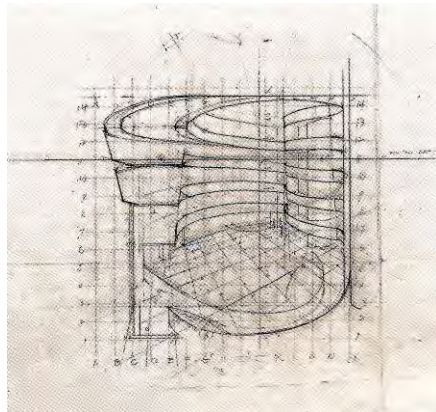


**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per 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](http://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](http://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



**EL GUGGENHEIM MUSEUM DE NEW YORK**  
**Interpretación del papel de la estructura a través de la**  
**colaboración entre Frank Lloyd Wright y Jaroslav J. Polivka**

Diego Martín Sáiz, Arquitecto  
Director de Tesis: Robert Brufau i Niubó, Dr. Arquitecto  
Departament d'Estructures a l'Arquitectura, E.T.S.A.V.  
Universitat Politècnica de Catalunya

Sant Cugat, Julio de 2011

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



*A mi familia*

## **Resumen**

Arquitectura y estructura han ido siempre íntimamente ligadas, pero con la aparición del acero y el hormigón surgieron nuevas necesidades formales o estéticas. El Estilo Internacional se inclinó por separar la retícula estructural de los cerramientos. En cambio, la Escuela de Chicago forjó las bases de una arquitectura optimizada y racional. Frank Lloyd Wright, entre estas dos situaciones, optó por seguir las pautas naturales de los materiales, de forma “orgánica”, recuperando la integración entre los diferentes componentes de la arquitectura.

Dentro del recorrido sobre el papel de la estructura en la historia de la arquitectura, parece apropiado detener el análisis en la obra de Frank Lloyd Wright y su particular utilización de la estructura. El Guggenheim Museum es el edificio que recoge muchas de las constantes, por lo que merece la pena estudiarlo analizándolo a través de su estructura. En este sentido, la figura de Jaroslav J. Polivka resulta de particular interés debido a la colaboración mantenida con Wright. De esta relación surgen en ocasiones las claves, no sólo de las soluciones concretas de la estructura, sino de los condicionantes finales dentro del conjunto arquitectónico.

## **Palabras clave**

Arquitectura, Estructura, Tipologías estructurales, Frank Lloyd Wright, Jaroslav Joseph Polivka, Guggenheim Museum, Arquitectura orgánica, Placas y láminas, Voladizos, Columnas dendriformes.

## **Abstract**

Architecture and structure have always been closely related, but the advent of the steel and reinforced concrete created new needs in the formal aspects. The International Style opted to separate the structural framework from the walls. On the other hand, the Chicago School forged the basis of a rational and optimized architecture. Between these two situations, Frank Lloyd Wright chose the approach of following the natural patterns of materials, in “organic” manner, recovering the interaction between the different elements of the architecture.

Into the range about the role of the structure in the history of architecture, it seems appropriate to stop the analysis in the work of Frank Lloyd Wright and his particular use of structure. The Guggenheim Museum is the building that reflects many of the constants, so it is worth analyzing its structure. In this sense, the figure of Jaroslav J. Polivka has a particular interest because of his collaboration with Wright. From this relationship sometimes arise the keys, not just the specific solutions for the structure, but the final conditions within the architectural form.

## **Key words**

Architecture, structure, Structural typologies, Frank Lloyd Wright, Jaroslav Joseph Polivka, Guggenheim Museum, Organic Architecture, Plates and shells, Cantilevers, Dendriform columns.

## Prólogo

Desde que me licencié en arquitectura he trabajado junto a Robert Brufau en el campo de las estructuras, teniendo oportunidad de participar en grandes proyectos en los que la estructura juega un papel relevante. La formación que he recibido en el ámbito profesional ha ido siempre íntimamente ligada a esta visión de proximidad entre la arquitectura y las diferentes soluciones estructurales de un proyecto. Este punto de vista, muy consolidado ya desde mi etapa de estudiante en la Escuela de Arquitectura del Vallès (UPC), se ha ido desarrollando paralelamente al de mi etapa como docente de estructuras, principalmente en la Universitat Internacional de Catalunya, UPC y otras instituciones, siempre intentando mantener la coherencia entre las reflexiones teóricas y la práctica profesional.

Por este motivo esta tesis la he desarrollado, a sugerencia de Robert Brufau, a partir del trabajo de tesis doctoral de José Ramón Castro sobre la génesis del Guggenheim Museum de New York. En este caso, el punto de partida (el edificio del Museo) es el mismo, pero el discurso está claramente enfocado hacia el papel de la estructura en la arquitectura, aportando así una visión de la obra de Wright bajo un nuevo filtro, el de la estructura. El objetivo no sólo es el de clarificar ciertos aspectos estructurales del trabajo de Wright sino también poner de manifiesto el interés por un área de conocimiento, la función formal de la estructura, que en algunas Escuelas de Arquitectura queda en ocasiones relegado a lo anecdótico.

Debo por eso agradecer en primer lugar a Robert Brufau por haberme animado explorar este aspecto tan arquitectónico de la estructura. Desde el trabajo profesional que desarrollo junto a él desde hace casi quince años, me he formado en la idea de que la estructura es una herramienta básica de la arquitectura que, como veremos, permite organizar, caracterizar, definir, orientar, etc, cualquier tipo de arquitectura de nivel. Todos los buenos arquitectos, desde los grandes maestros hasta las primeras figuras de hoy en día, han tenido en cuenta de manera muy presente esta función formal de la estructura, para lo que, necesariamente, han contado con la colaboración de ingenieros consultores de estructuras cuya aportación va más allá de la mera resolución de unos cálculos. Toda la cultura arquitectónica que he ido adquiriendo desde el principio de nuestra colaboración, aparte del conocimiento específico de las herramientas de cálculo habituales, forma parte de la base de nuestro oficio como consultores estructurales.

El hecho de haber podido localizar material inédito que documenta el proceso de génesis de la estructura del Guggenheim Museum ha servido de apoyo al discurso, aportando la objetividad que un trabajo de este tipo requiere. A propósito de este edificio, el propio Wright animó a que todo aquel que quisiera adentrarse en la comprensión del Museo, debía realizarlo a través de la óptica del conocimiento de toda su obra anterior.

En este sentido, es necesario manifestar mi agradecimiento a William Offhaus, persona que me ha facilitado el acceso a los documentos de Polivka (Polivka Papers) dentro del archivo de la Universidad de Buffalo. El trabajo se apoya fundamentalmente sobre este material, que me ha permitido ir descubriendo diferentes aspectos sobre la relación entre la estructura y la arquitectura, entre

Wright y Polivka, así como de la propia obra de Wright y del Guggenheim Museum. Esta relación hasta ahora raramente ha estado presente en los numerosos estudios sobre Wright, cuestión que ha servido de aliciente para la redacción de la tesis.

A José Angel Sanz por sus recomendaciones a la hora de indagar en la obra de Frank Lloyd Wright a través de la amplísima bibliografía existente al respecto. Es igual de difícil adentrarse en un tema del que prácticamente no haya material previo como hacerlo en un tema con demasiada información disponible. En este caso, él me recomendó la búsqueda de material inédito, que aportase una cierta frescura al trabajo y que acabé encontrando en la Universidad de Buffalo. También le considero responsable de que este trabajo, iniciado en el Departamento de Estructuras en la Arquitectura, sin dejar de abordar de manera directa cuestiones referentes a la estructura, se haya ampliado a través de otros ámbitos de la arquitectura. En definitiva, esto resulta coherente con el planteamiento del trabajo ya que, como se verá, es difícil disociar los diferentes aspectos de la arquitectura y la estructura.

A Agustín Lacort, profesor de estructuras de la Escuela de Arquitectura de San Sebastián, por su interés tomado en las lecturas previas del trabajo. A todos los alumnos que he tenido en la Universidad Internacional de Catalunya durante los cursos de 2004 a 2007, a los alumnos de los diferentes cursos que he impartido en el Colegio de Arquitectos Vasco Navarro entre los años 2007 y 2011, así como a los asistentes a los múltiples cursos y conferencias que he impartido, donde siempre, fuese cual fuese el tema a tratar (del ámbito de las estructuras), he intentado transmitir como discurso de fondo las ideas que se ponen de manifiesto en este trabajo.

Y a mi familia, que ha jugado también un papel fundamental. Desde mis padres que me han educado en la cultura del trabajo y la constancia hasta mi mujer e hijos a los que he dejado dedicar mucho tiempo. Florencia, Lucas, Tomás, Pedro, Fernando, Teresa, Pablo, Rodrigo, Guillermo, Leticia, Juan, Delia, Juan Pablo, de alguna manera u otra, con su tiempo, consejos o apoyo en los momentos complicados, todos me han animado a sacar este trabajo adelante. También debo expresar mi agradecimiento a otras personas que me han ayudado de forma puntual y que me han echado una mano con sus comentarios o en aspectos más concretos.

Diego Martín Sáiz. Getxo, julio de 2011.





<b>Índice general</b>	Pág.
<b>Introducción</b>	11
0.1 Estado del arte	17
0.2 Organización de la tesis	21
<b>Parte I</b>	
<b>Relación entre la estructura y la arquitectura</b>	25
1.1 La estructura en la historia de la arquitectura.	27
1.2 La función formal de la estructura.	35
1.3 Los grandes Maestros.	47
1.4 La arquitectura de Frank Lloyd Wright.	59
1.5 El planteamiento estructural de la Escuela de Chicago.	63
1.6 Trabajos en colaboración entre arquitectos e ingenieros.	71
1.7 Arquitectura e Ingeniería orgánica.	79
<b>Parte II</b>	
<b>Tipologías estructurales de la obra de Frank Lloyd Wright</b>	85
2.1 Wright y la estructura.	87
2.2 Tipologías estructurales empleadas.	95
2.3 Estructuras basadas en el voladizo.	111
2.4 Sistemas de columnas dendriformes.	129
2.5 La evolución de la torre.	141
2.6 Edificios en espiral.	153
2.7 De la utilización del hormigón al tejido usoniano.	163
2.8 La utilización del acero y el entramado.	171
2.9 Colaboraciones con Jaroslav Joseph Polivka.	179
<b>Parte III</b>	
<b>El Guggenheim Museum a través de su estructura</b>	183
3.1 Contexto histórico.	185
3.2 Evolución de la estructura del Museo.	195
3.3 La participación de Jaroslav J. Polivka.	221
3.4 Métodos de análisis de estructuras laminares.	237
3.5 Análisis de la estructura mediante el Método de los Elementos Finitos.	265
3.6 La crisis de los materiales: Lámina de hormigón VS entramado de acero.	283
3.7 Propuesta final.	289
3.8 La cubrición del espacio central.	305
3.9 El proceso constructivo: barandilla y fachadas gunitadas.	309

<b>Parte IV</b>	
<b>Conclusiones</b>	317
4.1 Análisis de la estructura del museo en relación a su arquitectura.	319
4.2 Las aportaciones de Jaroslav J. Polivka.	325
4.3 Líneas de continuidad.	329
<b>Anexos</b>	
<b>Anexo A</b>	
<b>Traducción y comentario de los textos de Jaroslav J. Polivka</b>	333
A.1 “What it’s like to work with Wright”.	339
A.2 “Aesthetics bridges”.	359
A.3 “Technocracy and the engineer”.	367
<b>Anexo B</b>	
<b>Bibliografía</b>	373
B.1 Frank Lloyd Wright.	375
B.2 Teoría formal de las estructuras.	378
B.3 Obras de arquitectos e ingenieros.	381
B.4 Teoría y análisis de estructuras.	384
B.5 Trabajos de investigación relacionados con la tesis en el ámbito de la UPC.	385
<b>Índice de ilustraciones</b>	387

## 0.0 Introducción

Hasta finales del siglo XVIII arquitectura y estructura iban íntimamente ligadas y, de hecho, no había diferencia entre las personas que abordaban ambas disciplinas. La ingeniería civil como profesión independiente no existía y los arquitectos desarrollaban de la misma manera proyectos tanto de infraestructuras (puentes, presas o fortificaciones) como de edificios. En España por ejemplo, Juan de Herrera proyectó la construcción del Escorial y la del puente de Segovia sobre el Manzanares en Madrid, ya que los elementos constructivos utilizados en ambos casos eran los mismos: muros, arcos o bóvedas, compartiendo una función tanto estructural como formal y de configuración de los espacios, por lo que eran tratados de la misma manera aspectos técnicos y compositivos.

Con la aparición de los nuevos materiales, fundamentalmente las estructuras de acero y más tarde las de hormigón armado, surgió la necesidad de la “especialización” profesional, dado que los avances tecnológicos en esos campos se sucedían de manera vertiginosa. Era imposible que bajo la única figura del arquitecto se pudieran plantear y supervisar todos los aspectos como se había realizado hasta entonces. Una nueva profesión, la del ingeniero civil, asumió la responsabilidad sobre las nuevas tipologías constructivas y durante la primera revolución industrial se desarrollaron magníficas construcciones con estructura metálica, fundamentalmente en grandes edificios e infraestructuras. A principios del siglo XX, habiéndose incorporado ya la estructura de hormigón, estos nuevos tipos habían llegado a manifestarse de manera clara en la arquitectura, no resultando indiferente su existencia, por lo que se generaron ciertos conflictos de convivencia formal entre la estructura y los planteamientos arquitectónicos. En Europa, el Estilo Internacional optó por separar de una manera radical la retícula estructural de los cerramientos, dado que funcionalmente sus cometidos habían quedado también separados. Al otro lado del Atlántico, en Estados Unidos, se forjaron las bases de una arquitectura basada en la racionalización y optimización de la estructura y los espacios: la Escuela de Chicago. Entre estos dos intentos de incorporar las nuevas tipologías estructurales dentro de la arquitectura y otorgarles una función formal o de contenido, Frank Lloyd Wright intentó desvincularse de los planteamientos excesivamente racionales de sus compatriotas y optó por una vía diferente a la europea, luchando contra la retícula estructural diferenciada de la arquitectura y utilizando las formas de la estructura para la configuración del espacio. Su planteamiento fue el de seguir las pautas naturales del comportamiento de los materiales, fundamentalmente el hormigón, del modo que hoy podemos llamar “arquitectura orgánica”.

Varios autores se han aproximado a la estructura, no tanto desde sus aspectos técnicos sino desde sus funciones formales y su integración en la arquitectura. Remotamente, en el capítulo dedicado a la “Lámpara de la Verdad”, dentro de la obra *Las siete lámparas de la Arquitectura*, Ruskin desarrolló sus ideas estéticas de la arquitectura<sup>1</sup>. En el texto subyace una alusión a las virtudes formales de la

---

<sup>1</sup> RUSKIN, JOHN, *Las siete lámparas de la arquitectura (The seven Lamps of Architecture)* Colección Tratados, Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia. 1989. Edición original Londres 1849, págs. 75 a 112.

estructura, donde apunta que los materiales y elementos constructivos, entre de los que se incluye la estructura, deben parecer lo que son, sin engañar con su forma, aspecto o función. Ruskin también definió la arquitectura como el revestimiento de la estructura, de manera que, sin estructura, para él no había arquitectura. En el caso de Le Corbusier, ese revestimiento o decoración resultaba superfluo e innecesario, considerando la arquitectura como el juego de formas (estructura) bajo la luz. Frank Lloyd Wright consideraba el espacio como la verdad de la arquitectura y en cuanto a Mies, éste veía la arquitectura sólo como estructura.<sup>2</sup>

Premonitoriamente, éstos han sido algunos de los postulados implícitos en todas las arquitecturas de máximo nivel del siglo XX pudiendo encontrarse numerosos ejemplos de textos donde se hace referencia a las cuestiones estéticas de la estructura. En este sentido hay varios artículos de la Revista de Obras Públicas<sup>3</sup> a propósito de la función arquitectónica de las grandes estructuras metálicas de finales del XIX y principios del XX. Ya dentro de las propuestas arquitectónicas del siglo XX, Eduardo Torroja, Curt Siegel, R.J. Mainstone, Colin Rowe, Henry Petroski o Mario Salvadori, entre otros, se han planteado de manera rigurosa aspectos de la estructura diferentes de los estrictamente resistentes, aunque no por ello de menor importancia, por lo menos dentro de la arquitectura. En la actualidad es un tema que todavía sigue estando vigente debido a su amplio espectro de posibilidades, lo que se recoge en publicaciones recientes como la de Ivan Margolius, *Architects + Engineers = Structures*, de 2002, que demuestran el interés de esta cuestión, que seguirá vigente siempre que sea posible una aproximación crítica a la arquitectura de cada momento.

De esta manera parece apropiado que, dentro del recorrido sobre el papel de la estructura en la historia de la arquitectura, este análisis se detenga, en cierta forma, en la obra de Frank Lloyd Wright y, en concreto, en la particular utilización de la estructura como generadora de su arquitectura. Wright, junto a Le Corbusier y Mies van der Rohe, es uno de los arquitectos más importantes del siglo XX del que la arquitectura actual es deudora. En particular, el Guggenheim Museum es la obra que recoge muchas de las constantes de la obra de Wright, por lo que merece a su vez un análisis detallado en este sentido. En defensa de las críticas que recibió el edificio, Wright argumentó que para poder llegar a entender el razonamiento y origen museo, era necesario revisar el global de su propia obra. El recorrido a través de la obra de Wright, como no podía ser de otra manera, se apoya especialmente en la relación con sus colaboradores en el ámbito de la estructura - Mendel Glickman y Wesley Peters inicialmente y Jaroslav J. Polivka en las obras de la última etapa - dado que dentro del proceso de trabajo habitual los planteamientos estructurales del edificio se iban desarrollando simultáneamente durante todo el proyecto en colaboración con estos profesionales. El caso de Polivka resulta de particular interés debido a la estrecha colaboración mantenida entre ambos en siete de las obras más significativas de Wright, especialmente en el

---

<sup>2</sup> Drexler, Arthur. *Twentieth Century Engineering*. The Museum of Modern Art, New York 1964. Introduction.

<sup>3</sup> Publicación periódica del Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos que recoge las inquietudes del sector desde 1853.

Guggenheim Museum. De esta relación surgen en ocasiones las claves, no sólo de las soluciones concretas de la estructura, sino de los condicionantes finales dentro del conjunto arquitectónico que, como decía Wright a propósito del Guggenheim: “Pasarán más de 100 años y ellos aun la examinarán y representarán”<sup>4</sup>, en cuyo comentario puede incluirse por supuesto la singular estructura del edificio.

Respecto a la obra de Wright, a pesar de que algunos de sus edificios ya tienen más de 100 años y que la finalización de su obra cumbre, el Guggenheim Museum, así como el aniversario de su muerte han cumplido 50 años, siguen realizándose trabajos desde diferentes puntos de vista, tanto en el medio científico y universitario como en ámbitos culturales más amplios. Sirva de ejemplo la tesis doctoral realizada por José Ramón Castro sobre el Guggenheim Museum o la exposición sobre la obra de Wright presentada en las sedes del Guggenheim de New York y Bilbao en 2009, que se acompañó con publicaciones de textos y dibujos inéditos sobre Wright. De hecho, esta ha sido la tercera gran exposición retrospectiva sobre la obra de Wright. Las otras dos anteriores fueron en la Universidad de Phoenix en 1990 la primera y en el MOMA en New York en 1994 la segunda. En estas tres únicas ocasiones se ha podido ver una selección de documentos que resultan ser una pequeña parte de la totalidad de los dibujos que la Fundación Frank Lloyd Wright custodia con tanto celo. Este hecho manifiesta la intemporalidad y vigencia de la obra de Wright y los múltiples registros desde los que puede ser analizada y que, probablemente, en un futuro siga dando pie a futuras investigaciones desde diversos puntos de vista.

El edificio para el Guggenheim Museum es probablemente el edificio más importante de la carrera de Wright ya que incorpora todos los conceptos estructurales desarrollados durante su vida, consiguiendo así una perfecta fusión “invisible” entre arquitectura y estructura. En el edificio para el museo confluyen varios de los conceptos desarrollados a lo largo del resto de su obra, como los elementos en voladizo, la utilización del hormigón como material estructural o las estructuras en rampa (en realidad superficies continuas espaciales).

Se han realizado numerosos estudios referentes a esta obra desde diferentes puntos de vista. La compleja relación de Wright con la familia Guggenheim después de la muerte de Solomon Guggenheim o el papel de Hilla Rebay, directora del Museo de arte no objetivo, como punto de inflexión entre Wright y los Guggenheim, han sido ampliamente desarrolladas. También la elección del emplazamiento en el centro de Manhattan fue una cuestión de especial relevancia, habiendo sido examinada en diversas publicaciones. Respecto del edificio en sí, se puede considerar como el último gran edificio construido por Wright y recoge los aspectos formales, compositivos y filosóficos de su obra. Las diferentes aproximaciones desde esta óptica han sido objeto también de diversos trabajos, e incluso, con motivo de la restauración del edificio en su 50 aniversario, se ha evaluado el uso que Wright hizo del hormigón desde criterios estrictamente técnicos, de cara a garantizar su durabilidad y concretar su reparación. Este análisis ha sido llevado a cabo por los ingenieros de estructuras Robert Silman Associates de New York. Sin embargo,

---

<sup>4</sup> CASTRO CHICOT, José Ramón. *Frank Lloyd Wright y el Guggenheim Museum*  
Tesis doctoral. ETSAB. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona 2000, pág. 237

hasta el momento no se ha enfocado nunca el análisis desde el punto de vista de la evolución estructural del edificio, en el que J.J. Polivka participó desde 1946 hasta la finalización de la construcción en 1959. Polivka pensó al inicio que no sería capaz de solucionar el problema: *“En aquel momento me confesé francamente incapaz, pero tampoco ningún otro ingeniero del momento lo hubiera sido para resolver este complejo problema teórico”*<sup>5</sup>. El resultado final no sólo es fruto de la confluencia entre las ideas arquitectónicas de Wright sino también del esfuerzo por hacer realizable una construcción sin precedentes y la lucha constante contra las autoridades, quienes, a pesar de que Polivka y Wright encontraron la manera de abordar el problema, exigieron que se les transmitiera la seguridad sobre el planteamiento estructural. Los aspectos económicos de esta novedosa propuesta de estructura suscitaban dudas que debieron ser resueltas durante la evolución del proyecto. Este proceso, paralelo al resto de condicionantes, tuvo además consecuencias que afectaron a la configuración final de la estructura y por consiguiente del espacio. La rampa en espiral, desde las primeras versiones del proyecto, ya fuese poligonal o continua, ascendente o descendente, ha sido el elemento fundamental de la estructura y del proyecto arquitectónico. No sólo ha supuesto ser el elemento principal del recorrido del edificio y elemento definidor del espacio, sino que es también su soporte, su cerramiento y su armazón. Es un claro ejemplo donde forma y función llegan a unificarse a través de la estructura.

