,_pt._5_(2290052630).jpg/	180
Fig.3-2-62: Peter Rice (izquierda) y Geoffrey Booth ponderan el comportamiento de las formas del techo propuestas. La foto fue tomada alrededor de 1958, poco después de Rice terminó sus estudios en el Imperial College. Foto: cortesía de Peter Morice.	180
Fig. 3-2-63: Frei Otto. Casabella 301. 1966: 35.	188

Capítulo 3-3

Fig. 3-3-1: Auguste Choisy, derivación del orden dórico a partir de la construcción en madera, de Histoire de l' architecture, 1899. In: Frampton, K, and A Bozal. Estudios Sobre Cultura Tectónica. Ediciones Akal Arquitectura. 1999. P. 15.	199
Fig. 3-3-2: Maite Bravo	208
Fig. 3-3-3: Maite Bravo.	208
Fig.3-3-4 & 3-3-5 : Maite Bravo.	208
Fig. 3-3-6: Maite Bravo	209
Fig. 3-3-7: Maite Bravo	212

Fig. 3-3-8: Available from: https://laciudadsocialista.wordpress.com/2015/04/30/el-faro-y-lachimenea-un-dialogo-entre-las-torres-de-eiffel-y-shukhov/14_shukhov-tower-construction/#main	212
Fig. 3-3-9:	213
(1) Eugene Freyssinet, Airship Hangars in Orly, France, (1921-1923). Available from: http://365manerasdeestarenelundo.blogspot.com.es/2014/07/eugene-freyssinet-airship-hangars-in.html	
(2) Available from: http://www.efreyssinet-association.com	
Fig. 3-3-10: Desideri, Paolo. <i>Pier Luigi Nervi</i> . Barcelona : Gustavo Gili, 1982. pp.29-47	213
Fig. 3-3-11:	214
Available from: http://www.culture.gouv.fr/champagne-ardenne/images/boulingrin4.jpg and http://media-cache-ec6.pinterest.com/550x/5c/9a/a2/5c9aa21d92d20bf1b6285643fc34d30f.jpg	
Available from: http://media-cache-ec0.pinimg.com/736x/85/3e/96/853e96b985305a210d580589b935bd99.jpg	
Fig. 3-3-12: Maite Bravo	216
Fig. 3-3-13: Vinyes, Raül. Integrating Aesthetics And Statics: Study of a Geodesic Dome. Projecto Tesina de Master Especialitat Estructures, RMEE, UPC. 2009.	217
Fig. 3-3-14: Buel White/Post-Dispatch. Available in: tumblr_lsk528H39Y1qkrc3no1_1280.jpg , http://img168.imageshack.us/img168/3927/escanear0014.jpg , http://img168.imageshack.us/img168/3927/	218
Fig. 3-3-15 & 3-3-16: Maite Bravo	219
Fig. 3-3-17: Maite Bravo	223
Fig. 3-3-18 y 3-3-19: Available in: http://resources2.news.com.au/images/2013/10/11/1226738/638622-fb26731c-316f-11e3-9133-1b38283ddfd2.jpg	224 - 225
Fig. 3-3-20 y 3-3-21:: Candela. Paraboloides Hiperbólicas. Faber, Colin. Las Estructuras de Candela. Méjico : CECSA, 1970..	226
Fig. 3-3-22: Available in: https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQSFdducS-9XC4ORy7tAjKdrYEluzsYPlwm_8mMaYw7TINxwGw , http://archiwebture.citechailot.fr/img/filigraane/SARRE/ROYAN-MARCHE-COUVERT/AR-18-10-05-24.jpg	227
Fig. 3-3-23: Available in http://www.engr.psu.edu/ae/ThinShells/module%20I/case_studies_files/image008.jpg	227
Fig. 3-3-24: In: Treib, Marc. Space Calculated in Seconds: The Philip Pavilion. Princeton, [NJ] : Princeton University, 1996..	228
Fig. 3-3-25 y 3-3-26: Desideri, Paolo. <i>Pier Luigi Nervi</i> . Barcelona : Gustavo Gili, 1982.	229

Capítulo 4

Fig. 4-1: Maite Bravo	244
Fig. 4-2: Maite Bravo	244
Fig. 4-3: Maite Bravo	248-249
Fig. 4-4: Maite Bravo	250
Fig. 4-5: Maite Bravo	251
Fig. 4-6: Maite Bravo	252
Fig. 4-7: Maite Bravo	253
Fig. 4-8: Maite Bravo	255
Fig. 4-9: Maite Bravo	256
Fig. 4-10: Maite Bravo	257
Fig. 4-11: Maite Bravo	258
Fig. 4-12: Maite Bravo	259
Fig. 4-13: Maite Bravo	260-261
Fig. 4-14:	266
(1) Alexander Rodchenko, Guard at the Shukhov Tower, 1929. Vintage print on Silver gelatin paper. Collection Museum Moscow House of Photography / Multimedia Art Museum, Moscow. © A. Rodchenko – W. Stepanova Archive.	
(2) Popova Liubov Sergeevna, 1921. In: Rodtxenko, Aleksandr Mikhailovitx; Tupitsyn, Margarita (ed.). <i>Rodchenko & Popova: Defining Constructivism</i> . London : Tate, 2009.	
(3) Rodchenko, <i>Shukhov Tower</i> , 1929. Available from: http://www.usc.edu/dept/LAS/IMRC/course_website/slides15/rodch011_600w.htm	
Fig. 4-15:	267

- (1) Taut, Bruno; Iñaki Abalos (ed.) M^a Dolores Abalos (trad.). Escritos : 1919-1920. Madrid : El Croquis, DL 1997. Pp. 108-109.
- (2) Félix Candela, Constructon Workers. n.d.
- (3) Buckminster Fuller; Shoji Sadao. Dome Over Manhattan, 1960, Black-and-white photograph mounted on board, 13 3/4 x 18 3/8", Department of Special Collections, Stanford University Libraries, Image courtesy the Estate of R. Buckminster Fuller. (4) Buckminster Fuller. Dome transportation.
- (5) Edgard Varèse. Poème électronique, 1958. In: http://newmusicworld.org/wordpress/wp-content/uploads/2014/01/x_insidethepavilion.jpg



GLOSARIO

ALABEAR: Acción de transformar una geometría pre-existente sin dejar ángulos o aristas y como consecuencia, ejercer un cambio en el comportamiento del objeto manipulado. Se utiliza como una técnica en el campo de la arquitectura con el fin de proporcionar mayor rigidez a las superficies, o como una estrategia puramente formal del proyecto, que incluye ondulaciones y alabeados.

ALGORITMO: “Regla geométrica o aritmética que se repite.” (Balmond, 2000).¹

ALGORITMOS GENÉTICOS: “Método de programación adaptativo que puede ser usado para resolver problemas de búsqueda y optimización” (Barrera, 2010).²

ANALÓGICO: Un sistema analógico se refiere a dispositivos que pueden manipular cantidades físicas, y a valores que varían sobre un intervalo continuo de valores, como los que se encuentran en la naturaleza, las que se pueden medir cuantitativamente. Se utiliza comúnmente en el término “analógico versus digital”.

ARQUITECTURA AVANZADA: Conjunto de saberes, técnicas, proyectos y metodologías empleados para elaborar una arquitectura que toma como factor primordial la información, ya sea ésta de tipo social, ambiental o emocional. Dado el carácter altamente dinámico de la producción y distribución de la información, la arquitectura avanzada destaca por su capacidad de manipular simultáneamente, y a través de sistemas de tipo abierto, varias capas superpuestas de datos, obteniendo como resultado un sistema altamente complejo, interactivo y empático.

ARQUITECTURA DIGITAL: Arquitectura que basa su mecanismo generativo en procesos computacionales mediante el uso de sistemas de Computer Aided Design (CAD).