En enero de 1946 la revista *Architectural Forum* se dedicó a la obra reciente de Wright como la *Modern Gallery*, el *Rogers Lacy Hotel*, la *First Unitarian Church*, *Taliesin West*, la *Torre de Oficinas Johnson Wax*, el campus de la *Universidad de Florida Southern* y muchas casas usonianas. Sobre este monográfico, Henry-Russell Hitchcock dijo: *“Es irrevocable volver de nuevo a este extraordinario hombre, Frank Lloyd Wright, para encontrar tanta riqueza, variedad y alcance de expresión en la arquitectura moderna actual... ..este hombre parece haber concentrado en los proyectos de estos últimos años un alcance de expresión suficiente como para varios siglos...”* En concreto, a propósito del *Guggenheim Museum*, también añade: *“no pertenece al tiempo de su producción... probablemente pertenezca más al futuro que al pasado”*. Estas notas, con total seguridad, invocaban también a la complejidad de su estructura, de la que Wright estaba seguro que daría lugar a numerosos estudios en el futuro.

Ciertamente este edificio es el punto culminante de su carrera, ya que estuvo desarrollando el proyecto y dirigiendo su construcción desde 1943 hasta su muerte en 1959. Fueron dieciséis años, no sólo de diálogo y discusión con su cliente sobre la concepción del edificio, sino también de reflexión y materialización de conceptos estructurales desarrollados hasta el momento en otras obras. Existe numerosa documentación gráfica sobre el *Guggenheim Museum* y las diferentes propuestas realizadas durante esos años y han sido estudiadas en la tesis de José Ramón Castro. En su trabajo, aparte de un recorrido por las principales obras de Wright, se estudia el edificio desde diferentes puntos de vista, haciendo una valoración crítica del mismo y un análisis de los elementos constructivos que forman la obra de Wright, como la abertura, el muro o la columna. También hace hincapié en la evolución del hormigón a lo largo de su obra y las consecuencias espaciales que

---

<sup>5</sup> Polivka Papers, Folder 1.7 *“What it’s like to work with Wright”*

conlleva la utilización de este material: plasticidad y continuidad espacial, dejando patente así no solo una estrecha relación entre arquitectura y estructura sino también entre la estructura y el material, objeto principal, éste último, del libro de E. Torroja *Razón y Ser de los tipos estructurales*. Por otro lado, la observación e interpretación de la numerosa documentación fotográfica del proceso de construcción del Guggenheim, junto con las diferentes versiones del proyecto, pueden ayudar a descifrar aspectos del binomio arquitectura - estructura dentro de tan singular edificio.

La intención de este trabajo de investigación es pues la de reconsiderar la función formal de la estructura en la historia de la arquitectura del siglo XX y XXI, más allá de los entramados reticulares, a través del proceso de génesis de Guggenheim Museum en concreto y más en general a lo largo de toda la obra de Frank Lloyd Wright. Parece sugerente aprovechar como base la colaboración entre Polivka y Wright para exponer las diferentes cuestiones referentes a los diferentes cometidos de la estructura. Este aspecto puede resultar de especial interés de cara a afrontar los futuros planteamientos en la enseñanza de esta disciplina en las Escuelas de Arquitectura, donde, en otras épocas, se ha insistido en materias excesivamente específicas, desviándose el interés de muchos alumnos hacia otras áreas de la arquitectura. Los nuevos planes docentes deberían considerar que el aprendizaje de esta materia en la carrera de arquitectura tiene dos partes bien diferenciadas. Una es la enseñanza humanística-generalista donde se expongan los aspectos cualitativos de las estructuras y se consoliden los conceptos básicos del comportamiento estructural. La otra parte del aprendizaje, de tipo tecnológico-matemático o detallista, donde se enseñe la resolución de los problemas cuantitativos. En este sentido, el presente trabajo pretende servir como apoyo a la hora de extender el enfoque hacia la preocupación cualitativa, ya que este planteamiento ha quedado en muchas ocasiones relegado a un segundo plano por el afán de precisión numérica en la resolución de los problemas.

Sirva como ilustración la frase de Eduardo Torroja al respecto: *“Es un error demasiado corriente empezar a calcular la viga número 1 sin haber antes meditado si la construcción debería llevar vigas o no”*<sup>6</sup>

Esto, junto al continuo interés por los aspectos formales de las estructuras arquitectónicas, ha motivado el desarrollo del presente trabajo cuya propuesta, en origen, abarcaba incluso el examen del comportamiento de las estructuras naturales, íntimamente ligado con las tendencias organicistas de Wright en el campo de las estructuras, así como el resurgente interés por este tema en la actualidad. Sin embargo, se ha considerado conveniente centrar el trabajo principalmente en las cuestiones arquitectónicas de la estructura en la obra de Wright, utilizando ejemplos de la historia de la arquitectura únicamente como ilustración del contexto formal de la estructura, dejando esta última cuestión para futuras investigaciones. Por lo tanto, aunque la obra de Wright ha sido ampliamente estudiada, en pocas ocasiones se ha realizado este análisis bajo el filtro de la estructura. Como se podrá ir comprobando durante el texto, este aspecto

---

<sup>6</sup> TORROJA, Eduardo. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Instituto Eduardo Torroja, madrid 1957, pág. 2



es de crucial importancia dentro del global de su obra y merece la pena ser estudiado en detalle.

## 0.1 Estado del arte

Los antecedentes a esta tesis se recogen mayoritariamente en la bibliografía utilizada, citada al final. Desde textos muy específicos sobre resistencia de materiales o análisis matemático hasta valoraciones críticas sobre la obra de Wright, pasando por una amplia recopilación bibliográfica sobre la teoría formal de las estructuras. En este sentido, la lista de trabajos se completa mediante títulos que hacen referencia a la obra de arquitectos o ingenieros donde la estructura resulta tener cierta importancia en relación a la arquitectura. Esta recopilación, ampliamente consultada, es una parte importante de la formación del autor de esta tesis, considerándose su aplicación de especial interés como complemento en la docencia de las asignaturas de estructuras en la arquitectura.

Sobre Frank Lloyd Wright el alcance de la bibliografía es muy amplio. Desde principios del siglo XX se han ido publicando de manera parcial o en retrospectiva diferentes aspectos de su obra. Al igual que en la larga trayectoria profesional pueden diferenciarse varias épocas, también es posible agrupar del mismo modo la historiografía de su obra. Desde las primeras apariciones de proyectos residenciales en la revista *Ladies Home Journal* en 1907, su obra ha estado presente en las publicaciones más importantes de arquitectura, en ocasiones a través de la visión de críticos como Henry-Russell Hitchcock. Gracias a las declaraciones realizadas por Wright en *Architectural Forum* en 1946 respecto a la Modern Gallery, se inició el contacto con Polivka. El estudio de la autobiografía es, paralelamente, una de las mejores fuentes respecto a su vida y obra, íntimamente relacionadas, ya que en diversos pasajes expone con claridad su propia visión sobre aspectos tan dispares como la relación con la naturaleza o los diferentes conceptos resistentes aplicables a algunas estructuras.

Posteriormente a su muerte, multitud de autores han escrito sobre aspectos parciales o generales de su obra. Vincent Scully realiza una de las primeras recopilaciones de su obra en 1960 y, posteriormente, Neil Levine es considerado como una de las principales fuentes críticas de la obra de Wright. En el caso de Bruce Brooks Pfeiffer, la herencia es más directa, habiendo sido el responsable de las publicaciones, más documentales que críticas, a través de la Fundación Frank Lloyd Wright.

Es difícil realizar una exposición precisa de todos los autores que han tratado algún aspecto de la obra de Wright. En la relación bibliográfica se citan los considerados más importantes, bien sea por sus aportaciones al entendimiento de la obra de Wright o por su contribución a la difusión en ámbitos particulares, como es el caso de José Angel Sanz Esquide, desde la Escuela de Arquitectura del Vallès o de José Ramón Castro Chicot a través de su tesis doctoral sobre el Guggenheim Museum. En particular, y haciendo alusión a algunos aspectos relacionados directamente con la estructura en la obra de Wright, únicamente se tiene referencia de los artículos de Jack Quinan y Tomaso Trombetti publicados en la revista *Casabella* en 1988 y 2007 respectivamente.

En la docencia de la arquitectura no se imparte una materia que verse sobre la teoría formal de las estructuras o, visto de otro modo, sobre un recorrido de la

historia de la arquitectura a través de la estructura. Críticos de arquitectura, como Kenneth Frampton, han realizado aproximaciones en este sentido, confirmando el interés de este ámbito de conocimiento. Otros autores, como es el caso de Mario Salvadori, han desarrollado la parte fundamental de su discurso en esta línea. Esta es la filosofía que Felix Cardellach pretende transmitir en 1911 y que, en el ámbito también de la Escuela de Arquitectura del Vallès, Robert Brufau ha sido, desde hace ya más de treinta años, uno de los principales impulsores. Muchos de los referentes principales de la ingeniería del siglo XX, como Freyssinet, Maillart, Torroja y un largo etcétera, han manifestado de algún modo una sensibilidad especial también hacia esta vertiente más humanística de sus obras.

Sin embargo, no existe una extensa bibliografía específica al respecto. La mayor parte de publicaciones relacionadas con la estructura tienen un alcance estrictamente técnico, relacionado con los materiales o los métodos de cálculo. No hay demasiados textos en la línea que Torroja plantea en el clásico *Razón y Ser de los tipos estructurales*<sup>7</sup>. Lo más habitual es que cuando el punto de vista se aleja del planteamiento numérico, no se lleguen a tratar otras cuestiones formales con demasiado rigor. Por esto, en este caso, la lista no pretende ser una selección, sino una exposición de los títulos más relevantes de este otro punto de vista.

En cuanto a la teoría de la arquitectura y monografías de arquitectos e ingenieros, la lista de referencias bibliográficas podría llegar a ser muy extensa. El catálogo de cualquier biblioteca de arquitectura puede completar la relación. En este caso se exponen los títulos que se consideran relacionados con el hilo del discurso planteado, más por el contenido de los mismos que por buscar una representatividad de los principales hitos de la arquitectura.

Por último, también se recoge aquí la relación de los textos clásicos de Resistencia de Materiales y Teoría de Estructuras, cuya presencia es necesaria en cualquier aproximación cuantitativa a las estructuras.

Como complemento a esta bibliografía sobre los diferentes aspectos de esta tesis, la investigación se ha apoyado de forma importante en el material original de Polivka. Todo este material ha sido cedido al autor por cortesía de *University Archives, State University of New York at Buffalo* para la elaboración del presente trabajo. Este material se utilizó anteriormente para la realización de una exposición en septiembre de 2000, denominada *Engineering of Organic*. La exposición se basaba en la tesis doctoral con el mismo título: *Engineering the Organic, an investigation into the Collaboration of Jaroslav Joseph Polivka and Frank Lloyd Wright* de Barry A. Muskat, profesor de historia del arte en la misma universidad, en la que se abordaba la cuestión con criterios más formales que técnicos.

En el ámbito de las universidades españolas y en concreto en la UPC, la gran mayoría de trabajos de investigación y tesis doctorales realizadas alrededor de la

---

<sup>7</sup> TORROJA, Eduardo. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Instituto Eduardo Torroja, Madrid 1957

obra de Wright se circunscriben a planteamientos compositivos, tanto en relación a sus edificios como a una visión urbanística. Se han realizado recientemente trabajos sobre Broadacre City o los edificios planteados para Bagdad, pero siempre desde la óptica del Departamento de Composición de las Escuelas de Arquitectura. En el apartado de bibliografía se ha realizado una recopilación en este sentido.



## 0.2 Organización de la tesis

El trabajo se divide en tres partes principales, el desarrollo de la misma, las conclusiones y un conjunto de dos anexos, donde se muestra el material utilizado para el desarrollo del mismo.

En la primera parte, se pone de manifiesto la situación sobre el papel de la estructura en la arquitectura, especialmente a partir del siglo XX y la arquitectura moderna. La intención es la de hacer una aproximación progresiva desde los conceptos más genéricos ya conocidos, que permita centrar el problema referente a las particularidades de la obra de Wright y en concreto del Guggenheim Museum. De este modo, a través de una visión general de la historia de la arquitectura y del papel formal de la estructura, se va acotando el planteamiento hacia la relación entre arquitectos e ingenieros en general y entre Wright y Polivka en particular.

En la segunda parte, y apoyándose en la predicción de Wright de que su arquitectura se seguirá estudiando cien años después de su muerte, se aborda un nuevo análisis dentro de los múltiples estudios sobre Wright. Todos los aspectos expuestos en la primera parte sobre la relación entre arquitectura y estructura se particularizan en la propia obra de Wright, pudiendo diferenciarse finalmente las obras en las que colaboró con Polivka. El análisis de este trabajo se acompaña con más de setenta dibujos originales realizados por el autor, que sirven como ilustración de los diferentes conceptos estructurales expuestos.

El tercer bloque centra el problema en el edificio construido más significativo de la obra de Wright, el Guggenheim Museum, motivo de convergencia de las ideas organicistas de Wright y de Polivka. Desde un estudio tipológico y analítico de las diferentes variantes planteadas durante todo el proceso de desarrollo y construcción del edificio, se estudian de manera detallada las diferentes versiones previas a la versión definitiva, evaluando la evolución del papel resistente de algunos de sus elementos constructivos y de su estructura.

Paralelamente, de manera superficial al principio y más concreta en la tercera parte, el hilo conductor de la reflexión es el material original sobre Polivka del que se ha dispuesto. Este material se compone fundamentalmente de correspondencia entre Wright y Polivka así como escritos del propio Polivka donde, al margen de las cuestiones anecdóticas sobre las relaciones personales, se vislumbran aspectos muy concretos de la estructura de éste y otros edificios. Por este motivo, además de los fragmentos que se han ido incluyendo dentro del trabajo, se ha considerado oportuno añadir tres textos completos en un anexo final que permiten tener una visión más completa de la desconocida figura de Jaroslav Joseph Polivka. Se han analizado más de 450 páginas de correspondencia, escritos, fotografías, croquis y planteamientos matemáticos. Sin embargo, a pesar de haber gran cantidad de material de interés, no se ha juzgado oportuno incorporarlo en su totalidad a este trabajo debido a su extensión.

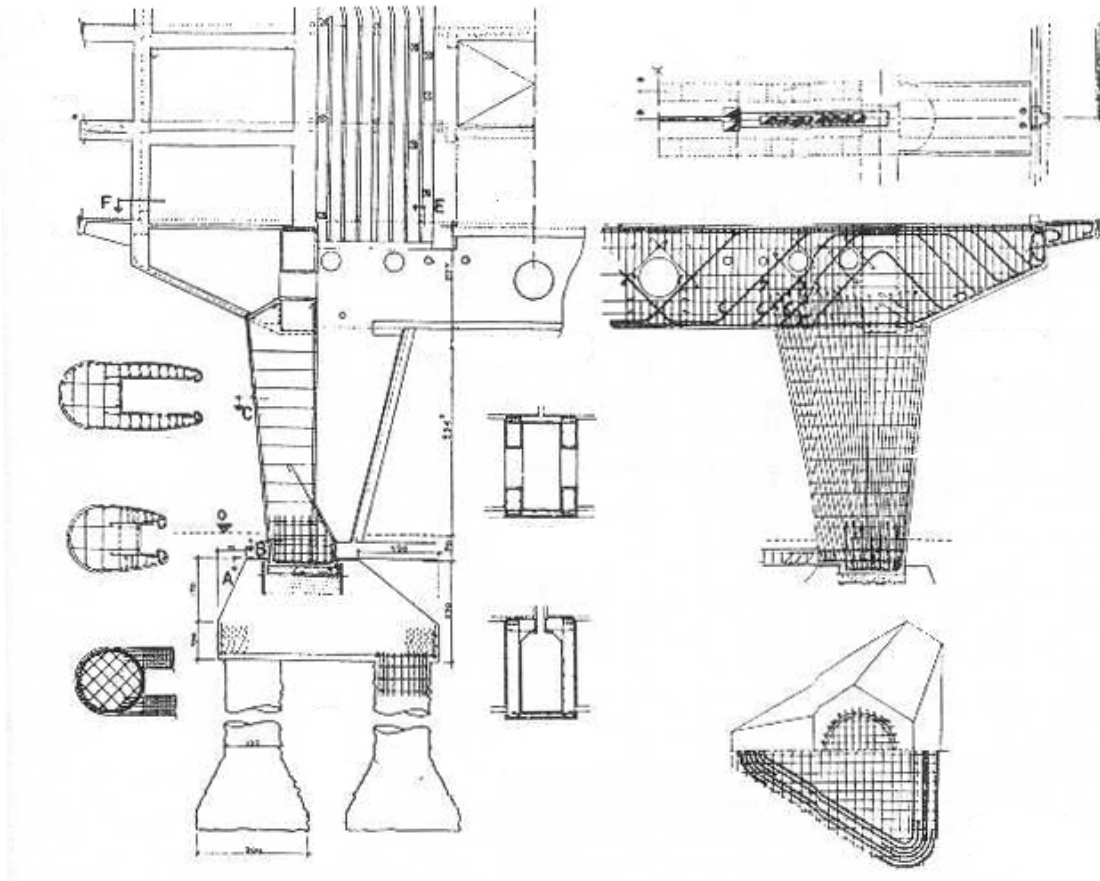
Respecto a la bibliografía, se ha estimado conveniente desarrollar este apartado como otro anexo ya que la intención fundamental del enfoque es la de aplicar esta línea de conocimiento a la docencia en la arquitectura. Se considera necesario disponer de una bibliografía ordenada al respecto en una materia donde,

históricamente, el material docente se ha centrado habitualmente al análisis de la mecánica de medios continuos.









*La estructura es, y siempre ha sido, un componente esencial de la arquitectura<sup>1</sup>*

# Parte I

## Relación entre la estructura y la arquitectura

---

---

<sup>8</sup> SALVADORI, Mario – HELLER, Robert. *Estructuras para arquitectos. (Structure in architecture)* CP67, Buenos Aires 1986, pág. 13.

Imagen de detalles de armado de la base de la Unité d'Habitation de Marsella. Le Corbusier.

## 1.1 La estructura en la historia de la arquitectura

Con la frase de la portada del capítulo, Mario Salvadori comienza de manera concisa su libro *“Estructuras para arquitectos”* (o *“Estructuras en la arquitectura”*) poniendo claramente de manifiesto cual es la esencia de su texto: la indisolubilidad entre arquitectura y estructura a lo largo de la historia, desde la pequeña arquitectura vernácula a las grandes obras, equiparando la función resistente de los elementos estructurales a su función arquitectónica y de significado. La unión de estos dos conceptos arquitectónicos ha sido durante la historia de la arquitectura siempre indiscutible hasta la aparición del acero y el hormigón que, junto al Movimiento Moderno, contribuyeron a disociar la estructura de los cerramientos y más aun del ornamento. Este desmembramiento de varios de los conceptos arquitectónicos hasta entonces indisolubles dio lugar a nuevas arquitecturas que aprovechaban las modernas tecnologías para expresar valores hasta entonces desconocidos en la arquitectura a través de las características propias de expresión de esos materiales. Sin embargo, como efecto colateral, se produjo en el grueso de la arquitectura la pérdida de los valores de la estructura como una de sus partes fundamentales. El hecho de relegar a ésta en ocasiones a la única función de soporte supuso el detrimento de muchas de las otras cualidades arquitectónicas de la estructura, tales como la organización del espacio, la expresión propia de sus formas o la claridad de su lenguaje. No obstante, los grandes arquitectos de la era moderna han intentado no perder esa unidad potencial de la arquitectura y revisando la trayectoria de sus obras pueden encontrarse buenos ejemplos en los que han sabido compaginar las funciones arquitectónicas de la estructura con la utilización del acero y el hormigón, con un enfoque propio de nuestra época. Frank Lloyd Wright, Mies van der Rohe, Le Corbusier, Louis Kahn o Alvar Aalto ejemplifican, con toda su obra, diferentes modelos donde la unidad entre estructura y arquitectura nunca ha desaparecido, aunque haya sido tratada de formas bien diferentes.

Durante toda la historia de la arquitectura, la estructura ha representado un papel importante. Desde las bóvedas y arcos romanos hasta las catedrales góticas, la estructura supone una herramienta básica y es un componente fundamental de la arquitectura. Partiendo de su función sustentadora, las diferentes formas que ésta ha ido adoptando han servido para definir espacios que, finalmente, han quedado caracterizados por la estructura que los define. La función de la estructura dentro de la edificación ha simbolizado diferentes papeles, desde las primeras construcciones megalíticas más primitivas, donde se aprovechaban estructuras naturales como cuevas y árboles o se imitaban los mismos modelos naturales en el caso de los dólmenes, hasta la actualidad, donde la relación entre tipología estructural y proyecto de arquitectura puede ser de lo más dispar.