BIM (Building Information Modeling): “Modelado de información de construcción, también llamado modelado de información para la edificación, (1) es el proceso de generación y gestión de datos del edificio durante su ciclo de vida (2) utilizando software dinámico de modelado de edificios en tres dimensiones y en tiempo real, para disminuir la pérdida de tiempo y recursos en el diseño y la construcción. (3) Este proceso produce el modelo de información del edificio (también abreviado BIM), que abarca la geometría del edificio, las relaciones espaciales, la información geográfica, así como las cantidades y las propiedades de los componentes del edificio.”³

CÁLCULO: El término cálculo hace referencia a las operaciones matemáticas necesarias para averiguar el resultado, el valor o la medida de algún elemento, conjunto o sistema. Se trata por lo tanto de un procedimiento lógico-matemático mediante el cual podemos conocer las consecuen-

1 Balmond, Cecil. Informal, Prestel, New York, 2002, Pp. 112.

2 De la Barrera, Carlos. Algoritmos Genéticos como Estrategia de Diseño en Arquitectura, Tesis Doctoral UPC, 2010. Pp. 16.

3 G.A. van Nederveen and F. P. Tolman, 1992.

cias que se derivan de unos datos previamente conocidos y debidamente formalizados y simbolizados.

COMPUTER NUMERICALLY CONTROLLED PROCESSES (CNC): Se trata de un sistema que permite controlar mediante herramientas de software las coordenadas de tiempo y espacio propias de un elemento físico, generalmente un instrumento acoplado a una máquina. Usado habitualmente como mecanismo de fabricación digital, los sistemas de CNC permiten materializar con rapidez y precisión cualquier elemento formal previamente elaborado con un software de diseño, siendo especialmente indicado para construir superficies complejas, como ondulaciones o dobles curvaturas.

DIGITAL: El término digital está vinculado al mundo de la informática y consiste en representar información de modo binario, mayormente a través de ceros y unos, para facilitar su aplicación lógica y aritmética. La generalización de su uso en todo tipo de disciplinas culturales, entre ellas la arquitectura, ha abierto un sinnúmero de posibilidades tanto en su diseño como en su gestión y comercialización.

DIGITALIZACIÓN: Proceso de conversión de un sistema analógico a uno digital. Su principal transformación radica en organizar un flujo continuo de información, con la ventaja de ampliar las posibilidades de manipulación del mismo en relación al sistema analógico.

DISCRETIZACIÓN: Método que consiste en aislar de un conjunto infinito de puntos, un número finito de subconjuntos, de manera que tengan las mismas propiedades que el conjunto inicial del que se desprenden, y que puedan ser evaluadas para su interpretación numérica y sistemas computacionales. Se trata de un sistema ampliamente utilizado para resolver el despiece constructivo de formas complejas.

DISEÑO ALGORÍTMICO: En general se refiere a los procesos o series de procedimientos que trabajan con secuencias de instrucciones traducidas en códigos, los cuales pueden o no ser paramétricas. Entre ellos se pueden encontrar numerosos lenguajes de programación utilizados actualmente en el campo del diseño.

DISEÑO ASOCIATIVO: Método de diseño que se basa en el ajuste y comportamiento de determinados parámetros y vínculos. Mientras los primeros definen un valor o un rango de valores en relación a un elemento, los segundos definen la relación entre éstos. Como consecuencia su aplicación pone más énfasis en la flexibilidad y versatilidad propias de la idea de "fórmula" que en la rigidez y atemporalidad de la noción de "figura". Su aplicación en la arquitectura ha dejado de lado aquellas configuraciones formales más cercanas a lo que en algunos círculos es conocido como formalismo, para insistir en una arquitectura "asociada" a diversos tipos de información, variable en el tiempo, y que condiciona ampliamente su implementación.