Ejemplos históricos, como las construcciones góticas en las que la estructura del edificio define la totalidad del espacio, se contraponen a la arquitectura barroca, donde arquitectura, estructura, escultura y pintura se funden, confundiendo los límites entre cada una de las disciplinas. Estos dos paradigmas opuestos evidencian que la preocupación sobre la función formal de la estructura no sólo es propia de nuestro tiempo, sino que, de una manera u otra, ha estado siempre

presente durante épocas pasadas. En la catedral de Saint Denis del siglo XII, en las proximidades de Paris, donde Viollet-le-Duc llevó a cabo una restauración global que salvó de la ruina el edificio, sus esbeltos pilares y contrafuertes de piedra que se entrelazan con los arcos y bóvedas, no sólo sirven como soporte resistente, sino que también son la base del ensalzamiento de la luz propio de este estilo. Por el contrario, en San Carlo alle Quattro Fontane de F. Borromini en Roma, la estructura en lugar de fundirse con la luz y el espacio, forma un todo con las otras artes, pintura y escultura, obteniéndose un resultado claramente contrastado con el ejemplo anterior. En cuanto al Neoclasicismo, el edificio para el Altes Museum, de Karl Friedrich Schinkel, construido en Berlín entre 1823-1830, también se caracteriza a partir de la disposición de la estructura. La superposición de elementos para formar un orden clásico así como la repetición y simetrías de la estructura, definen la atmósfera final del edificio. En todos estos casos no hay una intencionalidad a priori sobre la función formal de la estructura, pero no cabe duda que estas tres muestras, ejemplifican que la repercusión arquitectónica de los diferentes planteamientos estructurales es evidente. [Figs. 1.1.1-3]

Con la primera revolución industrial, a finales del siglo XVIII, comenzó la utilización de las estructuras metálicas, siempre vinculadas al desarrollo tecnológico y de las comunicaciones (puentes y estaciones de ferrocarril y otras infraestructuras). Más tarde, con la aparición del hormigón armado, surgió la necesidad de reconsiderar la relación entre la arquitectura y las tipologías estructurales. [Figs. 1.1.4-5] Los grandes arquitectos del siglo XX como Le Corbusier, Mies van der Rohe o el Movimiento Moderno, plantearon diferentes maneras de relacionar estos elementos, bien separándolos, bien integrándolos en la arquitectura. Esta difícil tarea no siempre se ha llevado a cabo con elegancia y, como se expone más adelante, dio lugar a varios modos de conectarse entre ellas.

Eduardo Torroja lo corroboró de esta manera:

*“El proyectar, aunque sólo sean estructuras, si bien tiene mucho de ciencia y de técnica, tiene mucho más de arte, de sentido común, de delectación en el oficio de imaginar la traza oportuna, a la que el cálculo sólo añadirá los últimos toques, con el espaldarazo de su garantía estática resistente”*<sup>9</sup>

También, y lejos de la inercia que ha llegado hasta nuestros días, Torroja sugería en el mismo texto que *“antes de empezar a calcular la primera viga del primer forjado, hay que plantearse si lo más oportuno es proponer vigas u otra tipología”*. Dicho esto, queda claro que en primera instancia y por encima de la demostración matemática de la estabilidad de la estructura (y sin infravalorar su necesidad), es prioritaria la elección de una tipología estructural adecuada, atendiendo a criterios económicos, sociales y constructivos, pero sobre todo arquitectónicos.

En el Movimiento Moderno, la yuxtaposición entre los sistemas estructurales y el conjunto de la arquitectura ha sido la tónica habitual. Tanto Mies como Le Corbusier, al perder los muros su función portante, disociaron también los elementos constructivos separando físicamente los soportes de las fachadas. Sin

---

<sup>9</sup> TORROJA, Eduardo. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Instituto Eduardo Torroja, Madrid 1957, pág.

embargo, en cuanto a Wright, esto no es de tan fácil lectura. La integración de todos los componentes de su arquitectura en un conjunto “orgánico” dificulta una lectura clara entre lo que es estructura y lo que es arquitectura. Dicho de otro modo, los arquitectos más influyentes del siglo XX han afrontado la cuestión de formas muy diferentes. [Figs. 1.1.6-8]

Este dilema, no sólo no se ha resuelto de manera definitiva o ha perdido interés, sino que continúa siendo hoy en día una de las cuestiones fundamentales de la arquitectura. Por supuesto, en la actualidad la estructura sigue cumpliendo un papel fundamental dentro de la arquitectura de vanguardia. Arquitectos como Norman Foster, Frank O. Gehry, Richard Rogers, Zaha Hadid, Arata Isozaki o Santiago Calatrava entre otros, consideran a menudo, con mayor o menor fortuna, la estructura como uno de los elementos de expresión principales dentro de su arquitectura.

A mediados de los setenta, Rafael Moneo planteó estas mismas cuestiones de relación. En un artículo versado sobre la aparición de las estructuras reticuladas y su relación con la arquitectura, Moneo hace un repaso de los aspectos básicos sobre la relación entre arquitectura y una de las tipología estructurales clásicas del siglo XX, las estructuras reticuladas.<sup>10</sup> En el artículo, se hace un repaso a los diferentes mecanismos de integración de la estructura dentro de la arquitectura. A propósito de este cambio de mentalidad entre el academicismo y la nueva arquitectura moderna Moneo comenta:

*... lo constructivo no era congruente con la forma última, con la apariencia de la arquitectura, el mundo de los órdenes, como la moral victoriana, era un mundo de apariencias establecidas que conserva las formas y que daba a la ciudad aquella dignidad antigua tan característica de la arquitectura del siglo XIX.*

Continuando con la reflexión de R. Moneo, otro tipo de estructuras donde el hormigón encuentra una expresión propia es la solución a los problemas industriales tales como depósitos, silos, etc... de manera que el material abandona la linealidad de barras y adopta formas tridimensionales más propias de sus posibilidades plásticas. Esta capacidad de ser moldeado es una de las cualidades fundamentales del hormigón y por eso puede adoptar formas más apropiadas (que las de un sistema de barras) de funcionamiento estructural, adaptándose su geometría a la distribución y magnitud de las diferentes tensiones (tracción y compresión). En construcciones industriales donde el objetivo es la búsqueda de la optimización del comportamiento estructural, el hormigón armado encuentra en muchos casos magníficos ejemplos en los que a través del simple ajuste de la estructura a su comportamiento mecánico se consigue su máxima expresión formal. Los elevadores de grano de la Washburn-Crosby en Buffalo o el Canadian Government de Montreal fueron incluidos en *Modern Architecture*, publicado por Bruno Taut en 1929<sup>11</sup> como muestras de expresividad formal a través de la estructura. También Le Corbusier es admirador de este tipo de estructuras y en su

---

<sup>10</sup> MONEO, Rafael. *“La llegada de una nueva técnica a la arquitectura, las estructuras reticulares de hormigón”*. Ed. ETSAB. Monografía núm. 11. Barcelona, 1.976

<sup>11</sup> BANHAM, Reyner. *“La Atlantida de hormigón”*. Ed. Nerea, Madrid 1989, Pág.156

texto *“Hacia una Arquitectura”*<sup>12</sup> reflexionó sobre la estética de las obras de ingeniería. [Fig. 1.9]

Sin embargo, la utilización de tipologías estructurales ha ido siempre directamente ligada al desarrollo de los procesos de cálculo. Por eso, gracias al método de Cross<sup>13</sup>, la retícula se extendió rápidamente en la construcción, dejando atrás estructuras tridimensionales más complejas de tipo laminar, también más difíciles de abordar. Es evidente que los ejemplos de buena arquitectura “apoyada” en diferentes tipos de retícula son más numerosos que las estructuras continuas tridimensionales, dada la dificultad de resolver numéricamente este otro tipo de problemas. No obstante, antes de la aparición de los métodos de análisis actuales (tales como la aplicación informática del método de los elementos finitos), diferentes profesionales habían planteado ya estos problemas mediante el cálculo diferencial, existiendo también numerosos ejemplos en este sentido. Eugène Freyssinet, Robert Maillart y más recientemente Eladio Dieste o Felix Candela entre otros<sup>14</sup>. [Figs. 1.1.10-11]

Hoy en día, la utilización de métodos de cálculo matriciales o de elementos finitos, facilita enormemente el proceso de cálculo, por lo que cada vez abundan más estructuras que, simplemente por su complejidad geométrica, serían inabordables mediante un cálculo manual. Como segunda derivada, una de las consecuencias en este sentido es la “perversión” de algunos modelos de comportamiento estructural, que se alejan de una manera gratuita del orden, la racionalidad y, por qué no, del sentido común impuesto por las limitaciones en las herramientas de cálculo. Posiblemente, el resultado de la obra de los grandes maestros de la ingeniería y arquitectura del siglo XX sería completamente diferente si hubiesen dispuesto de las herramientas actuales, pero, en todo caso, esta hipótesis no es el objeto del presente trabajo.

El proyecto y el planteamiento de la estructura deben tener desde el inicio el protagonismo que le corresponde. Esta primera fase de “diseño estructural” se alimenta mucho más de la intuición y la experiencia y no tanto de la aplicación de un cálculo científico. Poco a poco, según se va concretando el proyecto de arquitectura y las diferentes decisiones en cuanto a las opciones estructurales se toman en consonancia y conjuntamente con las de proyecto, de manera que se va incorporando la tipología y predimensionado de la estructura dentro del global de la construcción. El resultado de este proceso favorece al conjunto, obteniéndose una arquitectura y estructura más satisfactorias, donde los conocimientos científicos se

---

<sup>12</sup> LE CORBUSIER *Hacia una arquitectura*. Ed. Poseidón, Buenos Aires 1964. 1ª Edición *Vers une architecture*, 1923

<sup>13</sup> El método de Cross o método de redistribución de momentos fue concebido por Hardy Cross, Virginia 1885-1959. El método fue utilizado para la resolución de grandes estructuras reticuladas y su aplicación ha sido vigente hasta la aparición de los métodos matriciales aplicados a la informática. En la actualidad sus procedimientos todavía siguen siendo impartidos en muchos programas de estructuras de las universidades españolas.

<sup>14</sup> Eugène Freyssinet: Bóvedas nervadas de hormigón de los hangares del Aeropuerto de Orly. París 1923. Robert Maillart: Arco rebajado de hormigón del puente Salginatobel. Schiers, Suiza 1928-1930. Eladio Dieste: Bóvedas Gausas de cerámica armada del almacén para la empresa TEAM en Montevideo. 1960-1962. Felix Candela: Paraboloïdes hiperbólicos de hormigón para el restaurante los Manantiales, Xochimilco, Mexico 1958

convierten en intuición artística y la intuición se concreta en aspectos constructivos. [Figs. 1.1.12-14]

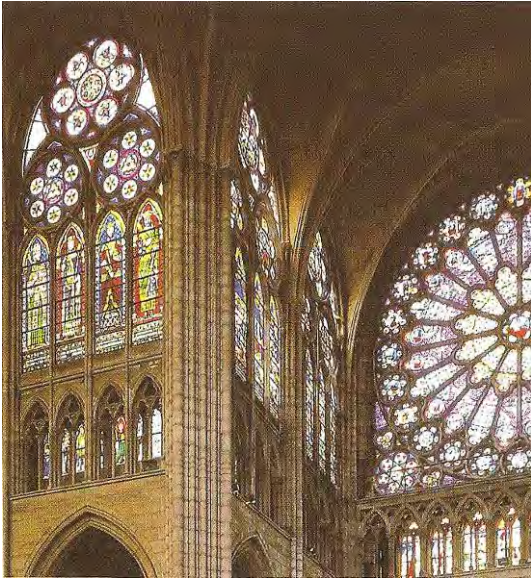
Durante este proceso es habitual que el arquitecto discuta los aspectos estructurales con un “consultor de estructuras”, que le ayude a ir concretando e integrando todos los matices técnicos desde el inicio. Hay arquitectos que siempre han contado durante gran parte de su carrera con un consultor de estructuras que, sin tener el mismo reconocimiento que el arquitecto, es también responsable en gran medida del resultado arquitectónico de los edificios y no sólo de la garantía de estabilidad. Este es el caso de A. Komendant con L. Kahn, J.J. Polivka o Mendel Glickman con Wright, Frank J. Kornacker<sup>15</sup> con Mies o J. Prouvé<sup>16</sup> con Le Corbusier, quienes aunque colaboraron sólo de forma puntual, su relación de amistad influyó sustancialmente en las propuestas estructurales de muchos de sus proyectos. El resultado de este tipo de relaciones se expone más adelante, pero queda de manifiesto que la arquitectura resultante de esas colaboraciones es deudora en gran manera de personas que han quedado demasiado a menudo en un segundo plano. Es también mi objetivo pues, rendir también homenaje al trabajo y las aportaciones realizadas a la arquitectura en este sentido por los “consultores estructurales”.

---

<sup>15</sup> August Komendant: 1906-1992. Ingeniero civil de origen estonio que emigró a los Estados Unidos donde desarrollo su carrera profesional. Jaroslav Joseph Polivka: Ver desarrollo posterior. Mendel Glickman: Ingeniero que colaboró con Wright en Taliesin. Frank J. Kornacker: Ingeniero que colaboró con Mies en la mayor parte de sus proyectos americanos más importantes.

<sup>16</sup>Jean Prouvé: 1901-1984. Constructor, diseñador e ingeniero francés con especial sensibilidad a la hora de mostrar el comportamiento estructural, tanto en los diseños a pequeña escala como en estructuras de edificios. Fue un precursor de la industrialización, desarrollando diferentes modelos para fachadas ligeras. Este es el caso de su colaboración con Albert Laprade y Leon Bazin en el edificio del Garaje Citroen Marbeuf en París en 1929.

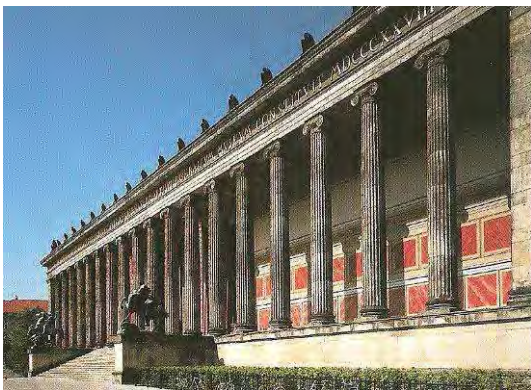




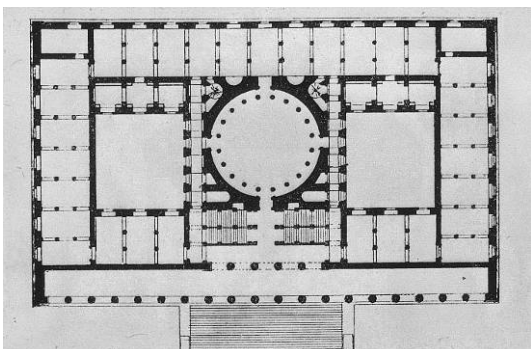
**Fig. 1.1.1** Interior de la Catedral gótica de Saint-Denis, siglo XII. Las columnas, al subdividirse en varias ramificaciones de nervios dan lugar a las nervaduras de las bóvedas, realizándose de esta manera una suave transición entre elementos. Los contrafuertes exteriores permiten desmaterializar los muros, otorgándoles el carácter etéreo propio del gótico.



**Fig. 1.1.2** Cúpula de San Carlo alle Quattro Fontane de Francesco Borromini, Roma 1637. En este caso la indisolubilidad se produce entre las diferentes artes, arquitectura, escultura y pintura, cuya unión es la que caracteriza la atmósfera del conjunto.



**Fig. 1.1.3** Fachada y planta del Altes Museum de Karl Friedrich Schinkel, Berlin 1828. La estructura define la pauta y establece el orden jerárquico de los diferentes elementos





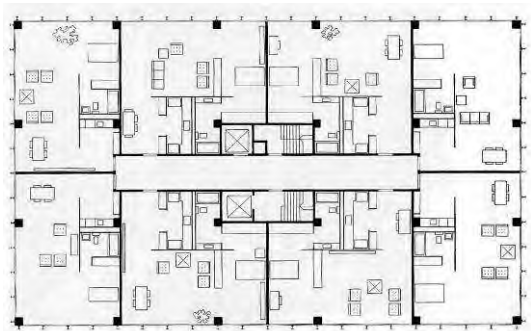
**Fig. 1.1.4** Interior de la Estación de Francia, Barcelona, obra de los arquitectos Pedro Muguruza y Fernando Gallego Herrera y que se inauguró en 1929. A mediados del siglo XIX las nuevas estructuras de acero, con un lenguaje propio, deben convivir con los criterios arquitectónicos preexistentes.



**Fig. 1.1.5** Interior del edificio Fiat-Lingotto con estructura de hormigón. Mattè-Trucco, Turín, 1916-23. Posteriormente, en el caso del hormigón armado, el aspecto propio del material así como sus pautas de diseño, adoptan una nueva forma de expresión por sí mismas, al posibilitar la adaptación de sus elementos a cualquier forma preestablecida.



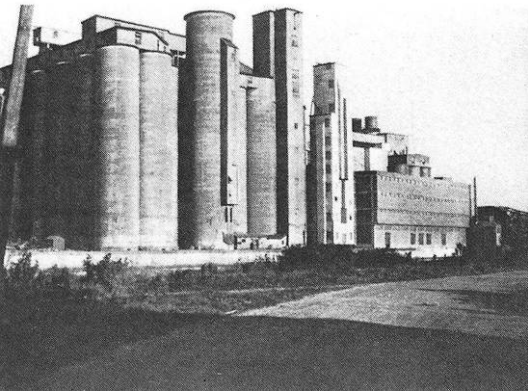
**Fig. 1.1.6** Villas Weissenhof en Stuttgart. Le Corbusier 1927. Se manifiesta la clara separación entre estructura (retícula de pilares y losas planas) y el resto de elementos. En el caso de las distribuciones, la planta baja queda libre al liberar a los muros de su función portante. En cuanto a las fachadas, la manifestación de su función no estructural son los grandes ventanales rasgados.



**Fig. 1.1.7** Planta de una de las torres de los Lake Shore Drive Apartments, Chicago. Mies van der Rohe 1951. Las funciones de estructura y cerramientos también quedan separadas, pero en este caso la pauta de la estructura sirve de referencia tanto a la distribución interior como para la modulación de los sistemas de fachada.



**Fig. 1.1.8** En Taliesin East, Wisconsin 1937, Frank Lloyd Wright da forma a la sala de trabajo a través de la estructura, que caracteriza el espacio interior de la misma manera que en la primera imagen de Saint Denis.



**Fig. 1.1.9** Fotografía de los elevadores de grano Washburn-Crosby, Buffalo 1903, tomada por Erich Mendelsohn en 1924 para su libro *“Amerika: Bilderbuch eines Architekten”*. Las formas cilíndricas de hormigón, cuyo origen tiene un razonamiento estructural y de funcionamiento resultan atractivas por sí mismas a los arquitectos europeos de vanguardia.



**Fig. 1.1.10** La retícula de hormigón del edificio Packard 10 de 1906 en Detroit, Michigan, obra de Albert Kahn, se manifiesta en las fachadas mostrando así su propia expresión formal



**Fig. 1.1.11** Paraboloides hiperbólicos de hormigón del restaurante “Los Manantiales”, construido por Felix Candela en 1951 en Xochimilco, próximo a Ciudad de México. La forma de la estructura permite canalizar los esfuerzos de tal manera que los espesores de lámina son mínimos. De este modo, a través de la búsqueda de unos mecanismos de comportamiento estructural, se origina la forma arquitectónica.

## 1.2 La función formal de la estructura

En una visión global de la arquitectura, se observa una diversidad bastante amplia en la manera de proyectar en cuanto a la relación entre espacio y estructura. No quiere decir que deba haber una manera concreta y predeterminada de relacionar estos dos aspectos, sino que cada caso requiere una función diferente para la estructura y es consecuencia de una buena arquitectura el encontrar el cometido formal adecuado de la estructura para cada situación. En este sentido hay textos que ya han abordado este punto de vista de una manera general, llegando incluso a establecer una cierta clasificación según el papel desempeñado por la estructura en diferentes casos<sup>17</sup>:

- La estructura como concepto principal del proyecto

Edificios que son puramente estructura donde, además, la finalidad última es la propia estructura en sí, sin ninguna otra función. Generalmente no hay otros elementos constructivos ni un uso específico del edificio al margen de la estructura.

Ejemplos de este tipo son la Torre Eiffel, el arco de Eero Saarinen en San Louis o las propuestas Tatlin y otros constructivistas rusos, donde la propia estructura es el único objeto y significado de la arquitectura. [Fig. 1.2.1]

- La estructura como arquitectura

En estos casos la estructura tiene una función fundamental en el edificio, incluso puede ser que el edificio únicamente sea estructura, pero está al servicio de un uso determinado.

Edificios como torres de comunicaciones, puentes, depósitos o silos están compuestos fundamentalmente por elementos estructurales, pero con una clara función de utilización concreta.

Son buenos ejemplos en este sentido las cúpulas geodésicas de Richard Buckminster Fuller, algunas estructuras experimentales de Robert Le Ricolais, las torres de comunicaciones de Vladimir Shukhov [Fig. 1.2.2], los hangares de Konrad Wachsmann o las cubiertas plegables de Emilio Pérez Piñero en España. Existen también buenos ejemplos anónimos de arquitectura industrial.

- La estructura caracterizada por una imagen estructural

La estructura determina formalmente por completo el carácter del espacio, otorgándole una imagen muy concreta. Las catedrales góticas son un ejemplo histórico de este tipo de relación, en donde la definición del espacio para un uso determinado queda marcado por la impronta de la estructura.

Otros ejemplos en este sentido son las láminas de hormigón de Félix Candela [Fig. 1.1.11] o las cerámicas de Eladio Dieste [Fig. 1.2.3], la mayoría de obras de Pier Luigi Nervi [Fig. 1.2.4], Ricardo Morandi o Eugène

---

<sup>17</sup> BRUFAU, ROBERT. *Apuntes de estructuras I*. Apuntes desarrollados para la docencia de la asignatura de estructuras en los primeros cursos, en la Escuela de Arquitectura del Vallès.

Freyssinet. En España son destacables dentro de esta clasificación la obra con fábrica cerámica de los modernistas catalanes como Cesar Martinell, Lluís Moncunill o Antoni Gaudí y posteriormente las cáscaras de hormigón armado de Eduardo Torroja.

- La estructura que ordena un espacio:

A diferencia del caso anterior, la particularidad de este tipo de estructuras no es tanto por su propia configuración o imagen sino la capacidad de ordenar y pautar el espacio que definen. Son estructuras porticadas o reticuladas que sistematizan y condicionan la disposición del resto de elementos constructivos, pero sin imponer una imagen concreta.