DISEÑO GENERATIVO: Es "una estrategia de diseño que ha sido implementada en diversos campos como el arte, arquitectura, ingeniería, diseño etc. La idea fundamental de esta estrategia consiste en que el diseño producido es generado mediante un conjunto de reglas que administran los diferentes aspectos del objeto. Esta estrategia permite explorar de manera rápida y económica diferentes posibilidades de diseño. Usualmente el diseño generativo está representado por un esquema de relaciones y variables que controlan los parámetros dentro del gráfico."⁴

4 De la Barrera, Carlos. Algoritmos Genéticos como Estrategia de Diseño en Arquitectura, Tesis Doctoral UPC, 2010. Pag. 213.

DISEÑO PARAMÉTRICO: En líneas generales se puede definir como un método que permite diseñar el comportamiento de los elementos en lugar de diseñar objetos dimensionados, constituyéndose en un poderoso sistema de enlace con dimensiones cambiantes. Este procedimiento permite el diseño a través de relaciones, a partir de componentes base, con parámetros integrados que definen su cohesión y límites, que son capaces de unirse a otros módulos para crear conjuntos y sistemas.

ESTANDARIZACIÓN: Se trata de un proceso mediante el cual se diseña o altera un sistema con el fin de que cumpla una serie de requisitos o normas establecidos previamente. Generalmente estos requisitos son aceptados, replicados y esperables en la mayoría de casos en los que se realizan actividades similares al sistema tratado. Esta estrategia se ha implementado extensamente en los procesos de la producción industrializada, y sus implicaciones en la arquitectura han sido manifestados en los principios de la CIAM enunciados en "La Sarraz Declaration" de 1928.

HERRAMIENTA DIGITAL: Constituyen los dispositivos, maquinas, y softwares que permiten el procesamiento de información mediante códigos y lenguaje computacional. En el campo de la arquitectura, estas herramientas son ampliamente utilizadas en el ámbito del diseño, la fabricación, y la construcción.

LÓGICA: Método sistemático y exhaustivo que organiza distintos grupos y/o sub-grupos de conceptos, de manera que constituyan un "todo" coherente y huérfano de contradicciones internas.

MAQUETA FÍSICA: Se trata de una reproducción material de un elemento o conjunto arquitectónico, generalmente elaborada con la intención de destacar aquellos aspectos del proyecto que su autor considera más relevantes. Puede tener diversas utilidades como la representación figurativa, o como instrumento generativo para deducir el proyecto, la simulación estructural, el prototipo de elementos, o como la representación de una fase particular del desarrollo de un proyecto. Dada sus variados significados, se recomienda ampliar el uso de este término, y relacionarlo con el concepto de modelo.

MAQUETA GENERATIVA: Se refiere al modelo físico que actúa como instrumento para deducir ciertos aspectos del proyecto, como respuesta a ciertos parámetros de fenómenos de la naturaleza (gravedad, viento, sismos, dinámicas de fluidos, entre otros), así como a las condicionantes de los materiales, los que permiten deducir formas que tienden a la optimización de algunos de estos aspectos.

MODELO: Se refiere a la implementación de ciertos aspectos de la realidad para replicar condiciones específicas de un sistema o de objetos. En la actualidad se manifiestan en variados ámbitos, incluyendo el modelo digital, entendido como una aproximación de simulación de una realidad experimentada (Eliasson, 2009), o en una gran variedad de modelos reales comúnmente referidos como "maqueta física". Los modelos se han manifestado para ayudar a entender las leyes de la naturaleza, el mundo físico o mecánico, las matemáticas, u otros aspectos.

MODELAMIENTO EN 3D: Representación de cualquier objeto tridimensional a través de un software especializado. Generalmente representan el objeto a través de una colección de puntos en el espacio conectados entre ellos por varias entidades geométricas tales como triángulos, líneas, superficies curvas. Este tipo de procesos son especialmente usados en el ámbito de la arquitectura, tanto como herramienta de diseño y modelaje, debido a su precisión y agilidad como también como herramienta de visualización a través de sistemas de renderizado por su capacidad de presentar imágenes altamente realistas.