Existen gran cantidad de ejemplos de este tipo, como la Casa del Fascio de Terragni o los edificios industriales de Albrecht Kahn [Fig. 1.2.6]. También hay numerosos buenos ejemplos no tan conocidos, donde la estructura, sin imponer una estética determinada, sirve como pauta y referencia del resto de elementos constructivos y de la arquitectura [Fig. 1.2.5]

- La estructura que impulsa un tipo de arquitectura:

Sin que defina completamente el espacio ni lo condicione de manera radical en cuanto a su orden y pauta, en este caso la estructura ayuda a potenciar los aspectos de un tipo de arquitectura, sin imponer del todo una definición formal concreta.

En algunos casos esta ayuda hacia la arquitectura está en la línea de marcar una imagen determinada, como puede ser el edificio de la Johnson Wax de Frank Lloyd Wright o la arquitectura High Tech. [Fig. 1.2.7]

En otros casos la aportación de la estructura es más en el sentido de retícula o malla generadora, que puede verse claro en los edificios de Mies van der Rohe y multitud de ejemplos de arquitectura americana, como los SOM, con su origen en la Escuela de Chicago [Fig. 1.2.8]

- La estructura difuminada en la arquitectura:

En determinados casos la estructura no tiene por qué desempeñar un papel decisivo en el proyecto arquitectónico y quizás su única función deba ser estrictamente la resistente.

Estas situaciones se pueden resolver de una manera elegante, como es el caso del Movimiento Moderno que separa la función estructural de la de cerramiento, o el sistema “dom-ino” planteado por Le Corbusier, donde un sistema de losas planas sobre pilares, sin direccionalidad marcada que condicione, hacen de la estructura un espacio libre y neutro que permite la redefinición de la arquitectura que alberga.

No hay que confundir este último grupo con las estructuras mal planteadas, o planteadas a posteriori después de haber definido por completo la arquitectura, en cuyo caso se anteponen cuestiones formales o de distribución a la lógica del comportamiento natural de la estructura.

Desafortunadamente una parte de la arquitectura actual considera la estructura como un elemento secundario, casi molesto, pero difícil de obviar debido a la

inevitable ley de la gravedad por lo que esta relación se resuelve de manera superficial en muchos casos, sometiendo a la estructura a la rigidez de los espacios o distribuciones.

Sólo la buena arquitectura consigue fusionar la estructura con el resto de condicionantes del proyecto, otorgando a ésta una función concreta dentro de la arquitectura a la que sirven.

*Hacer buena arquitectura es, entre otras cosas, diseñar estructuras correctas, útiles, que se integran en el proyecto de forma que también son el proyecto.*<sup>18</sup>

En el campo de las estructuras reticuladas, la integración de la estructura dentro de la arquitectura pasa por diferentes estados, desde la estructura ajustada a la distribución de la planta<sup>19</sup>, como tantas veces sucede en la arquitectura actual, hasta la estructura reticular de hormigón como soporte e instrumento sobre el que se construye<sup>20</sup>.

Le Corbusier y algunos ejemplos del Movimiento Moderno encuentran la manera, liberando a la fachada de la estructura y definiendo los espacios entre dos planos de la manera más neutra posible. El propio Le Corbusier incluso adjudica a los materiales propiamente estructurales tales como el hormigón, una función plástica desligada del comportamiento estructural<sup>21</sup>. De esta forma no se puede negar que las estructuras han sido un elemento decisivo en la arquitectura del siglo XX, valorándose muy por encima de su estricta función resistente.

Desde otro punto de vista, el de la ingeniería civil y en concreto en el diseño de puentes, Javier Manterola ha realizado también una clasificación de esta tipología, no tanto desde la función formal de la estructura sino en relación a los diferentes profesionales que intervienen en el proyecto<sup>22</sup>.

Así pues, esta clasificación en varios grupos se desarrolla de la siguiente manera:

- Puentes diseñados por ingenieros y asesorados por arquitectos:

En los puentes de este grupo, el ingeniero establece los parámetros generales de diseño y el arquitecto “embellece” el diseño así como incorpora consideraciones de índole paisajístico y de relación con el entorno.

Ejemplos de este tipo son el puente Severin en Colonia (1960) fruto de la colaboración de G. Lomher con F. Leonhardt, Dykerhoff und Widman. [Fig. 1.2.9]

---

<sup>18</sup> BRUFAU, ROBERT. *Apuntes de estructuras I*. Capítulo I: Introducción al diseño de estructuras.

<sup>19</sup> Un claro ejemplo, aunque justificado debido a la reciente aparición del nuevo sistema estructural de pilares y forjados de hormigón, es el bloque de pisos de la Rue Franklin, en París, de August Perret.

<sup>20</sup> La casa del Fascio de Giuseppe Terragni muestra la retícula como elemento primario de la arquitectura.

<sup>21</sup> La Unitè d’Habitation en Marsella muestra en fachada una retícula de hormigón que nada tiene que ver con la estructura soporte del edificio.

<sup>22</sup> MANTEROLA, JAVIER. “*Arquitectos-Ingenieros. El futuro de los puentes*”. Revista de Obras Públicas, junio 1997 (págs.17 a 32)

- Puentes diseñados por arquitectos:

Generalmente son todos los puentes antiguos, construidos antes de finales de siglo XVIII, cuando todavía no había una diferenciación clara entre arquitectura e ingeniería. En estos casos los puentes están planteados a partir de los elementos constructivos tradicionales (muros, bóvedas, etc...) y proyectados como cualquier otro edificio.

Son buenos ejemplos los puentes diseñados por Juan Herrera y Pedro de Ribera en España o Andrea Palladio, Vincenzo Scamozzi o Antonio Da Ponte en Venecia (puente Rialto) y Robert Adam en el Pulteney Bridge de Bath. [Fig. 1.2.10]

- Puentes diseñados por arquitectos herederos del High-Tech:

La estructura es el centro y el punto de partida del diseño, aunque, en lugar de buscar disposiciones nuevas más eficientes se preocupan más por obtener configuraciones más expresivas y singulares, en cuyos casos muchas veces se antepone el criterio formal sobre el estructural.

Son los herederos del Archigram y Buckminster Fuller: Richard Rogers, Renzo Piano, Norman Foster o Nicholas Grimshaw son ejemplos iniciales de este tipo, aunque actualmente Calatrava ha ampliado este tipo de puentes en otra dirección. [Fig. 1.2.11]

- Puentes diseñados por arquitectos que rechazan consideraciones preestablecidas:

De este tipo no hay muchos ejemplos construidos aunque últimamente se empiezan a ver más proyectos interesantes en esta línea. El arquitecto que asume el diseño general del puente rechaza de antemano todas las consideraciones ingenieriles preestablecidas. Es el grupo de los “deconstructivistas” Frank Gehry, Peter Eisenman, Rem Koolhaas, Zaha Hadid, Daniel Libeskind, Coop Himmelblau o Enric Miralles y Carmen Pinós en España. [Fig. 1.2.12]

A esta clasificación puede añadirse un nuevo grupo, el de los puentes diseñados exclusivamente por ingenieros donde, como sucede en los casos anteriores, podemos encontrar todo tipo de resultados. Desde los puentes metálicos de Eiffel<sup>23</sup> y sus sucesores hasta los puentes más actuales la casuística de este grupo es muy amplia. Al principio los diseños se regían fundamentalmente por los criterios estructurales propios de la tipología habitual, la estructura metálica, y su claridad de funcionamiento estructural.<sup>24</sup> En el caso concreto del puente Eiffel de Girona, se trata de un entramado metálico, siguiendo el esquema clásico de armadura en celosía o Warren triple [Fig. 1.2.13]. Posteriormente, sobre todo desde la aparición

---

<sup>23</sup> Viaducto de Garavit en 1.879 y puente en Oporto sobre el Duero en 1.876. Más próximo es el ejemplo de la pasarela sobre el río Onyar, en Girona, construida por el taller de Gustave Eiffel en 1.876

<sup>24</sup> RESAL, Jean. “Consideraciones sobre la estética de las construcciones metálicas” Revista de Obras Públicas, 1919. Págs. 488 a 494

del pretensado, en muchos casos el único criterio a la hora de proponer este tipo de estructuras ha sido por desgracia el económico. José Antonio Fernández Ordoñez en su artículo *“Lo ligero y lo barroco en la ingeniería de los años treinta”*<sup>25</sup> realiza una reflexión al respecto. Actualmente hay buenos ejemplos donde, sin sobrepasar los límites de lo razonable y con diáfana claridad sobre su funcionamiento estructural, se ha asumido una función de orden superior para estas infraestructuras. Como muestra puede servir el puente del Euskalduna en Bilbao, diseñado por el propio Javier Manterola en 1.997.

Volviendo a la arquitectura en general, en cualquier caso, la cuestión es considerar y valorar qué papel desempeña la estructura en cada momento:

- Bien sea a la manera de Auguste Perret, adecuando la estructura al espacio que proyecta. [Fig. 1.2.14]
- Bien sea como Le Corbusier en su primera época, proyectando estructuras que no interfieren en el desarrollo de los espacios. [Fig. 1.2.15]
- Bien sea como Giuseppe Terragni, utilizando la estructura como instrumento de proyecto. [Fig. 1.2.16]
- O finalmente, como Frank Lloyd Wright, proyectando estructuras definidoras del espacio y fusionadas con la arquitectura. [Fig. 1.2.17]

Dando por hecho que la función resistente de la estructura es incuestionable y suponiendo que ésta se cumplirá tanto desde el punto de vista tensional como de deformaciones, es necesario reflexionar sobre el planteamiento de las diferentes soluciones tipológicas de la estructura, atendiendo a los criterios antes citados.

Actualmente diversas publicaciones y artículos, demuestran una cierta recuperación por el interés de incorporar la lógica constructiva de la estructura y sus materiales durante la concepción de la arquitectura. En la revista *Arquitectos*<sup>26</sup>, un número dedicado monográficamente a la estructura hace referencia a la estrecha relación entre arquitectura y estructura (*técnica y emoción*), cuestión que ha estado siempre clara a lo largo de la historia de la arquitectura y a que, como se ha dicho, a partir del Movimiento Moderno y la utilización del acero y hormigón, ha ido difuminándose hasta llegar en algún momento a disociarse. No obstante, los grandes maestros siempre han mantenido la indisolubilidad entre arquitectura y estructura dentro de su obra, relacionándose ambas de un modo u otro. A partir de los últimos años parece que dentro del panorama de la arquitectura mundial vuelve a tenerse en importante consideración que la estructura forma parte de la arquitectura, incluso como herramienta generadora de la propia arquitectura.

En varios artículos de este número de *Arquitectos* queda patente el interés por intentar recuperar la función arquitectónica de la estructura en la arquitectura actual, bien a través de la exposición de varios proyectos actuales o bien haciendo

---

<sup>25</sup> FERNÁNDEZ ORDOÑEZ, J.A. *“Lo ligero y lo barroco en la ingeniería de los años treinta”* *Revista de Obras Públicas*, 1983

<sup>26</sup> CHURTICHAGA, Jose María. *“La estructura veloz”*, *Revista Consejo Superior Colegios Arquitectos de España*, marzo 2008, págs. 48 a 55.



un repaso de diversos ejemplos proyectados en el S.XX, donde nunca se perdió esta estrecha relación.

Parece como si un nuevo criterio a la hora de abordar formalmente la arquitectura actual fuese el apoyarse en las diferentes formas de comportamiento estructural, volviendo al objetivo organicista de la arquitectura de Wright: observación de los modelos de comportamiento estructural de la naturaleza. Las bases de la nueva arquitectura no son normas compositivas ni estéticas sino, entre otras, el entendimiento del funcionamiento estructural y de los sistemas constructivos que se manifiestan como formas de expresión propias. Este criterio condujo a escribir "*Razón y ser de los tipos estructurales*" a Torroja, el "*Structurform*" a Curt Siegel<sup>27</sup> o "*Developments in structural form*" a R.J. Mainstone<sup>28</sup> cuya lógica de planteamientos trascendió a las disposiciones estructurales preestablecidas. En este sentido, los textos de Alexander Zannos "*Form and structure in architecture. The role of statical function*" y David P. Billington "*The tower and the bridge. The new art of structural engineering*" realizan una importante contribución a la hora de exponer los planteamientos arquitectónicos de la estructura.

Las aportaciones de Mario Salvadori a través de sus textos, en el mismo ámbito de la estructura y arquitectura, sugieren que la corrección y claridad del funcionamiento estructural induce a la belleza de la propia arquitectura. A través de los fenómenos físicos de la estructura, como la explicación del concepto de esfuerzos, tensiones o cargas y acompañado de múltiples ejemplos gráficos, permiten al lector visualizar de una manera clara y sencilla los conceptos estructurales, algunos de elevada complejidad, así como su repercusión formal o arquitectónica.

Como está quedando patente, tanto durante épocas pasadas como hoy en día, hay razones para pensar que la estructura en la edificación no sólo cumple estrictamente una función de soporte sino que tiene un papel importante a la hora de concretarse el proyecto de arquitectura. En los ejemplos históricos planteados, quizás de una manera no intencionada, la estructura ha configurado y caracterizado la arquitectura de diferentes maneras, pero siempre de forma muy significativa.

---

<sup>27</sup> Arquitecto e ingeniero de estructuras belga. 1911-2004. Formado como arquitecto, se especializó en el diseño y cálculo de estructuras. Fue conocido por sus enfoques didácticos en las enseñanzas de las estructuras en la arquitectura, aportando un punto de vista intuitivo de los principios fundamentales del comportamiento estructural. Su filosofía la plasmó en uno de sus libros más famosos "*Las formas estructurales de la arquitectura moderna*" (*Strukturformen der modernen Architektur*), publicado en 1960 casi al mismo tiempo que el *Razón y Ser* de Torroja.

<sup>28</sup> MAINSTONE, R.J. *Developments in Structural Form*. Penguin Books, Londres 1983. Mainstone realizó numerosos estudios sobre estructuras históricas como Santa Sofía en concreto y sobre arcos y bóvedas en general.



**Fig. 1.2.1** Arco de San Luis. Eero Saarinen y Frank Severud, 1968. La estructura es el motivo en sí del edificio y no sirve de soporte para ningún otro elemento ni función.

Las formas y tipologías estructurales pueden ser de lo más diversas y no responden a un comportamiento estructural determinado.



**Fig. 1.2.2** Torre de telecomunicaciones de Shukhov, Moscú 1922. Este tipo de estructuras sirven a un uso concreto, pero son el único elemento constructivo del edificio. La estructura configura la totalidad de la arquitectura



**Fig. 1.2.3** Bóvedas gausas de Eladio Dieste en una nave en Montevideo, 1979. La forma de la estructura define el carácter del espacio interior, especialmente debido al matiz que adquiere la entrada de la luz a través de la misma.



**Fig. 1.2.4** Lanificio Gatti en Roma, de Pier Luigi Nervi, 1952. Aunque contenidas en el plano, las formas que adopta la estructura, basadas en la optimización de las trayectorias tensionales en el techo, determinan el carácter del espacio inferior.



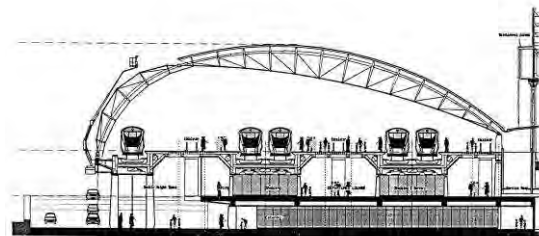
**Fig. 1.2.5** Edificio Consoni, construido en Zorrotzaurre, Bilbao, en 1957. La trama de la estructura sirve para ordenar el espacio, aunque no lo condiciona formalmente.



**Fig. 1.2.6** Laboratorio de Ingeniería Ford, MI, Albert Kahn, 1925. La estructura porticada es la referencia y condicionante para el resto de elementos constructivos.



**Fig. 1.2.7** Estación de Waterloo, N. Grimshaw, Londres 1993. A partir de una pauta determinada y de una notable sofisticación de los enlaces, la estructura colabora en la configuración formal de la imagen arquitectónica.



**Fig. 1.2.8** Oficinas para la Warren Londres Petroleum en Chicago, SOM 1957. La estructura resulta ser la malla generadora del edificio, optimizada no sólo para su comportamiento estructural sino también para otorgarle una proporciones correctas que permitan un mejor aprovechamiento del espacio interior.



**Fig. 1.2.9** Puente Severin, Fritz Leonhardt y Gerhard Lohmer, Colonia 1959. En el diseño del puente prevalece el criterio de claridad de su funcionamiento estructural, aunque se han considerado otras cuestiones para favorecer su integración en el paisaje.



**Fig. 1.2.10** Ponte Vecchio, Florencia, construido en 1345 por Tadeo Gaddi mediante elementos constructivos tradicionales, como las pilastras de piedra, los arcos de medio punto y muros, como si de un edificio se tratase.



**Fig. 1.2.11** Puente Millau, Norman Foster 2004. A partir de la aplicación de una tipología estructural eficiente, se intenta conseguir un efecto paisajístico que toma mayor importancia que la lectura del funcionamiento estructural.



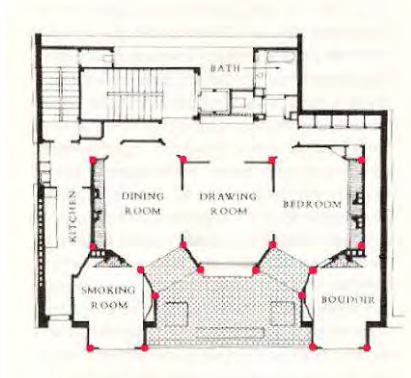
**Fig. 1.2.12** Puente Gladiolo. Zaha Hadid, Zaragoza 2008. El punto de partida nada tiene que ver con las formas estructurales ortodoxas. El criterio es puramente formal y a posteriori se le adaptan los sistemas estructurales que hacen posible su construcción.



**Fig. 1.2.13** Pasarela Eiffel sobre el río Onyar en Girona, 1876. El diseño del puente está guiado por la claridad y el correcto funcionamiento estructural. Sus dimensiones suelen estar optimizadas para todas las secciones y se considera mayor su nivel estético cuanto mayor sea el afinado del dimensionado.



**Fig. 1.2.14** Puente de Salginatobel, Suiza. Robert Maillart 1930. La forma del puente tiene una relación directa con el planteamiento resistente



**Fig. 1.2.15** Edificio de viviendas Rue Franklin n°3 en París. A. Perret, 1904: Adecuación de la estructura al espacio al que sirve. La posición de los pilares responde más a una cuestión formal que a una lógica estructural; son los inicios de la estructura reticulada de hormigón.



**Fig. 1.2.16** Villa Savoye, Poissy, Paris. Le Corbusier, 1929. Asumida la interesante posibilidad de separar cerramientos y estructura, Le Corbusier incorpora la planta libre como uno de los principios de su arquitectura, aprovechando así la independencia de la estructura.



**Fig. 1.2.17** Casa del Fascio, Como 1936. Giuseppe Terragni. La disposición de la estructura, en lugar de estar subordinada a la composición, se aprovecha para ordenar y caracterizar formalmente el edificio.



**Fig. 1.2.18** Edificio de oficinas para la Johnson Wax. Frank Lloyd Wright. Es difícil determinar dónde están los límites de la estructura, pero además de ordenar y organizar el espacio, sobre todo lo caracteriza con una impronta propia.



**Fig. 1.2.19** Prueba de carga de una de las columnas dendriformes del edificio.



### 1.3 Los grandes maestros

Frente al fenómeno de la revolución industrial y sus consecuencias en la arquitectura debido a los nuevos planteamientos estructurales, los arquitectos más importantes del siglo XX no sólo no encontraron un impedimento en esta situación, sino que hallaron en ella una nueva fuente de inspiración.

Pueden encontrarse de manera habitual en la obra de estos arquitectos diferentes maneras de abordar la reciente situación. Los grandes maestros de este siglo, Frank Lloyd Wright, Mies van der Rohe y Le Corbusier, así como Louis Kahn, Alvar Aalto, o Kenzo Tange, han desarrollado a lo largo de su obra bien una intuición del comportamiento estructural o bien unos criterios y unas pautas en el desarrollo de sus proyectos que han dado como resultado numerosos ejemplos de arquitectura donde es imposible disociar la estructura del resto de la arquitectura. A la manera descrita unos párrafos atrás, el papel de la estructura en estas arquitecturas siempre juega algún tipo de función por encima de la resistente; unas veces como pauta y otras aprovechando sus cualidades plásticas.

La gran amplitud de la obra de Le Corbusier dificulta el poder condensar su utilización de la estructura en un solo párrafo, no obstante pueden hacerse dos grandes grupos: La estructura neutra, según del modelo “Dom-ino” y la estructura plástica, que tiene su ejemplo más extremo en la iglesia de Ronchamp. En este segundo grupo entrarían todos los proyectos donde la utilización de la retícula de hormigón no sólo sirve para organizar el edificio sino que se aprovechan las propiedades plásticas propias del material. Esta característica integradora es inherente de la obra de Le Corbusier, del mismo modo que en el barroco los límites de cada una de las artes se difuminaban. Paralelamente, la visión maquinista de Le Corbusier de la arquitectura, como “máquina” de habitar, implícitamente engloba a la estructura dentro del mismo conjunto. Al igual que las diferentes versiones de *Unité d’Habitation* se organizan en varias partes según su uso (cubierta ajardinada, retícula y planta baja libre), la estructura que se muestra en cada una de estas partes responde de manera distinta según el uso. En texto publicado por Le Corbusier en “Ciencia y Vida” en 1960<sup>29</sup> expone su preocupación por la separación entre la arquitectura y la estructura, en este caso desde el punto de vista de la relación entre arquitecto e ingeniero.

*Al principio de la era industrial el ingeniero era humilde y tímido. Por contraste el arquitecto era pomposo y pretencioso. La tendencia actual [1960] es que el ingeniero sea despectivo y agresivo hacia el arquitecto y, así, la pelea comienza.*

Este razonamiento Le Corbusier lo materializa gráficamente mediante un dibujo donde se muestran las manos entrelazadas del arquitecto y del ingeniero, entre la ciencia y el arte, entre la arquitectura y la estructura, formando una unión equilibrada indivisible (como el Ying y el Yang). En un lado la esfera del ingeniero

---

<sup>29</sup> KOMENTDANT, August E. *18 años con el arquitecto Louis I. Kahn*. Edición a cargo de Fernando Agrasar. Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia. 2000. Pág. 22  
El texto de Le Corbusier aparece transcrito en la introducción del libro.



lanza un reflejo sobre la del arquitecto, el conocimiento de las leyes físicas y, en el otro lado la esfera del arquitecto refleja en la del ingeniero la comprensión de los problemas humanos (imaginación, belleza y creatividad). La intención de Le Corbusier era que ambos, arquitecto e ingeniero, se comprometiesen al mismo nivel en edificar la civilización de la nueva arquitectura [Figs. 1.3.1-3]. En este sentido, Wright también utilizó el mismo gesto con las manos para expresar otro concepto de fusión entre todos los elementos de la arquitectura, estructura y cerramientos, entrelazados de forma firme, pero dinámica, tal como se expondrá más adelante.

La admiración obsesiva de Le Corbusier por la máquina, por un lado, y las cuestiones sociales por otro, le condujeron hacia la producción industrial, íntimamente ligada a los sistemas constructivos estructurales. La casa Dom-ino y la casa Citröhan son resultado de este planteamiento así como la utilización de la técnica como forma de expresión arquitectónica. Este planteamiento compartido también con Mies van der Rohe, muestra, de la misma manera, un claro interés por evidenciar la resolución de los detalles de orden técnico e incorporarlos al conjunto como un elemento expresivo.

De los cinco principios de la arquitectura de Le Corbusier, la mayoría se apoyan sobre un planteamiento estructural particular: Construcción sobre pilares, cubiertas planas (terraza jardín), planta libre, fachada independiente de la estructura y ventanas longitudinales. Excepto la terraza jardín, que podría ser resuelta de múltiples maneras, el resto de puntos se basan y están íntimamente ligados al planteamiento de la estructura. La Ville Savoye de 1929 parece ser una materialización del sistema Dom-ino, pero sin relegar a la estructura a una función difusa, sino manteniendo su integridad dentro del conjunto. Así pues, la planta baja libre sobre pilotis, muestra el orden y geometría de la estructura. Desligar la fachada de su función portante permite abrir grandes ventanales horizontales que, en un segundo plano, muestran de nuevo la modulación de la estructura. La retícula define, no condiciona, pero sí caracteriza y, todo ello lo hace únicamente a partir de un plano horizontal soportado sobre columnas cilíndricas iguales. Este aspecto de la arquitectura de Le Corbusier seguramente es heredado de A. Perret, con quien colaboró en París durante su formación. [Fig. 1.3.4]

Más adelante, con la incorporación del hormigón estructural como elemento fundamental en su obra, Le Corbusier consiguió una fusión de la estructura con el resto de elementos constructivos. En ocasiones la estructura se muestra claramente en las fachadas, se entremezcla con otros elementos constructivos también de hormigón. La diferencia entre arquitectura y estructura se difumina a través del material en contraposición a la diferencia tan clara que él mismo planteaba durante el Movimiento Moderno. La Unité d'Habitation de Marsella, 1946-1952, el Palacio de la Asamblea de Chandigarh 1956, el Palacio de Justicia de Chandigarh 1956 o el convento de la Tourette 1957 manifiestan esta situación de la estructura. En su libro *Vers une architecture* declara su interés hacia la vertiente formal de la estructura: “*Los ingenieros utilizan las formas geométricas, satisfacen nuestros ojos mediante la geometría y nuestro espíritu mediante la matemática; sus obras marchan por el camino del gran arte*”<sup>30</sup>. Este párrafo hace referencia a las obras de

---

<sup>30</sup> LE CORBUSIER *Hacia una arquitectura*, Buenos Aires 1964. pág. 13. 1ª Edición *Vers une architecture* 1923

ingeniería americana, construidas con hormigón, tales como silos o elevadores de grano, los cuales también despertaron el interés de otro arquitecto, Erich Mendelsohn.<sup>31</sup>

Mies van der Rohe, por el contrario, utilizó la función formal de la estructura de una forma más pausada, de manera que el armazón de acero, bien fuese en las torres como en los grandes espacios, le ayudó a definir el orden de la arquitectura. En este sentido Mies es deudor de la arquitectura neoclásica de Friedrich Schinkel y de la arquitectura clásica en general (los órdenes de la arquitectura griega y romana), que disponen de la estructura como una herramienta de organización del conjunto no sólo por la superposición de órdenes en vertical, sino también por la retícula o malla organizadora del espacio. En el caso de Mies, a diferencia del clasicismo, en muchos de sus edificios se pierde la direccionalidad al disponerse la estructura de una manera totalmente isotrópica, como por ejemplo en la Neue Nationalgalerie de Berlín. En cambio en otros edificios la estructura define una orientación o por lo menos un orden jerárquico de los elementos estructurales como en la Biblioteca y Edificio Administrativo del ITT de Chicago. [Figs. 1.3.5-7] El orden jerárquico también se muestra en las soluciones constructivas de los cerramientos donde, a partir de la estructura, los diferentes elementos de fachada se van superponiendo y organizando de un modo ordenado.

Para Mies la utilización de los diferentes materiales estructurales supone una caracterización diferente de la arquitectura. Aunque la mayor parte de sus edificios de la etapa americana son de estructura de acero, en origen, durante sus inicios en Alemania, propone tres líneas diferentes: la estructura de acero (Rascacielos para la Friedrichstrasse de Berlín en 1919 y Rascacielos de acero y vidrio de 1922), la estructura de hormigón (edificio de oficinas de hormigón armado para Berlín, 1923) y los muros portantes de fábrica (casa rural con muros de ladrillo de 1922 y casa rural con muros de hormigón 1922). En estos tres grupos de edificios, a pesar de utilizar materiales diferentes y de ser proyectos también de escala diferente, el planteamiento frente a la estructura es el mismo. La estructura queda desligada de la función de cerramiento, incluso en la casa con muros de ladrillo, separando las fachadas de los soportes. De esta época europea no hay muchos ejemplos construidos, pero en el Pabellón para la exposición de 1929 en Barcelona, Mies condensa ya este principio desligando a los muros interiores que definen el recorrido de su función resistente, del mismo modo que la arquitectura de De Stijl. [Figs. 1.3.8-10]

Alvar Aalto y Louis Kahn, así como otros tantos arquitectos contemporáneos suyos, han incorporado la estructura en sus obras de diferentes maneras. Para Aalto la Arquitectura Moderna no significaba la utilización de materiales nuevos, sino el uso de los existentes de una forma más humana o más próxima a la sensibilidad de los espacios. De esta manera, la estructura es en muchos casos el medio de transmisión de la luz, unos de los elementos fundamentales de su arquitectura. La iglesia de Riola o la biblioteca de Viipuri son buenos ejemplos de ello y también

---

<sup>31</sup> MENDELSON, Erich. *“Amerika: Bilderbuch eines Architekten”* 1926. En 1924, Mendelsohn viaja a los Estados Unidos (donde por cierto, visitó a Wright en Taliesin) y le llamó especialmente la atención los volúmenes de hormigón de los grandes silos. En 1926 publicó el libro con una colección de fotografías de este tipo de construcciones.

próximos al organicismo arquitectónico. Su arquitectura intenta mostrar ritmos diferentes a los de la naturaleza por lo que en este sentido es más próximo a Wright que el resto. En cuanto a Kahn, la contundente geometría de su arquitectura se apoya sobre la propia estructura, a menudo aprovechando la plasticidad de sus materiales, como en la biblioteca de Exeter y, en otras ocasiones, en el Museo de Arte Kimbell, a partir de la definición de las bóvedas que permiten la entrada de luz hacia el interior. Si en la arquitectura de Kahn la función sigue a la forma, en muchos casos la estructura precede a la forma, ya que la estructura portante es la materia prima, la base de su arquitectura. En el planteamiento filosófico de Kahn siempre estuvo presente la implicación de los materiales utilizados y por extensión los sistemas constructivos planteados, dentro de los cuales se encuentra la estructura [Figs. 1.3.11-14].

Frank Lloyd Wright es el único arquitecto de los mencionados que nació y se formó en Estados Unidos, cuestión que seguramente influenció su actitud frente a las posibilidades de integración de la estructura en su arquitectura. Un claro ejemplo de esta cuestión son los proyectos realizados para Bagdad, al final de su carrera. Le Corbusier, Walter Gropius, Alvar Aalto o Gio Ponti, también realizaron proyectos de edificios para Bagdad, pero la gran diferencia entre sus proyectos y los de Wright radica en el papel de la estructura. Los proyectos de Wright manifiestan su intención de fusionar no de separar. En cambio las propuestas de los otros arquitectos apuestan por la línea del Estilo Internacional, separando la estructura del resto de elementos. En una segunda lectura, Wright pretendía posiblemente una aproximación entre culturas y no una separación.

Tal como se expondrá más adelante con detalle, su gran intuición sobre el comportamiento estructural le permitió plantear soluciones cuya definición caracteriza por completo el resultado arquitectónico. Los archiconocidos voladizos de la Fallingwater House o los pilares de la Johnson Wax potencian y significan la arquitectura que envuelve el espacio. Es tal la peculiar atmósfera de estos espacios que incluso se han llegado a utilizar edificios de Frank Lloyd Wright como escenario de películas futuristas. En las películas *Gattaca*, de Andrew Niccol en 1997 y *THX 1138* de George Lucas en 1969 se muestra el espacio central de Marin County Civic Center en San Rafael, California [Fig. 1.3.19-20]. En *Blade Runner*, de Ridley Scout en 1982, el interior de la Ennis House [Fig. 1.3.21] o las imágenes de Brocade City [Fig. 1.3.22] sirven como ambientación para interiores o ambientes urbanos futuristas. La película *El manatíal [The Fountainhead]*, de King Vidor en 1949, aunque como una alusión indirecta al estar Wright todavía vivo, también se hace referencia a la vida y obra del arquitecto.

La principal diferencia de Wright respecto a sus colegas era, a priori, el planteamiento respecto a la industrialización de la construcción y, en cambio, partiendo a menudo de la observación de la naturaleza tanto en sus formas como en sus colores. Wright, sensible al progreso de las técnicas constructivas, fue pionero en la utilización de bloques de hormigón para la construcción de muros, donde, a la manera de tiempos pasados, volvían a confluir en un solo elemento estructura, cerramiento y ornamento. Por otro lado, en la época en la que desarrolló su filosofía usoniana, mantuvo una constante preocupación por la estandarización del sistema constructivo, llegando incluso a proponer un sistema de autoconstrucción específico

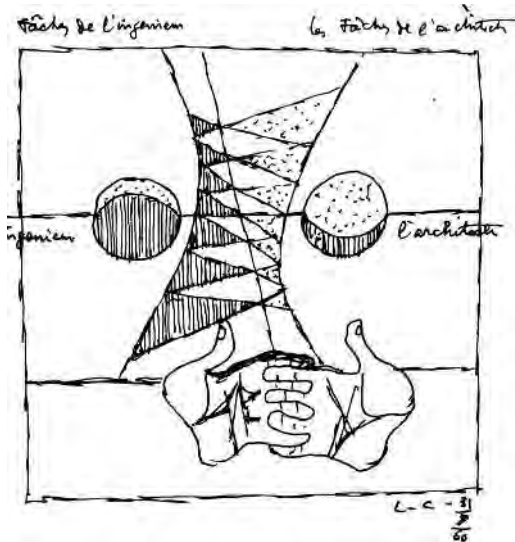
para algunas casas de esta época. En cualquier caso, para Wright los métodos de construcción seriada, en concreto de la estructura, no le resultaban muy estimados seguramente porque le recordaban demasiado a la retícula de acero de la Escuela de Chicago de la que siempre intentó alejarse. Aquí se plantea uno de los dilemas de su arquitectura: La estructura no reticulada, planteada mediante planos deslizantes y con formas orgánicas, al mismo tiempo que la utilización del hormigón (material por excelencia del siglo XX) incluyendo su industrialización, todo ello basado en una trama subyacente no apreciable en primera instancia.



**Fig. 1.3.1** Unité d'Habitation de Marsella, Le Corbusier 1952. El cambio del sistema de la estructura en las plantas superiores a una macroestructura mediante pilares y un gran tablero de hormigón, permite liberar la planta baja del edificio, al mismo tiempo que se obtiene un interesante resultado formal.

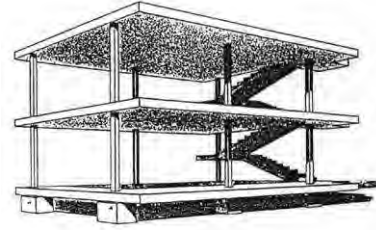
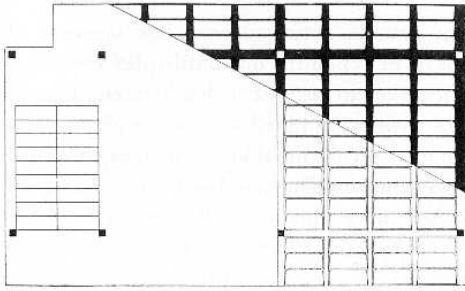


**Fig. 1.3.2** Edificio para la Asamblea de Chandigarh, 1961. Le Corbusier. La plasticidad propia de la estructura de hormigón así como su facilidad para ser "moldeada" se utiliza como uno de los motivos formales característicos de esta etapa de la obra de Le Corbusier.

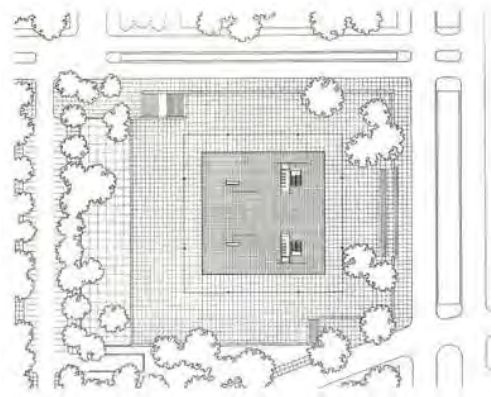


**Fig. 1.3.3** El dibujo de Le Corbusier representa el equilibrio entre ciencia y técnica, donde la unión entre la ingeniería y la arquitectura se simboliza mediante unas manos entrelazadas. Wright también utiliza el mismo gesto de las manos entrelazadas, pero en su caso para representar la continuidad entre elementos estructurales, en contraposición al sistema de vigas y pilares.

**Fig. 1.3.4** Sistema de estructura para la *maison Dom-ino*, Le Corbusier 1915. La estructura neutra, ni condiciona, ni caracteriza. Tampoco se subordina a las distribuciones.



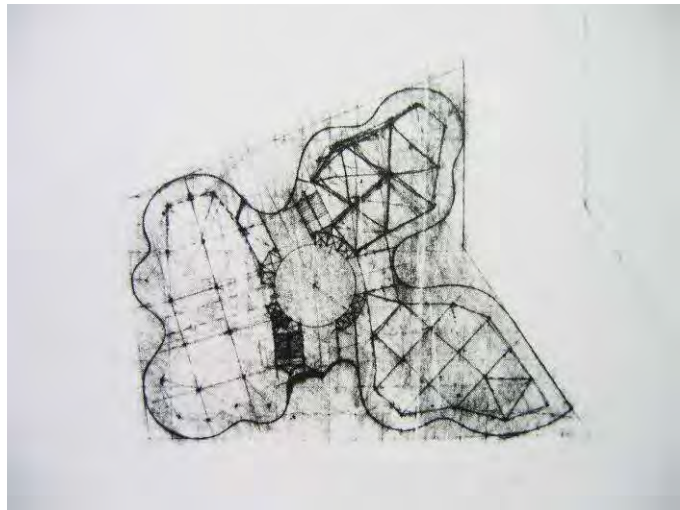
PROYECTO INDUSTRIAL DE MIES VAN DER ROHE  
MIES VAN DER ROHE ARCHITECTS  
100 - 16 STREET NEW YORK N.Y.



**Fig. 1.3.5-6** El Crown Hall en Chicago y la Galería Nacional de Berlín, 1956 y 1968 respectivamente, de Mies van der Rohe, presentan un planteamiento clásico de la estructura a través del orden, la pauta y una superposición jerárquica de elementos.



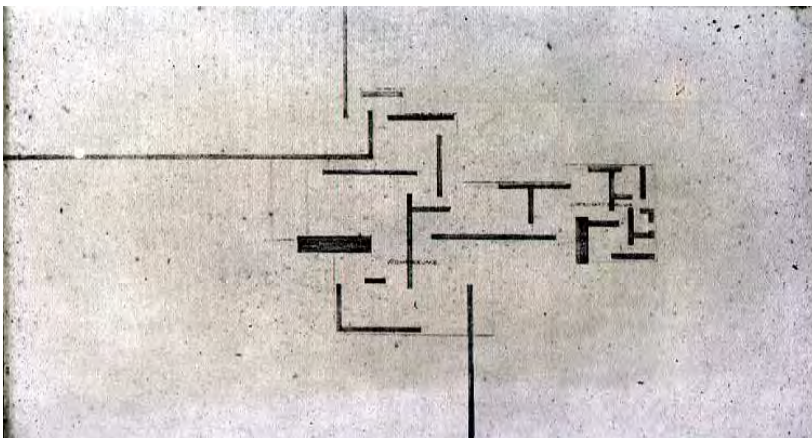
**Fig. 1.3.7** Seagram Building en New York, Mies van der Rohe 1957. La estructura se dispone frente a un vacío de las mismas dimensiones del edificio. Está optimizada para su correcto funcionamiento resistente y sirve a la vez como referencia en distribuciones y resto de sistemas constructivos. Una superposición de órdenes: zócalo, planta baja, cuerpo y coronación ayuda a completar es esquema compositivo del conjunto.



**Fig. 1.3.8** Rascacielos para la Friedrichstrasse de Berlín en 1919, y rascacielos de vidrio 1922, de Mies van der Rohe. La estructura de acero interior permite descargar las fachadas de su función portante, transformándose éstas en vidrio. La intención es conseguir una mayor transparencia hacia el exterior a través de la desmaterialización de la estructura, la cual conduce a que en algunos dibujos, ni siquiera se intuya la posición de los pilares.



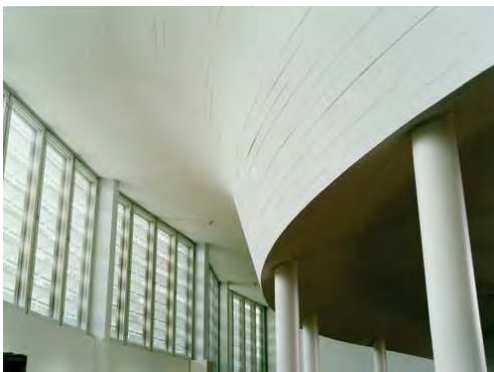
**Fig. 1.3.9** En contraposición, en el edificio de oficinas de hormigón armado para Berlín, 1923, Mies van der Rohe utiliza el hormigón de la estructura hasta las fachadas, perdiendo su función portante y tomando importancia el carácter expresivo del material.



**Fig. 1.3.10** Casa rural con muros de ladrillo de 1922, Mies van der Rohe. Sistema de muros portantes, pero sin función de cerramiento. La disposición de los muros en cruz permite el soporte de la cubierta, el arriostramiento entre ellos y la transparencia en las fachadas.



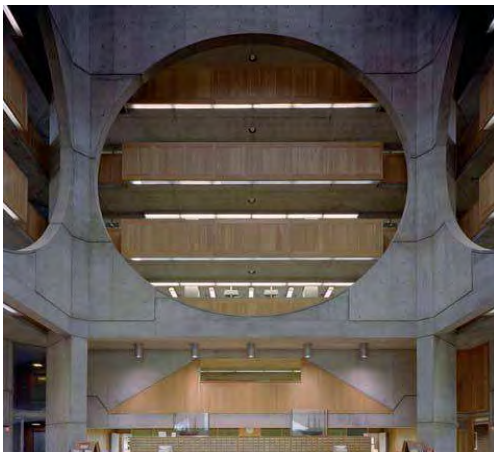
**Fig. 1.3.11** En la iglesia de Riola de Alvar Aalto, 1978, las suaves formas de la estructura sirven como base y tamiz de las entradas de luz natural.



**Fig. 1.3.12** En la biblioteca y centro cívico de Seinäjoki en Finlandia, 1958, también de Alvar Aalto, la estructura de nuevo sirve de soporte y materialización de la luz dentro del edificio.



**Fig. 1.3.13.** El comportamiento laminar de las bóvedas del Museo Kimbell de Louis Kahn, 1972, posibilita la entrada de luz a través de los laterales y el centro.



**Fig. 1.3.14.** En la Biblioteca Exeter, también de Louis Kahn, 1972, la estructura es la materia del espacio: la función sigue a la forma.





**Fig. 1.3.15** Interior del Gimnasio Olímpico Yoyogi en Tokio, Kenzo Tange 1958. El espacio interior se consigue a través del planteamiento de una estructura singular formada por un sistema de catenarias principales y secundarias.



**Fig. 1.3.15** Exterior del edificio. La forma de la estructura responde a su comportamiento resistente y a la vez resulta ser la clara imagen del edificio.



**Fig. 1.3.17** Palácio do Planalto, Brasília 1958. Oscar Niemeyer. El edificio, heredero de la arquitectura de Le Corbusier, aprovecha las posibilidades plásticas del hormigón para otorgar una imagen a través de la estructura.



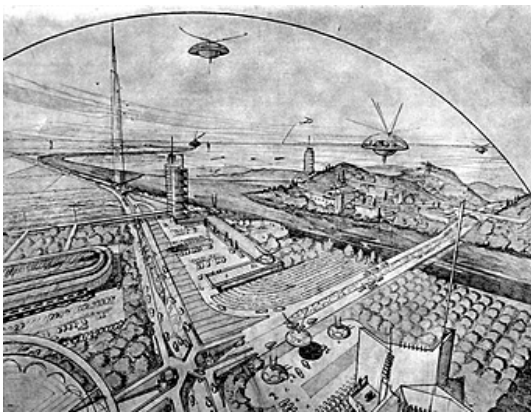
**Fig. 1.3.18** Catedral de Brasília, 1970, Oscar Niemeyer. La estructura basada en una geometría a partir de secciones hiperbólicas se utiliza como la propia imagen del edificio.