MODELO DE SIMULACIÓN: Se refieren a modelos que intentan replicar ciertas condiciones físicas, mecánicas, espaciales, formales, o temporales. Se han utilizado en la arquitectura para estudios de fenómenos en la naturaleza (gravedad, viento, sismo, etc).

MODELO PARAMÉTRICO: Es un sistema que opera a partir de un diseño basado en relaciones donde a partir de un parámetro base se construyen relaciones con otros parámetros.

NO-ESTÁNDAR: Se refieren al proceso de diseño y producción altamente personalizado, que no responde a normas pre-establecidas.

ORDENADOR: Máquina electrónica capaz de almacenar información y tratarla automáticamente mediante operaciones matemáticas y lógicas controladas por programas informáticos. Su uso en varias disciplinas se ha generalizado en las últimas décadas, suponiendo en el caso de la arquitectura una herramienta que ha influido y continuara influyendo de manera determinante en su desarrollo.

PARADIGMA: Se trata del conjunto de prácticas, estructuras, métodos y interrogantes compartidos por una misma comunidad y que constituye el modelo privilegiado para canalizar el desarrollo de una disciplina científica, social o artística.

PARÁMETRO: Es la unidad básica del modelamiento paramétrico, el cual está definido por una geometría determinada, su íntima relación a otros componentes, su capacidad de adaptación dentro de un rango que definen límites, constreñimientos o restricciones. Dada la flexibilidad de un parámetro, es fundamental que su definición se encuentre ligada a sistemas constructivos, de materialidad, de estructura, y de fabricación.

PLEGADO: Acción de doblar una superficie sobre sí misma a través de una o varias de sus directrices que pasarán a ser las aristas de la superficie plegada. Se utiliza como mecanismo de manipulación geométrica de superficies para incrementar su resistencia.

POSTDIGITAL: Término para referirse al hecho que los ordenadores se han vuelto omnipresentes, ubicuos, y casi invisibles, de modo que existe la necesidad de trascender de hablar de ellos para ocuparse de los problemas reales de diseñar en la arquitectura. (John Fraser, 2000).

PREDIGITAL: Se entiende al periodo anterior a la aparición del uso generalizado de la computación.

PROTOTIPO: Creación de un objeto que intenta replicar el objeto final, para su estudio en aspectos constructivos, formales, materiales, etc.

PROTOTIPO RÁPIDO: Técnica de producción CAM (Computer Aided Manufacturing), que posibilita la realización de maquetas físicas utilizando máquinas de fabricación digital, y sistemas de modelamiento CAD. En general se refiere a un proceso inseparable CAD/CAM (Computer Aided Design y Computer Aided Manufacturing). Incluye la impresión 3D de fabricación por adición, extrusiones, o moldeo. La mayor ventaja es su rapidez, el evitar el uso de moldes, su precisión, pero aún se encuentra en etapa de desarrollo en la implementación a variadas escalas, y a la incorporación de nuevos materiales.

SCRIPT: En su sentido vinculado al mundo de la informática, un Script es un archivo de órdenes, es decir, un guión que tienen como función realizar diversas tareas como combinar componentes e interactuar con el sistema operativo o con el usuario.

SIMULACIÓN: "Se trata del proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término ex-

periencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos- para el funcionamiento del sistema." R. E. Shannon

SUPERFICIE REGLADA: Se trata de aquella superficie generada por una recta, denominada generatriz, al desplazarse sobre una o varias curvas, denominadas directrices.

TOPOLOGÍA: La topología es aquella rama de las matemáticas que estudia las propiedades de figuras geométricas generadas bajo continuas transformaciones. Dos figuras son topológicamente equivalentes si una puede ser obtenida de la otra a través de albear o estirar su superficie sin cortes ni pliegues. A diferencia de las geometrías propias de Euclides, las geometrías topológicas no son el resultado de una idea matemática inmutable, ideal, aislada y eterna, sino que precisamente insisten en el concepto de transformación y su desarrollo a través de sucesivas interacciones a través del tiempo. Por este motivo, su uso se ha generalizado en los ámbitos del diseño asociativo.

VIRTUAL: Generalmente el concepto de virtual es definido por oposición a aquello real, siendo el primero un elemento que no existe en un espacio físico sino que se encuentra dentro de un espacio lógico-matemático, de tipo immaterial pero eventualmente materilizable. Sin embargo, recientemente la capacidad de los sistemas virtuales para entender y representar la realidad con un elevado nivel de precisión, ha dejado lugar a una definición según la cuál lo virtual podría entenderse como un tipo particular de hiper-realismo.

RECONOCIMIENTOS

El desarrollo de esta tesis ha contado con el financiamiento de BECAS CHILE CONICYT PAI/INDUSTRIA 79090016.

Mi agradecimiento a Alfredo Linares por su constante guía y apoyo, y sobretodo por la confianza depositada a lo largo de todo el proceso de investigación. También mi sincero agradecimiento al codirector Amadeo Monreal, quien de manera paciente y alentadora ha logrado inculcar un entendimiento del mundo matemático que ha impactado profundamente esta investigación.

La cuidadosa revisión de esta tesis ha contado con la contribución de los externos Sara Favargiotti (Research Fellow at University of Genoa – DSA), y también a Manuel Gausa (University of Genoa – DSA).

La pasantía se ha realizado gracias al apoyo de Cristian Suau, del Department Of Architecture, University Of Strathclyde, Glasgow, Escocia.

Son innumerables las aportaciones que he recibido a lo largo del desarrollo de esta investigación, desde contundentes contribuciones teóricas de Neil Leach (USC), Robert Woodbury (SFU), y Ludger Hovestadt (ETH), hasta la atenta revisión y comentarios de Vicente Serrablo (UIC), Antoni Paricio (UPC), Cristina Gastón (UPC), y Tom Maver (Glasgow School of Arts).

Agradezco la aportación de Marta Male Alemany, quien además de ser una magnífica profesora, es quien ha iniciado mi interés en el diseño paramétrico. A Luis Fraguada por sus pacientes enseñanzas acerca del diseño computacional. A Josep Muntañola, quien sugirió muy acertadamente el abordar la discusión de esta investigación como una lógica, y no desde la inteligencia digital. A Ricardo Devesa por su constante apoyo y por ser un compañero intelectual notable.

A las bibliotecarias que han asistido en el desarrollo de esta tesis, en especial a la paciente y constante dirección de Monica Bonich (ETSAB).

Por su apoyo constante a Jordi Vivaldi por su contribucion en el contenido, y a Starsky Naya por su ayuda en la maquetación de esta tesis. A Rob Mckaye por sus acertados comentarios en la traducción de algunos textos. Agradezco a Mathilde Marengo por su apoyo en la traducción de textos.

Las aportaciones de los congresos en los que he participado, y a las varias conferencias en diversos lugares que he sido invitada a exponer este trabajo, que han proporcionado una renovada mirada y han servido de dirección y constante agente de transformación de esta tesis.

Finalmente mi profundo agradecimiento a mis maravillosos padres, por todo su amor incondicional, su dedicación y su constante apoyo, quienes me han ofrecido todas las posibilidades que ellos no tuvieron. A las enseñanzas tempranas de mi abuelo Domingo, ese riojano que ejerció una influencia imborrable con su impecable rectitud y con su generosa inteligencia.

Y sobretodo a Franco, mi dulce, paciente, y amable compañero en este largo viaje, quien ha llenado de ternura y amor las innumerables frustraciones, el cansancio, y las dudas que inevitablemente forman parte del proceso de intentar entender algunas pequeñas cosas.

Barcelona, 9 de Noviembre de 2015.