**Fig. 1.3.19-20** Marin Center, San Rafael 1957. Frank Lloyd Wright. La forma de la estructura caracteriza el espacio, otorgándole esa peculiar atmósfera que resulta tan sugerente. Este espacio central recuerda en cierto modo al interior del Museo Guggenheim, donde el borde interno de la espiral continua define el vacío interior y ha servido como escenario para varias películas de ambiente futurista.



**Fig. 1.3.21** Interior de la Ennis House de Frank Lloyd Wright, Los Angeles 1924, que ambientó el apartamento de Deckard en Blade Runner. Este mismo escenario ha servido también para ambientar otras películas.



**Fig. 1.3.22** Propuesta para Broadacre City presentada en 1932 dentro del libro “*The Disappearing City*”. Edificios proyectados por Wright colonizan un entorno natural de ambiente futurista, donde el planteamiento resultaba ser el ideal de calidad medioambiental y naturaleza disponible para todo el mundo. En esta ciudad ideal se materializaban las ideas sociales de Wright, patentes también a nivel constructivo en muchos de sus edificios.



**Fig. 1.3.23** Unos años antes, en 1927, Fritz Lang presentó en la película Metropolis una visión maquinista respecto a la ciudad del futuro, poniendo de manifiesto la diferencia entre las clases sociales a través del escenario arquitectónico (ciudad de rascacielos VS submundo subterráneo).



**Fig. 1.3.24** Ciudad andante, Archigram 1964. Más allá de la imagen inmediata de una ciudad de máquinas, el mensaje es el de la aplicación de la tecnología e ingeniería más avanzada en beneficio de una arquitectura con fines sociales. La réplica a estas propuestas se materializó en todas las obras *High Tech*, herederas de la obra de Buckminster Fuller, y que basan su imagen en la materialización de su estructura.

## 1.4 La arquitectura de Frank Lloyd Wright

En una entrevista realizada a Wright<sup>32</sup>, éste definió la arquitectura orgánica como la realizada a partir de la resistencia a tracción de los materiales. En contraposición, columnas y vigas se apilan unas sobre otras sin resistencia alguna a la tracción o a la unidad. Este concepto lo denominó como “tenuity”<sup>33</sup>, y lo ilustró de manera gráfica entrelazando los dedos de las manos de una manera flexible, pero firme, que él asociaba con los puentes de ferrocarril sobre caballetes<sup>34</sup> [Fig.1.4.1]. De este mismo modo, entrelazándose como sus manos, la arquitectura de Frank Lloyd Wright representa un claro ejemplo de fusión entre arquitectura y estructura, y puede servir como base de este trabajo de investigación. [Fig.1.3.3]

Su preocupación por la comprensión de modelos estructurales de la naturaleza, junto con una gran intuición, le llevó a proponer la estructura de sus edificios de una manera diferente a la de la retícula de acero u hormigón, en un intento por escapar de las soluciones estáticas de entramado y a la búsqueda de espacios con una continuidad dinámica, haciendo que la estructura formase parte de la arquitectura.

Entre las primeras obras, las “casas de la pradera” (entre 1893 y 1910), aunque con rudimentarios mecanismos técnicos, muestran la estructura en voladizo de la cubierta con una clara intención arquitectónica, proyectando la línea horizontal de la cubierta sobre el amplio horizonte de la pradera. Más tarde, con la aparición del hormigón armado, intentó emplear la cualidad plástica del nuevo material, aprovechando su capacidad estructural a la vez que su textura y versatilidad a la hora de modelarlo. Claro ejemplo temprano de su utilización es el Templo Unitario, en 1904, primer edificio construido con hormigón, o la serie de casas construidas con el sistema “block” de prefabricados de hormigón, desarrollado durante los años veinte.

Pero pronto se dio cuenta de la capacidad de este material para construir otro tipo de estructuras que, sin interrupciones entre columna y viga o entre muro y techo, sino formando un continuo, son al mismo tiempo soporte, cerramiento o entrada de luz. En definitiva, caracterizando el espacio por una fusión entre la estructura y la arquitectura. Proyectos como el edificio administrativo de la Johnson & Son Company, la Casa de la Cascada, el Guggenheim Museum o la St. Mark Tower, son ejemplos bien conocidos donde es incuestionable esta fusión estructura-arquitectura, aunque hay que señalar que no sólo en estas obras más conocidas aplicó los conceptos estructurales de continuidad, sino que los fue desarrollando a lo largo de toda su carrera.

Sobre Frank Lloyd Wright existe cuantiosa información publicada, incluyendo los ocho volúmenes correspondientes a las obras completas, donde, a través de toda la obra, se encuentran abundantes ejemplos no tan conocidos donde experimentó y

---

<sup>32</sup> Exposición sobre Frank Lloyd Wright. Guggenheim de Bilbao 2009-2010

<sup>33</sup> Tenuity: Para Wright, cualidad de la unión entre elementos estructurales, que permite una unión flexible, de transición suave entre elementos, pero al mismo tiempo firme.

<sup>34</sup> Railway trestle bridges

puso en práctica los conceptos estructurales que le permitieron llegar a sus obras más famosas. Paralelamente a la evolución de su obra, Frank Lloyd Wright escribió su autobiografía, documento clave entre otras cosas a la hora de entender el nacimiento de muchos de los conceptos estructurales materializados después en sus obras. Como ejemplo, sirva la descripción que hace sobre uno de sus primeros encargos, un molino de viento para sus tías [Fig.1.4.2].

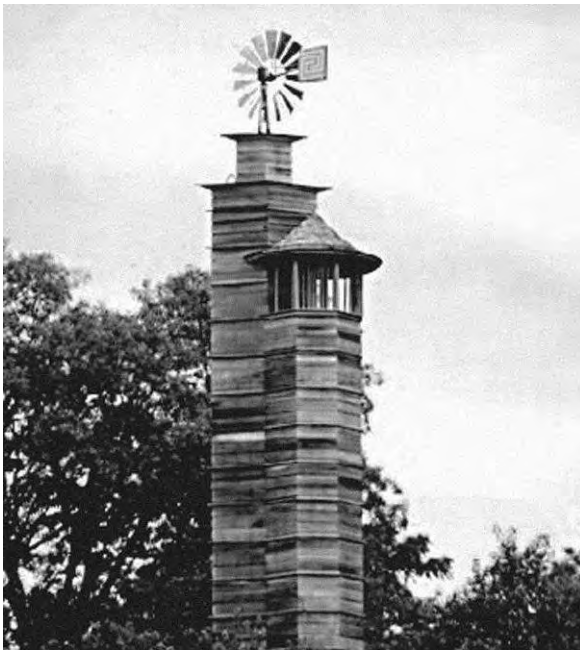
*“Cramer dice que malgastaremos tiempo y dinero en construir esa torre. El viento la tirará; tan seguro como que hay Muerte e Impuestos. ¡Sesenta pies de altura! Una rueda de catorce pies en lo alto de aquello. Dice que la cosa es una especie de tubo octogonal de madera, con pies derechos de cuatro por cuatro pulgadas en cada esquina, y con tablas clavadas alrededor de los pies derechos por dentro y por fuera. Todo el exterior recubierto por tablas. Es exactamente como un barril, solo que las duelas van alrededor, de lado a lado, en lugar de arriba abajo. Hay una parte en forma de diamante encajada en la parte octogonal hasta el centro. En el exterior la mitad del diamante hace de “proa”, Frank lo ha llamado “corta-tormentas”...*

Hay numerosos ejemplos donde habla de conceptos estructurales básicos como estabilidad sismorresistente, inercia, pretensado... siempre desde su peculiar manera intuitiva de entender el comportamiento estructural. En 1.886 comenzó sus estudios en la Escuela de Ingenieros Civiles de Wisconsin y un año más tarde los abandonó para trasladarse a Chicago y empezar a trabajar como arquitecto, primero con Joseph Lyman Silsbee y más tarde con Adler & Sullivan. En este último caso, se trataba de una colaboración entre un ingeniero, Adler, y un arquitecto, Sullivan. Los estudiosos de la obra de Wright siempre han considerado la influencia sobre Wright de su *lieber meister* Sullivan, pero ¿pudo haber influido también Adler como ingeniero?. En caso de ser afirmativo podría haber sido, en cierto modo, en sentido inverso ya que, como se expone más adelante, una de las constantes desde el inicio en Wright fue la huída de la retícula estructural, siempre presente durante el trabajo de Wright con ambos. En cualquier caso, como se verá más adelante, la experiencia y conocimientos técnicos adquiridos por Wright durante el trabajo con Adler y Sullivan tienen un reflejo directo en diversas soluciones estructurales empleadas posteriormente, como la utilización de pilotes en las cimentaciones.

Frank Lloyd Wright es sin duda uno de los arquitectos del siglo XX más estudiados y los planteamientos de su obra no han perdido vigencia. Actualmente parece que se retoman antiguos intereses o mecanismos de abordar la arquitectura, tales como el término orgánico. En este caso, entendiendo orgánico como una perfecta simbiosis entre las formas arquitectónicas y el comportamiento estructural de los materiales. Este concepto en realidad es muy antiguo y, desde que las teorías de la arquitectura se han planteado, siempre ha estado en situación latente de alguna manera u otra. El estudio del comportamiento de diferentes aspectos de la naturaleza sirve hoy en día como fuente de inspiración a las futuras arquitecturas, de la misma manera que lo hizo con Wright.



**Fig. 1.4.1.** Los puentes de ferrocarril a los que se refiere Wright (Railway trestle bridges) estaban formados por un entramado continuo de pequeñas piezas de madera, entrelazadas entre ellas formando caballetes. Este sistema se aproxima al concepto de “*tenuity*” de Wright ya que las uniones, al mismo tiempo que son firmes, permiten una cierta flexibilidad entre ellas.



**Fig. 1.4.2.** El molino de Hillside Home School en Wisconsin es una de las primeras obras construidas por Wright. Sus inquietudes e intuición sobre aspectos estructurales quedan reflejadas en su Autobiografía.



**Fig. 1.4.3.** Vivienda y estudio de Frank Lloyd Wright, Oak Park 1895. El conjunto, construido en varias fases, manifiesta ya una cierta evolución temprana de la obra de Wright, diferenciándose claramente la parte de la vivienda, más próxima a la arquitectura tradicional americana y el estudio, donde se sientan algunas de las bases de proyectos posteriores. Esta evolución se basa fundamentalmente en el planteamiento de la estructura.



## 1.5 El planteamiento estructural de la Escuela de Chicago

En 1956, tres años antes de la muerte de Frank Lloyd Wright, Colin Rowe publicó un artículo titulado “*La estructura de Chicago*” (“*Chicago Frame*”)<sup>35</sup>. En él se exponían las bases sobre la integración de la estructura en la arquitectura, en concreto en la arquitectura desarrollada en Chicago a finales del siglo XIX, y el rechazo de Wright hacia este planteamiento, no sólo por el orden clásico de esta arquitectura, sino principalmente por el significado atribuido a la estructura portante en la arquitectura moderna. En el discurso de Rowe se expone la problemática que representa darle un significado a la estructura portante de los edificios en referencia a las cuestiones formales de la arquitectura, poniendo así de manifiesto la gran diferencia entre las propuestas de la Escuela de Chicago, o el entramado de acero, y la arquitectura de Frank Lloyd Wright, o la concepción orgánica.

Wright, uno de los grandes arquitectos del siglo XX, representa un claro ejemplo de esta fusión entre estructura y arquitectura. Ya desde sus primeras obras, la intención y búsqueda de la destrucción de la caja supuso un enfrentamiento respecto a la línea más usual del momento.<sup>36</sup> El texto de Rowe expone este razonamiento sobre la estructura como definidora del espacio. El comienzo del artículo expresa esta idea de manera bastante clara:

*El esqueleto del entramado de acero o de hormigón es casi con toda certeza el motivo que aparece con mayor periodicidad en la arquitectura contemporánea, y seguramente es uno de sus elementos constituyentes.*

Según Le Corbusier, los ingenieros norteamericanos de la época estaban guiados simplemente por los resultados de un cálculo, sin tener en cuenta la búsqueda de una idea arquitectónica. El Estilo Internacional y la arquitectura posterior buscaron la manera de resolver la relación entre arquitectura y estructura separando su funcionalidad manteniéndose el espacio y la estructura de manera independiente dentro de la arquitectura. Unas veces pasando la estructura a un primer plano protagonista, otras disolviéndose en la arquitectura.

*“Le Corbusier ilustra el sistema estructural de su experimental Casa Dom-ino; pero, aunque su función primaria sea evidente, además de este valor práctico, el entramado ha adquirido un significado menos reconocido”*

Con este fragmento, Rowe insinúa que la estructura no sólo cumple un papel de soporte, función primaria, sino que también tiene un significado y que desempeña un papel dentro del conjunto arquitectónico. En el caso concreto de la “Escuela de Chicago”, el entramado estructural otorgaba al global de la arquitectura una potente simbología que permitía establecer relaciones, disciplina en el diseño y en

---

<sup>35</sup> ROWE, Colin. *La estructura de Chicago*.

El artículo se recoge en su versión en castellano en el libro *Frank Lloyd Wright*, junto a los textos de H. Allen Brooks, H.R. Hitchcock, N. Levine y V. Scully en una edición a cargo de José Angel Sanz. Ed. Stylos, Barcelona 1990, págs. 113-135

<sup>36</sup> Frank Lloyd Wright empieza su carrera profesional a finales del siglo XIX, coincidiendo con la aparición masiva de las estructuras reticulares de acero y hormigón.



definitiva la generación de la forma. La estructura ha sido el impulsor de un tipo de arquitectura, pasando ésta a ser “arquitectura” en primer lugar.

*“El entramado [la estructura] ha adquirido un valor, para la arquitectura contemporánea, equivalente al que tuvo la columna para la antigüedad clásica y el Renacimiento”.*

Es necesario reconocer que las estructuras reticuladas, tanto metálicas como de hormigón, han estado presentes en toda la arquitectura del siglo XX, unas veces como retícula generadora, y por lo tanto cumpliendo una función de pauta y orden del espacio, y otras veces sometida a las necesidades espaciales y de distribución del proyecto y relegadas únicamente a su función de soporte.

Dentro de este contexto, Frank Lloyd Wright desarrolló e investigó nuevas formas arquitectónicas que hoy nos parecen completamente superiores a cualquier otro ejemplo de la época. La arquitectura como composición de planos deslizantes se basa fundamentalmente en la integridad entre la estructura (el voladizo) y la arquitectura. Chicago se avanzó al papel formal de la estructura y Wright se adelantó a los principios formales de la nueva arquitectura.

En cuanto a Le Corbusier, hay un cierto paralelismo en sus reflexiones respecto de las de Wright, aunque en este caso, no basado en el entramado de acero de Chicago sino en la retícula de hormigón de Auguste Perret. ¿Se trata de una sincronía a ambos lados del Atlántico? Posiblemente la arquitectura moderna, tarde o temprano, estaba predestinada en volver a unir estos dos aspectos inicialmente separados, arquitectura y estructura y por eso pueden considerarse, entre otras cosas, a estas dos figuras como los grandes genios de la arquitectura del siglo XX. La utilización del hormigón frente al entramado metálico, permitió acentuar la condición plástica de este material estructural mediante una geometría tridimensional de superficies, un sistema continuo donde no hay una diferencia clara entre soportes verticales y elementos horizontales, y no la linealidad de columnas y vigas formando un sistema reticulado.

Rowe expone que en Chicago surgieron simultáneamente dos de los motivos más importantes de la arquitectura del siglo XX: la estructura de entramado y la composición de planos intersecados (el voladizo). En el caso del entramado, los edificios de la Escuela de Chicago fueron los primeros ejemplos y respecto de la composición a partir de planos deslizantes, las casas de Frank Lloyd Wright de esa primera época representaron un avance de los logros de este tipo de arquitectura configurada a partir de voladizos [Figs. 1.5.1-2]. Los éxitos conseguidos por Wright en ese sentido fueron pronto olvidados y no valorados hasta su posterior reconocimiento en Europa, varias décadas después. No sucedió así con la otra variante, la retícula, heredada por Mies y aplicada más tarde en varios edificios del campus de Chicago.

La cuestión es que Wright, sucesor directo de los maestros de Chicago de finales del siglo XIX, rechazó de manera manifiesta el planteamiento reticular de la estructura. Es verdad que no hay numerosos ejemplos de edificios de oficinas en la obra de Wright, pero en los pocos que existen construidos o proyectados hay una intencionalidad directa de huir de ese esquema. En el caso del edificio Larkin en Buffalo, es más poderoso el ambiente “catedralicio” de su atrio que la pauta

marcada por ninguna retícula, a pesar de haberse utilizado una estructura metálica convencional, al uso de la época. Más acusado es este rechazo en el edificio administrativo de la Johnson en Racine donde el espacio está caracterizado no por la retícula estructural sino por la forma estructural de los pilares, que se funden en la cubierta con la entrada de luz natural. [Fig. 1.5.3]

El intento de huida de Wright del entramado estructural hacia el voladizo no fue fácil. En los edificios de la primera época, sobre todo cuando se trató de programas administrativos y torres (proyectos para el Luxer Prism Sky-craper, el Lincoln Center o el edificio Press en San Francisco) Wright intentaba de una manera ferviente alejarse del entramado estructural, *luchando contra un problema que le parecía irresoluble y con el cual se encontraba a disgusto*<sup>37</sup> No obstante en el proyecto para el rascacielos de la Nacional Life Insurance Company de 1924 puede intuirse una propuesta diferente a la del entramado y que sí se identificaba con las propuestas desarrolladas posteriormente por Wright: la composición a partir de voladizos que otorga a los espacios una composición dinámica de volúmenes transparentes en contraposición a la solución estructural más estática del entramado. [Figs. 1.5.4-5] El motivo del voladizo ya lo había utilizado en el proyecto del Hotel Imperial de Tokio. Según Henry-Russell Hitchcock “*Wright asimila la construcción especial utilizada en el Hotel al equilibrio de una bandeja en los dedos de un camarero*”<sup>38</sup>. De todas maneras este aspecto es muy sutil tanto en el Hotel de Tokio como en el Nacional Life Insurance Company y no es hasta el proyecto de la St. Mak’s Tower cuando se muestra de una manera explícita y a gran escala la imagen descrita por Hitchcock, donde los forjados de la torre salen en voladizo a partir de un núcleo portante. De esta manera, los hongos del edificio de administración de la Johnson y las diferentes versiones de torres propuestas a partir de un tronco central, surgieron *de la exigencia “orgánica” de la integración de espacio y estructura*. Según Rowe en la obra de Wright hay una fusión invisible entre estructura y espacio, que caracteriza el término “orgánico”. La observación de la naturaleza y el comportamiento mecánico-estructural de sus elementos, sirvieron de inspiración en muchos de estos casos.

La animadversión de Wright por el entramado de estructura, continúa Rowe, es debido a la imposibilidad por su parte de separar formalmente la estructura y la arquitectura. En el caso de Mies y Le Corbusier, así como numerosos ejemplos de arquitectura de Estilo Internacional, el planteamiento fue radical y consistió en separar tanto funcionalmente como formalmente el entramado de estructura de la arquitectura; no hay fusión entre arquitectura y estructura. En el caso de Wright, Rowe sugiere que su concepción “orgánica” de espacio y estructura le impidió realizar esta separación y por lo tanto para él la retícula estructural como tal es un impedimento y no una ayuda. La razón de ser de la extremada racionalidad y efectividad del entramado de la estructura en la Escuela de Chicago era fruto, no de una intencionalidad estética, sino de una necesidad de máximo aprovechamiento

---

<sup>37</sup> ROWE, Colin. *La estructura de Chicago*. Frank Lloyd Wright, Ed. Stylos, Barcelona 1990, pág. 120

<sup>38</sup> ROWE, Colin. *La estructura de Chicago*. Frank Lloyd Wright, Ed. Stylos, Barcelona 1990, pág. 120. Corresponde con la nota 3 del artículo.

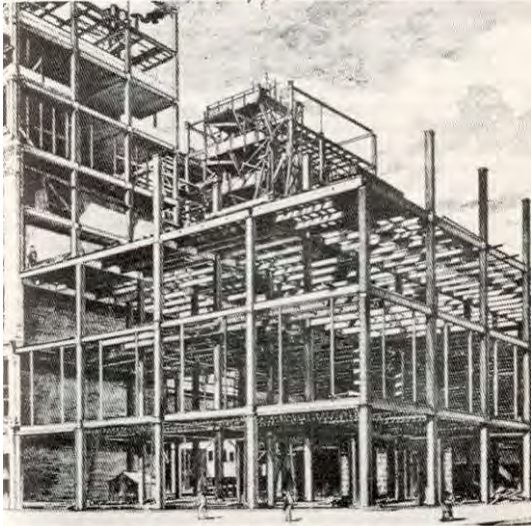
económico, carente de cualquier contenido formal. En Chicago y en Estados Unidos, el entramado de estructura habría sido concebido como un valor práctico relacionado con el rendimiento económico de los hombres de negocios de Chicago. En cambio, en Europa (Le Corbusier y Mies antes de su migración a Estados Unidos) sí se le dio un contenido formal a ese entramado estructural, convirtiéndose no ya sólo en la respuesta a un problema específico, sino una solución a un problema general de la arquitectura. En el momento en el que la fachada pierde su función estructural de soporte, la retícula substituyó al sistema murario. Esto obligó a una reflexión arquitectónica donde se valoraran los diferentes procesos de relación con la retícula. Por otro lado, la aparición del hormigón como material estructural condicionó a la arquitectura a asumir también la identidad de un nuevo material. Así pues, entramados metálicos y de hormigón no sólo cumplen su función estructural sino que se expresan de manera directa en los edificios. [Fig. 1.5.6]

En este contexto, Wright, a pesar de su proximidad con la Escuela de Chicago, optó por no otorgar contenido al entramado como hizo el Estilo Internacional en Europa. Su arquitectura derivó en una peculiar interpretación de la relación entre estructura y espacio fusionándose de manera orgánica en lugar de disociarse. No obstante, y puede parecer contradictorio, hay otros aspectos de la obra de Wright donde la retícula ha tenido especial importancia. Es el caso en el cual Wright, a nivel de estructura, escapaba del esquema reticulado e intentaba acercarse al organicismo de los volúmenes dinámicos, pero, sin embargo, en un nivel superior como es el del planeamiento del territorio, las intenciones de Wright se apoyaron de manera clara sobre una base reticulada. En las ocasiones donde le hubiese sido posible acercarse a un esbozo más orgánico de este nivel, como puede ser River Side, prefiere no perder el orden de la malla. Paradójicamente, el planteamiento estructural de la Escuela de Chicago está mucho más próximo a la disposición urbana del Loop y las formas orgánicas a la disposición de River Side.<sup>39</sup> [Figs. 1.5.7-8]

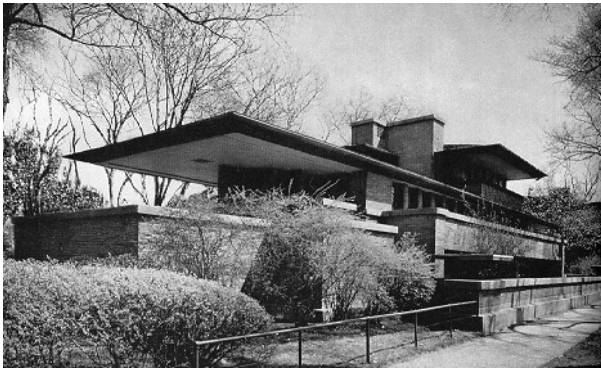
Como se verá más adelante, para Wright no era lo mismo una retícula estructural tipo, situando los soportes en los límites del edificio, que una pauta constructiva rigurosa, que le permitiese sistematizar las soluciones en un mayor nivel de detalle. Este puede ser el caso de los sistemas “block” y “usonian automatics” que le ayudaron a organizar la construcción a partir de un patrón predefinido. Así pues, tanto en proporción urbana como a nivel constructivo, Wright era partidario de basar su arquitectura en un tejido casi invisible. Sin embargo, en la escala de la estructura, su arquitectura pretende traspasar los límites de la retícula estructural, contribuyendo así a una mayor integración de los espacios interiores con el exterior.

---

<sup>39</sup> LEVINE, Neil. *“La creación de una comunidad a partir de la cuadrícula. El plano de manzana de cuatro casas y el origen de la casa de la pradera de Wright”*. Fragmento del libro Frank Lloyd Wright editado con motivo de la exposición del 50 aniversario del Guggenheim y de su muerte, New York 2009, págs. 59 a 73.



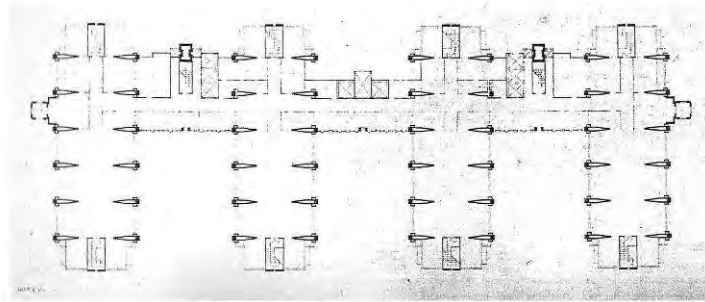
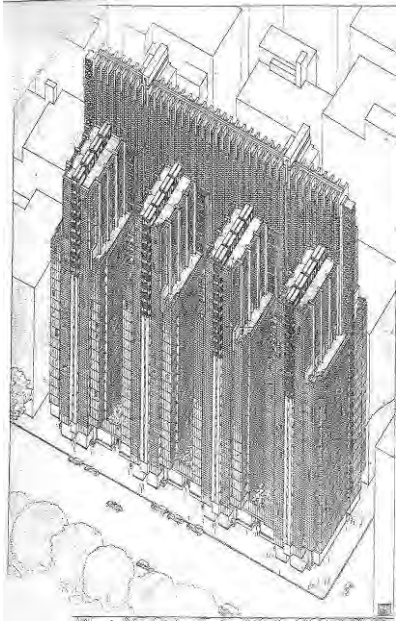
**Fig. 1.5.1** Esquema del entramado de acero, propio de las construcciones de Chicago de finales del siglo XIX. Este sistema, pese a revestirse en la mayor parte de ocasiones con muros de mampostería cerámica o de piedra, permitía liberar a los cerramientos de su función portante.



**Fig. 1.5.2** Casa Robie, Frank Lloyd Wright. Oak Park 1909. En cuanto Wright incorporó la liberación de la fachada portante, lanzó las cubiertas en voladizo, configurando su arquitectura mediante planos deslizantes entre ellos y no a partir de una retícula.



**Fig. 1.5.3** Atrio interior del edificio Larkin. Frank Lloyd Wright, Buffalo 1903. En la huida hacia el voladizo, en edificios de mayor tamaño Wright siguió utilizando el entramado de acero durante un cierto tiempo. No obstante, en este caso, lo hizo permitiendo la entrada de luz a través de un gran atrio central



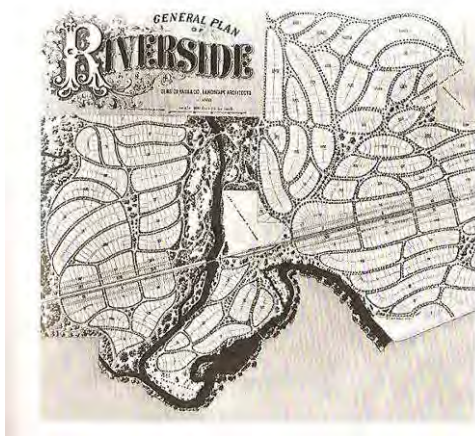
**Fig. 1.5.4-5** National Life Insurance. Frank Lloyd Wright 1924. La llegada a la meta: primer edificio de oficinas de envergadura, en forma de torre, donde Wright consiguió un planteamiento estructural diferente al de la Escuela de Chicago, mediante forjados en voladizo que liberan las esquinas del edificio. El tipo de pilares propuestos se repite en muchos proyectos posteriores, como en el campus de la Universidad de Florida de 1934.



**Fig. 1.5.6** Detalle de los Lake Shore Drive. Mies van der Rohe, Chicago 1951. Mies, heredero directo de la Escuela de Chicago, incorporó los valores formales del entramado de acero en sus edificios.



**Fig. 1.5.7** Loop de Chicago. Wright no perdió la referencia a la trama de la ciudad en sus planteamientos urbanísticos, a pesar de parecer una retícula rígida. Como se verá, la aparente imagen orgánica de algunos edificios de Wright, se soporta sobre una firma base de referencia, que le permite organizar y sistematizar los elementos constructivos, como en el caso de algunas casas de la época usoniana.



**Fig. 1.5.8** La planta de Riverside, a pesar de sus formas sinuosas, no sedujo a Wright para sus propuestas de organización territorial.



## 1.6 Trabajos en colaboración entre arquitectos e ingenieros

A finales del siglo XVIII se produjo una escisión dentro de arquitectura, separándose ésta en dos grandes ramas, la arquitectura y la ingeniería civil. Este hecho se debió a que, hasta ese momento, las normas constructivas tanto para edificios como para infraestructuras (puentes, acueductos, etc...) eran las mismas y los elementos utilizados de la misma manera: muros, arcos, bóvedas, etc... Con la aparición de los modernos materiales, aparecieron también nuevos requerimientos técnicos que sugerían una especialización, dando lugar a la ingeniería.

A partir de entonces, los caminos de la arquitectura y las estructuras han discurrido en paralelo, en muchos casos entrelazándose y, debido a su origen común, muchas veces sus límites han sido difusos, no existiendo una línea divisoria clara entre la estructura y la arquitectura y por ende, entre las profesiones de arquitecto e ingeniero.

Durante la evolución de la arquitectura en el siglo XX, del mismo modo que en muchos casos la estructura ha ido separándose del resto de la arquitectura hasta quedar relegada al único papel de soporte, el trabajo realizado por los diferentes profesionales que intervienen en un proyecto arquitectónico también ha ido disociándose. Ha sido y es habitual que un arquitecto desarrolle todo un proyecto sin haber pensado en la solución estructural, contando en que, a posteriori, un ingeniero ubicará de la manera menos molesta posible los soportes y será capaz de resolver el resto de elementos (vigas, forjados, etc...) con la mínima dimensión que garantice su correcto funcionamiento. El resultado de este planteamiento nunca ha sido un buen proyecto de arquitectura ya que, al separar tan drásticamente el trabajo correspondiente a la arquitectura y a la estructura, inevitablemente se ha forzado también su correcta integración como un todo, eliminando las otras funciones arquitectónicas de la estructura.

En cambio, esta separación “forzada” que llega a alejar el trabajo entre arquitectos e ingenieros, es en otros casos inexistente. Como se ha dicho antes, los grandes arquitectos sí que han sabido mantener la unidad entre arquitectura y estructura y, habitualmente esto ha sido posible gracias al trabajo conjunto con un ingeniero o consultor de estructuras, no como resolutor de un molesto problema (la gravedad) sino como colaborador y portador de soluciones arquitectónicas. Hay numerosos ejemplos donde los arquitectos desarrollan un trabajo técnicamente sofisticado e ingenieros asumen un papel donde realizan aportaciones de tipo arquitectónico que resultan fundamentales en el resultado final, invirtiéndose así unos papeles predeterminados a priori. De esta manera vuelve a fundirse, a través de las propias personas que realizan el trabajo, arquitectura y estructura en un solo concepto, desdibujando los límites de cada una de ellas.

En un libro de Ivan Margolius<sup>40</sup> se hace un repaso a un gran número de este tipo de relaciones, desde finales del siglo XIX hasta la actualidad. Desde Joseph Paxton y Charles Fox (arquitecto e ingeniero) en el Crystal Palace de Londres en 1850 y 1851 hasta Arata Isozaki y Mamoru Kawaguchi en el Centro de Convenciones de

---

<sup>40</sup> MARGOLIUS, IVAN, *Architects + Engineers = Structures*, Wiley-Academy, U.K. 2002.



Nara entre 1992 y 1999 se puede hacer un listado muy extenso de colaboraciones en este sentido. En España, también pueden encontrarse ejemplos parecidos como el de Carlos Arniches y Martín Domínguez con Eduardo Torroja en el Hipódromo de la Zarzuela, Madrid 1935. [Fig 1.6.1] Incluso, ya no sólo en el ámbito específico de la arquitectura, José Antonio Fernández Ordóñez puso a disposición de Eduardo Chillida las bases técnicas de varias de sus obras, siempre con una especial sensibilidad de Fernández Ordóñez por los aspectos espaciales que rodean a la obra de Chillida. Es un ejemplo muy significativo en este sentido el proyecto de Tindaya en Fuerteventura, donde uno aporta su visión particular del espacio y el otro sus conocimientos sobre la materia. En esta línea podríamos remontarnos hasta complejos planteamientos aristotélicos sobre la relación entre la materia y la forma, pero se escapan del ámbito de este trabajo. [Fig 1.6.2]

Mies van der Rohe colaboraba habitualmente con el ingeniero de estructuras Frank J. Kornacker, que participó en los proyectos del Convention Hall de Chicago (Chicago 1953-54) o los apartamentos Lake Shore Drive (Chicago 1949-51) entre otros [Fig 1.6.3]. En este último caso, Kornacker recogió sus aportaciones en un artículo en 1955<sup>41</sup> donde, aparte de desarrollar con riguroso detalle las posibilidades tipológicas de la estructura en este tipo de edificios desde un punto de vista constructivo y económico, introdujo el texto remarcando la importancia y responsabilidad del ingeniero a la hora de decidir aspectos de orden superior, como la trama estructural. Kornacker sugirió que en las pautas a la hora de elegir cuál es la mejor modulación para la trama estructural debían tenerse principalmente en cuenta criterios difíciles de estandarizar, tales como la disposición de los espacios interiores y su distribución y no sólo los aspectos habitualmente cuantificados por los ingenieros (resistencia, economía, etc...). Hay que tener en cuenta que en Chicago en ese momento no existía una limitación de altura para los edificios y por lo tanto el límite se definía en base a una cuestión económica evaluando el equilibrio entre coste estructural y rendimiento de los espacios. Por este motivo, también la volumetría general de los edificios quedaba totalmente condicionada a las decisiones sobre las tipologías de estructura a utilizar. Es de suponer que las aportaciones que Kornacker realizó para Mies en otro tipo de edificios fuesen significativas, como pudo haber sido por ejemplo en los grandes espacios.

Un caso más conocido, donde esta relación fructificó con buenos ejemplos de estructuras integradas, es el de Louis Kahn y August Komendant<sup>42</sup>. El texto que lo documenta fue escrito por Komendant un año después de la muerte de Kahn, en 1975, como una reivindicación de su parte de autoría de la obra de Kahn. En el fondo del texto queda patente no sólo las aportaciones concretas realizadas por Komendant para cada uno de los proyectos en los que colaboraron, sino que la principal función de éste fue como contrapeso de Kahn. En términos junguianos

---

<sup>41</sup> KORNACKER, Frank J. “*Structural design. The frame and floor structure. Design principle*”. Parte III del libro *Floor-Ceilings and service systems in multi-story buildings*. National Academy of Sciences – National Research Council, Washington D.C. 1955, págs. 79 a 113.

<sup>42</sup> KOMENDANT, August E. *18 años con el arquitecto Louis I. Kahn*. Edición a cargo de Fernando Agrasar. Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia. 2000

puede decirse que ambos se proyectaban mutuamente las ideas, desarrollando sus aptitudes a través del reflejo que obtenían de sí mismos el uno sobre el otro. Visto de otra manera, realizaban una función de equilibrio a modo de Ying y Yang o de Sancho y Quijote, como insinuó Le Corbusier. En el museo de Arte Kimbell, última obra donde colaboraron, es difícil determinar dónde comienza y acaba la estructura y la arquitectura del edificio. Para llegar a diferenciar el trabajo de cada uno es necesario llegar al nivel de detalle en sus edificios. El sentido intuitivo de Kahn sobre la estructura y la elegancia en la resolución de las formas de Komendant hace que la línea divisoria entre ambas sea completamente difusa. De hecho, durante los últimos años, Komendant fue profesor invitado en varias Escuelas de Arquitectura, impartiendo conferencias sobre temas relacionados con los aspectos formales de la estructura [Fig 1.6.4].

Lo que le seducía a Kahn de Komendant como ingeniero no eran solo sus capacidades de cálculo o sus conocimientos técnicos, sino sobre todo su sentido común, intuición y fresca inventiva; en definitiva su extraordinaria sensibilidad por todos los aspectos arquitectónicos y constructivos. Esto en algunas ocasiones le convirtió en un incómodo crítico, pero necesario para el propio Kahn. Komendant escribió sobre la obra de Kahn en muchos casos desde una óptica arquitectónica y no desde un punto de vista técnico.

Todo esto, desde otro punto de vista, lo refleja Kenneth Frampton en un estudio sobre la tradición tectónica de la Arquitectura Moderna<sup>43</sup>, señalando el papel crucial de los ingenieros el siglo XX e incluyendo aquí las aportaciones que hizo Komendant a Kahn.

Su relación se sustentó durante los 18 años en el respeto y entendimiento de Komendant hacia la creatividad de Kahn, en su habilidad como ingeniero y en su intuición innata hacia las formas arquitectónicas.

*Ambos eran conscientes de que Komendant estaba más próximo a la tradición estructural de la elite europea que al estigma y pragmatismo de la profesión, que suele contentarse con la cómoda, pero decadente visión del trabajo, según la cual el ingeniero se responsabiliza únicamente de la estabilidad de la obra, mientras que el arquitecto tiene bastante con recubrir su edificio cualquier estructura oculta que haga falta para sostenerlo.<sup>44</sup>*

El caso de Jean Prouvé es ciertamente singular en el siglo XX. Aunque comenzó su formación como ingeniero, nunca pudo acabar sus estudios debido a la I Guerra Mundial. No obstante dedicó toda su vida a inventar objetos y sistemas constructivos íntimamente relacionados con la industrialización de la construcción. Desde esta posición colaboró a partir de la segunda mitad del siglo con arquitectos europeos, proponiendo y diseñando estructuras basadas en la optimización de su dimensionado y fabricación, cuestiones que dieron un carácter específico a los edificios donde trabajó. [Fig 1.6.6]

---

<sup>43</sup> FRAMPTON, Kenneth, *“Studies in Tectonic Culture: The poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture”* 1995

<sup>44</sup> KOMENDANT, August E. *18 años con el arquitecto Louis I. Kahn*. Edición a cargo de Fernando Agrasar. Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia, 2000, Pág. 18

Jean Prouvé mantuvo una amistad con Le Corbusier desde jóvenes. Aunque sólo colaboró con él, junto a Pierre Jeanneret, en el proyecto de un prototipo de escuela de emergencia para refugiados, en 1940, muchas de sus ideas se reflejan en varios elementos estructurales de la obra de Le Corbusier. Prouvé siempre persiguió la búsqueda de un cierto paralelismo entre el comportamiento estructural, en concreto con la distribución de tensiones, y la forma de los diferentes elementos estructurales. Desde el diseño de mobiliario hasta el de estructuras de mayor tamaño, ésta es una constante de su obra. Por otro lado, la preocupación por los procesos de producción en serie y la industrialización de los sistemas constructivos, le llevó a explorar también diferentes campos del diseño y la construcción. Esto de alguna manera coincide con la plasticidad de muchas formas propuestas por Le Corbusier y su preocupación también por los valores sociales de la arquitectura, en este caso de los sistemas constructivos [Fig 1.6.5].

Un poco más avanzado el siglo XX, Kenzo Tange y Oscar Niemeyer también contaron de manera continuada con las contribuciones de ingenieros de estructuras. Yoshikatsu Tsuboi fue un ingeniero que trabajó junto a Tange en gran parte de sus trabajos de mayor envergadura, tales como la Catedral de Tokio o los Gimnasios Olímpicos de Yoyogi, donde es difícil delimitar o atribuir el origen de las soluciones estructurales, que otorgan gran parte de la calidad espacial de esta obra. Hay que señalar que en el momento de su construcción existían en el mundo pocos edificios con estructuras formadas por catenarias dispuestas de esa manera [Fig 1.6.7]. Frank Lloyd Wright, como veremos en la segunda parte, unos pocos años antes, al final de su vida, realizó una propuesta en este sentido, el pabellón de Belmont. Joaquim Cardozo fue el colaborador habitual de Niemeyer y le permitió explorar las posibilidades plásticas del hormigón, su material predilecto. Su trabajo cobró importancia cuando empezaron a surgir los cascarones y las láminas finas de hormigón armado. Niemeyer, como discípulo de Le Corbusier, pensaba que arquitectura y estructura debían ser concebidas de manera simultánea.

En cuanto a Frank Lloyd Wright, hay que tener en cuenta que su formación fue en ingeniería y no en arquitectura y durante su larga vida colaboró con todo tipo de disciplinas, involucrándose en la resolución de los problemas de ingeniería ya desde el principio de su carrera. Wright entró a trabajar en la oficina del ingeniero Allan Conover, desde donde pudo acceder a la Universidad de Wisconsin y de allí al estudio de Adler y Sullivan. (Sullivan era arquitecto y Adler ingeniero). Está claro que Wright se identificaba más con Sullivan, pero durante este periodo se familiarizó también en la resolución de los problemas típicos de ingeniería como estructura, electricidad o climatización. Una vez independizado, durante el periodo de la Pradera, las soluciones ingenieriles de Wright se basaban más en una intuición que no en exhaustivos cálculos tensionales de los materiales. A partir del primer edificio de mayor escala, el Larkin de 1903, Wright requirió la colaboración de ingenieros, por lo que expresó su deseo de trabajar con un ingeniero de reconocido prestigio en Chicago, Paul Mueller, habitual de Adler y Sullivan y especialista en estructuras de acero. La compañía Larkin le remitió a su ingeniero habitual, no obstante Mueller supervisó la construcción. De hecho Paul Mueller controló la ejecución de los tres primeros edificios mayores de Wright (Unity Temple, 1906; Midway Gardens, 1912 y el Hotel Imperial de Tokio, 1916-22), aunque no hay evidencias de que Wright colaborara también con otros ingenieros.

Hasta entonces Wright había confiado en su aproximación intuitiva a las estructuras, con resultados decididamente variados, pero a partir de la construcción de estos edificios de mayor envergadura parece que asumió la necesidad de colaborar con ingenieros de estructuras para resolver en detalle este aspecto concreto de la arquitectura.

Con la cada vez más habitual utilización del hormigón armado, la complejidad y eficiencia de este material (precisa cálculos de espesores, tensiones y armaduras que requieren una especialización por encima de las posibilidades del propio Wright) requirió la colaboración a partir de 1935 de Mendel Glickman y William Wesley Peters, que entraron a formar parte del equipo habitual de Taliesin. Finalmente, a partir de 1946 en los inicios del proyecto de la Modern Gallery, Jaroslav Joseph Polivka aportó sus conocimientos y teorías sobre placas y láminas de hormigón armado y vidrio en siete proyectos diferentes, hasta la muerte de Wright. Como en muchos otros casos, Polivka intentó reivindicar en los últimos años, antes de la muerte de Wright, el reconocimiento sobre sus aportaciones realizadas. Bien fuera por la fuerte personalidad de Wright o por la inercia de la sociedad a converger la arquitectura en una sola persona. Polivka, como muchos otros, no tuvo un reconocimiento proporcionado a sus aportaciones y, huelga decirlo, con este trabajo se desea otorgarle un mérito justo por su trabajo desarrollado junto a Wright.

Los grandes maestros del siglo XX han desarrollado su obra siempre considerando estos aspectos formales de la estructura contando a menudo con colaboradores específicos para resolverla. Estos son los casos donde la colaboración fructífera entre arquitectos e ingenieros (o consultores estructurales) ha dado como resultado numerosos y buenos ejemplos de esta sintonía entre arquitectura y estructura. En concreto, el trabajo de J. J. Polivka durante la última época de Frank Lloyd Wright reveló una interesante preocupación por los aspectos formales, siempre apoyado en sus amplios conocimientos técnicos de los diferentes materiales y técnicas estructurales. Además, en este caso, el propio Wright mostró una fuerte intuición hacia el comportamiento estructural, interés que compartió desde sus inicios con la de la arquitectura. Por tanto, los límites entre la práctica profesional de la arquitectura y la estructura a menudo se difuminan en sus propios autores, llegando incluso a invertirse los papeles en alguna ocasión, por lo que en el proyecto obtenido de este proceso es difícil diferenciar hasta dónde llega la estructura y comienza la arquitectura.

Además de los ingenieros de estructuras citados, puede completarse la lista con otros como Kenneth Snelson, Freud N. Severud, Fritz Leonhard, Riccardo Morandi, Lev Zetlin y muchos otros, que trabajaron en multitud de ocasiones en colaboración con diferentes arquitectos.



**Fig. 1.6.1** Hipódromo de la Zarzuela. Colaboración de Eduardo Torroja en la configuración de la estructura de la gradería y la cubierta con el arquitecto Carlos Arniches, en 1935. En este caso la figura de Torroja ha predominado sobre la del arquitecto, al tener la estructura una presencia formal considerable.



**Fig. 1.6.2** Proyecto de Tindaya. La contribución de José Antonio Fernández Ordoñez en relación al conocimiento de la materia, base fundamental de la obra de Chillida



**Fig. 1.6.3** Construcción de los edificios de apartamentos Lake Shore Drive en Chicago, Mies van der Rohe 1951, donde Kornacker aportó las pautas para definir una trama que permitiese combinar la posibilidad de construcción en altura con una retícula apropiada para la distribución de los apartamentos.



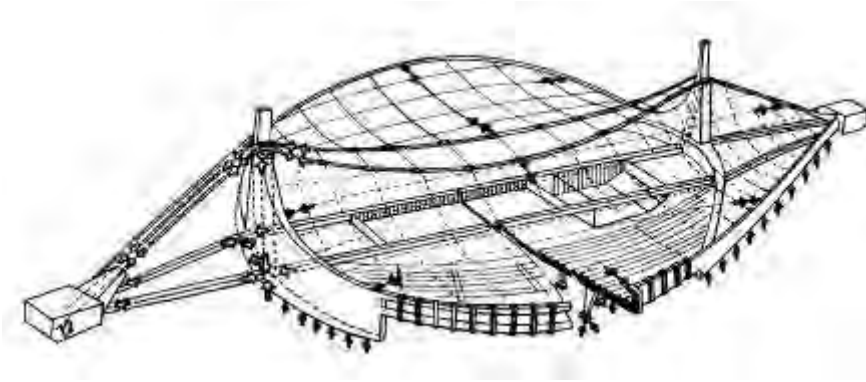
**Fig. 1.6.4** Construcción del Museo Kimbell. Komendant ayudó a Kahn a proyectar el edificio en base a sus conocimientos sobre el comportamiento laminar y el pretensado, pero fundamentalmente a través de su particular sensibilidad del espacio.



**Fig. 1.6.5** Jean Prouvé, Shed Roof 1950. Las colaboraciones de Jean Prouvé con varios arquitectos de primera línea fueron múltiples (Robert Mallet-Stevens, Marcel Lods y Eugène Beaudouin entre otros) de manera directa o indirecta, otorgando a esos edificios un aspecto característico a través de su estructura.



**Fig. 1.6.6** En la Unité d'Habitation de Le Corbusier, la forma de los pilares y tablero de la planta baja que recogen el resto de la estructura, recuerdan en cierto modo a los planteamientos estructurales de Jean Prouvé sobre la canalización y lectura de los esfuerzos, aunque en este caso no colaborasen directamente.



**Fig. 1.6.7** Esquema estructural del edificio principal de los Gimnasios Olímpicos Yoyogi en Tokio, 1964 de Kenzo Tange y del ingeniero Yoshikatsu Tsuboi.



**Fig. 1.6.8** Congreso Nacional de Brasil en construcción, Brasilia 1958. Oscar Niemeyer contó durante muchos años con el ingeniero Joaquim Cardozo.



**Fig. 1.6.9** Detalle del proceso de construcción, en concreto del armado de una de las cúpulas de hormigón de Brasilia.

## 1.7 Arquitectura e ingeniería Orgánica<sup>45</sup>

*Engineering the Organic, an investigation into the Collaboration of Jaroslav Joseph Polivka and Frank Lloyd Wright*<sup>46</sup> es el título de un trabajo de investigación referente a la colaboración entre el ingeniero de estructuras y el arquitecto, redactado por Barry A. Muskat.

El Dr. J.J. Polivka fue un conocido ingeniero checoslovaco. Nació en Praga en 1886 y se licenció en la Escuela de Tecnología de la misma ciudad en 1911 donde también se doctoró en 1917. [Fig. 1.7.1]

Después de la Primera Guerra Mundial, se estableció en Praga donde empezó a experimentar el poder expresivo de la arquitectura, encontrando soluciones sencillas a los nuevos retos arquitectónicos que surgían en la Europa entre Guerras. También llegó a ser una referencia a nivel mundial en lo que respecta a análisis de estructuras mediante foto-elasticidad<sup>47</sup> y a la utilización del hormigón armado como nuevo material. En esta etapa ganó un reconocimiento internacional por su diseño del Pabellón Checo en la Exposición de Paris de 1937 en colaboración con el arquitecto también checo Jaromír Krejcar, y años más tarde por los trabajos realizados en colaboración con otros arquitectos del ámbito europeo<sup>48</sup>. En 1939 Polivka emigró a los Estados Unidos y comenzó a desarrollar su labor de investigador en la Universidad de Berkeley [Figs. 1.7.2-3].

No fue hasta 1946 cuando Polivka empezó a colaborar con Frank Lloyd Wright y a partir de entonces los dos trabajaron juntos hasta la muerte de Wright en 1959. La relación comenzó a propósito de un artículo escrito en 1946 por Wright en *Architectural Forum*, sobre la estructura de la Casa de la Cascada, donde exponía las dificultosas relaciones que tuvo con los ingenieros durante el diseño de la estructura. Polivka respondió al artículo con una carta dirigida directamente a Wright en Taliesin, exponiéndole la gran admiración que sentía por su obra y, en definitiva, proponiéndole una alternativa a los planteamientos excesivamente técnicos de los que Wright se quejaba en su artículo: *...el ingeniero medio sólo sabe de losas, vigas, vigas metálicas, columnas, etc. y cualquier desviación de esas*

---

<sup>45</sup> La arquitectura orgánica Polivka la entendía como ingeniería orgánica. Esta situación llegó a invertir los roles de arquitecto e ingeniero, jugando en ocasiones Polivka el papel de arquitecto y Wright el de ingeniero.

<sup>46</sup> MUSKAT Barry A. University of New York at Buffalo, 2000. Licenciado en Arte por la Universidad de Pennsylvania y Master en Historia del Arte por la Universidad del Estado de New York en Buffalo. El trabajo se centra en los aspectos compositivos de la obra conjunta y no tanto en las cuestiones arquitectónicas de la estructura.

<sup>47</sup> La fotoelasticidad es una técnica de análisis que, a través de la observación de maquetas a escala realizadas con material transparente bajo luz polarizada, permite obtener de manera cualitativa la distribución tensional del conjunto. El análisis fotoelástico es un método para el estudio del comportamiento laminar previo al de los elementos finitos. En el apartado correspondiente al Guggenheim Museum se desarrolla este concepto con mayor amplitud

<sup>48</sup> Con Kamil Roškot en el diseño de un pabellón checo, la New York World's Fair en 1939 o con el arquitecto checo de vanguardia Josef Havlíček en el edificio Habich de Praga en 1927.



*herramientas diarias se considera algo inusual, loco o peligroso... ...durante muchos años he estado luchando contra este prejuicio. Su trabajo confirma y fortalece mis ideas y por ello le estoy muy agradecido.*<sup>49</sup>

Como respuesta a esa carta, Wright contestó con este otro escrito de manera escueta, pero precisa, como siempre lo haría en el futuro: *¿Por qué no se acerca por aquí a vernos?*<sup>50</sup>

Esta fructífera relación también la ha reseñado el arquitecto Ivan Margolius en su libro, *Architects + Engineers = Structures*, destacando la primera interacción entre Polivka y Wright.

Polivka trabajó con Frank Lloyd Wright en varios proyectos, haciendo análisis tensionales e investigando con diferentes materiales, fundamentalmente hormigón armado y pretensado con formas laminares. También estudiando el vidrio Thermolux y sus aplicaciones para fachadas. La colaboración fue únicamente en siete proyectos, de los que sólo dos se llegaron a construir: la Torre de investigación Johnson Wax, 1946-1951 y el Guggenheim Museum, 1946-1959) [Figs. 1.7.4-5].

Esta relación profesional que marcó su carrera, Polivka la reflejó en un texto titulado *“What is like to work with Wright”*<sup>51</sup> (“Cómo es trabajar con Wright”), donde resume su relación a través de fragmentos de la correspondencia mantenida entre ambos durante los años de mutua colaboración.

Al margen de los aspectos científicos en los que destacó Polivka, como el análisis de láminas mediante fotoelasticidad, su dominio del hormigón o los conocimientos sobre vidrio y otros materiales, Polivka sobre todo destacó respecto de muchos ingenieros contemporáneos suyos en cuanto que su visión de la ingeniería o arquitectura no se limitaba exclusivamente a la resolución de ciertos problemas técnicos, sino que su principal preocupación era la obtención de un resultado donde técnica y estética quedasen perfectamente integradas. Dentro de los textos que Polivka escribió, destaca en este sentido *“Aesthetics Bridges”* (“La estética de los puentes”), un artículo publicado en 1956 donde, con motivo de la construcción del puente Richmond-San Rafael en la Bahía de San Francisco, argumentaba la necesidad de considerar con igual o mayor importancia que los aspectos técnicos y económicos, los aspectos estéticos, con tal de evitar el “desastre” formal obtenido por haberse adjudicado este puente únicamente bajo criterios económicos y técnicos. En ese sentido Polivka apeló a la responsabilidad que las Autoridades tienen a la hora de asignar los proyectos. Como en otras ocasiones, que se irán viendo más adelante, Polivka aprovechó la ocasión para contraponer las soluciones estructurales habituales del momento con sus propuestas desarrolladas junto a Wright, en este caso proponiendo su puente de hormigón *Butterfly Wings Bridge*. [Figs. 1.7.6-7]

---

<sup>49</sup> Polivka Papers, Folder 1.02\_01. Carta de Polivka a Wright. 15 de febrero de 1946.

<sup>50</sup> Polivka Papers, Folder 1.02\_05. 13 de abril de 1946.

<sup>51</sup> Polivka Papers, Folder 1.07. *“What is like to work with Wright”*

Otro texto en la misma línea es el artículo titulado *“Technocracy and the Engineer”* [“Tecnocracia y el Ingeniero”] que se publicó también en 1956. En esta ocasión, a propósito de la obra de Polivka, se expone una idea que hoy en día sigue vigente: los avances científicos y de la ciencia condicionan de manera positiva la arquitectura contemporánea. Los nuevos materiales y técnicas, por su propia naturaleza, deben guiar a los ingenieros a resolver los problemas de diseño de las estructuras, implicando entonces de manera radical a la estructura como una parte fundamental del diseño del edificio. Efectivamente, los conocimientos de Polivka sobre el comportamiento laminar del hormigón, por ejemplo, le llevaron junto a Wright a desarrollar proyectos íntegramente deudores del dominio de esas técnicas.

*Durante el proceso de construcción es cuando se hace visible la belleza de la ingeniería. En la simple honestidad del acero y hormigón, con su propia anatomía, se ponen de manifiesto los nuevos espacios definidos por delgadas membranas soportadas en marcos de metal. Esta es entonces la consecuencia del poder de la moderna ingeniería, un medio importante que muchos definen como arte o arquitectura.<sup>52</sup>*

Es en la aplicación de estos valores de la estructura donde radica la verdadera organicidad de la arquitectura, en la honestidad de diseño frente al comportamiento de los materiales estructurales. Esta preocupación no es sólo propia de las ideas de Polivka, pues Eduardo Torroja, con quien mantenía un frecuente contacto profesional, participaba de esos mismos principios. Su conocido libro *“Razón y ser de los tipos estructurales”* fue publicado en su versión inglesa en los Estados Unidos, *“The Philosophy of Structural Design”*, gracias a la influencia de Polivka que llegó incluso a propiciar el encuentro entre Torroja y Wright en 1950.

Polivka murió en 1960 en Berkeley, un año más tarde que Wright.

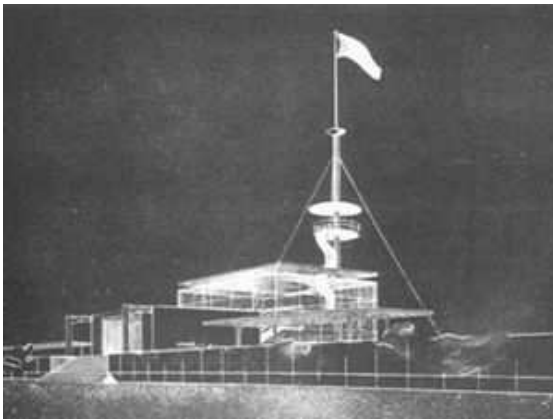
---

<sup>52</sup> Polivka Papers, Folder 2.5. *“Technocracy and the Engineer”*

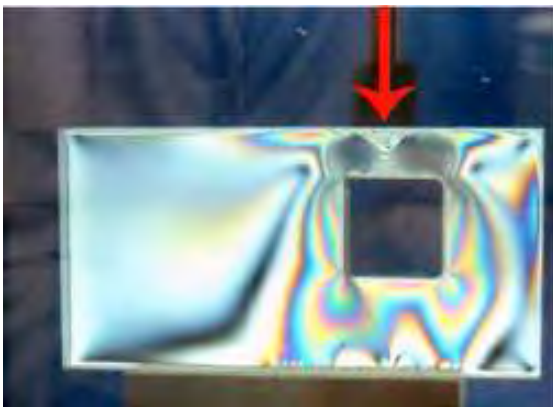


**Fig. 1.7.1** Dr. Jaroslav Joseph Polivka. Nació en Praga, donde estudió ingeniería estructural y arquitectura. En la misma ciudad comenzó a desarrollar su actividad profesional, destacando en el análisis de láminas de hormigón armado y pretensado. Pronto se convirtió en una referencia del análisis fotoelástico y al emigrar a los Estados Unidos en 1939, esto le permitió establecer su primer contacto con Frank Lloyd Wright, con el que trabajó hasta la muerte de éste.

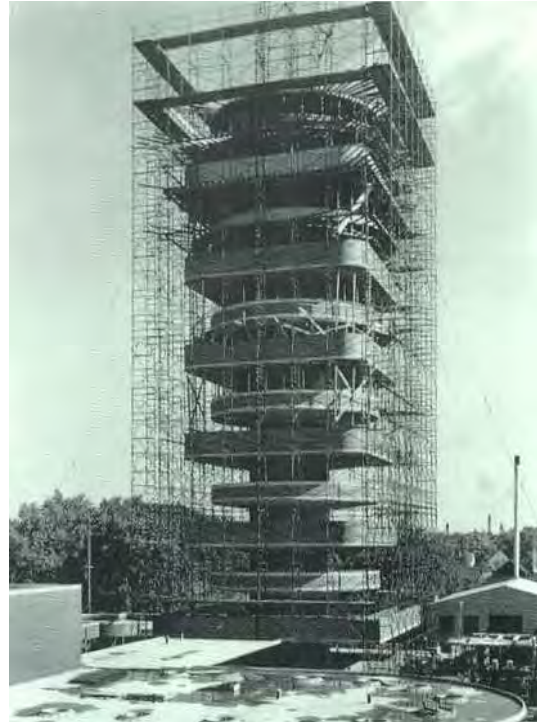
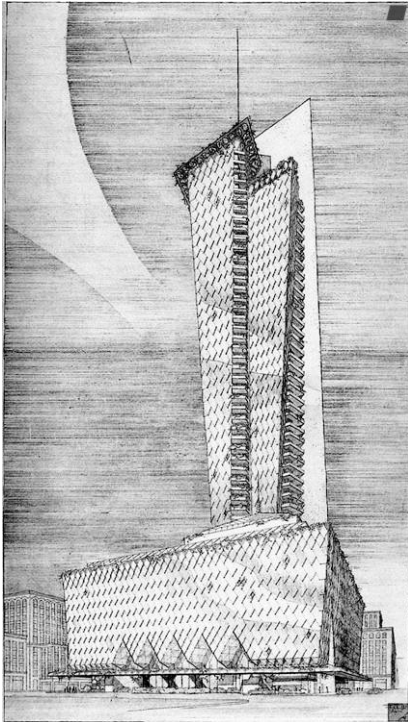
Polivka fue un defensor de las diferentes manifestaciones del fenómeno resistente y tradujo al inglés la versión Americana del libro de E. Torroja “Razón y ser de los tipos estructurales” (“Philosophy of structures”)



**Fig. 1.7.2** Pabellón checo para la Exposición de París de 1937, en colaboración con el arquitecto también checo Jaromír Krejcar. Sus conocimientos en el ámbito de las estructuras le permitieron trabajar junto a la vanguardia europea de su época.



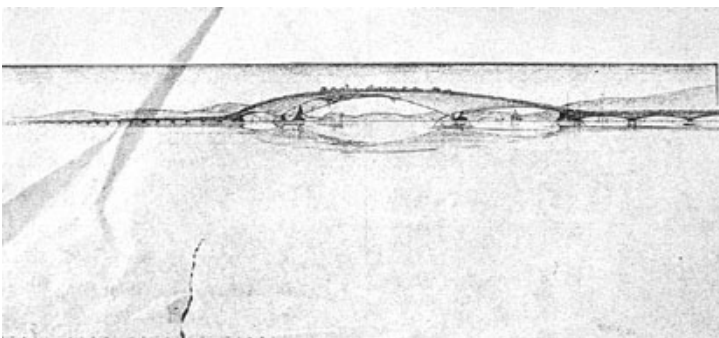
**Fig. 1.7.3** Ensayo mediante fotoelasticidad como los realizados por Polivka para analizar el efecto laminar de una carga puntual en los alrededores del hueco



**Fig. 1.7.4-5** Fachada Rogers Lacy Hotel, en donde Polivka propuso la utilización del vidrio “Thermolux” en sus fachadas. La estructura de la torre es de similar planteamiento a la St. Mark’s Tower. *En la construcción* de la torre de investigaciones de la Johnson Wax, donde se ejecutó por primera vez el sistema de cimentación, “inventado” por Wright, de raíz pivotante.

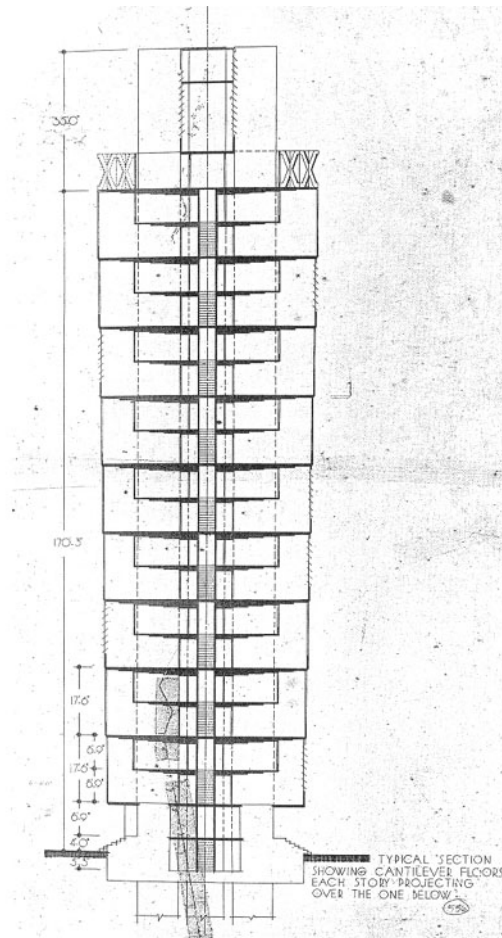


**Fig. 1.7.6** Puente Richmond San Rafael, calificado en la época de su construcción como uno de los mayores desastres estéticos, en aras de la optimización de su coste. Polivka ofreció a las autoridades, para este caso, la propuesta del Butterfly Wings Bridge.



**Fig. 1.7.7** Puente de hormigón Butterfly Wings, propuesta de Wrigh y Polivka para el mismo cruce sur de la Bahía de San Francisco en alternativa a los “antiestéticos” puentes de entramado metálico.





*...el muchacho quiere una gran cimentación con piedras pesadas bajo todo eso, con ocho grandes tirantes de hierro apernados sujetos a la base...<sup>1</sup>*

## Parte II

### Tipologías estructurales de la obra de Frank Lloyd Wright

---

<sup>53</sup> WRIGHT, F.L. *Autobiografía 1867-1944*. Traducción de José Avedaño. Ed. El croquis. Barcelona 1998, *pág.169*. Referencia a la cimentación del molino Romeo y Julieta, en Hillside Home School.

Imagen de la Sección del proyecto St. Mark's Tower.

## 2.1 Wright y la estructura

El proceso de gestación y desarrollo del Guggenheim Museum fue largo y dificultoso, no sólo por la relación entre Wright y Harry Guggenheim, después de la muerte de Solomon y la dimisión de Hilla Rebay, sino también debido a los problemas técnicos, económicos e incluso de aceptación social de un sistema constructivo poco usual. En este sentido, Wright y sus colaboradores tuvieron que sortear muchos inconvenientes hasta conseguir llevar a cabo la construcción de este singular edificio y durante todo el proceso la perseverancia de Wright resultó ser uno de los factores fundamentales para poder superar todas estas cuestiones hasta llegar a su construcción final. Harry Guggenheim llegó a decir que el edificio en realidad no era un templo al arte, tal como Hilla Rebay le había transmitido a Wright, sino un monumento al propio arquitecto. La funcionalidad del museo también se puso en entredicho, ya que la forma novedosa del espacio de exposición, en rampa y sobre paramentos inclinados, desató críticas entre algunos sectores del ámbito artístico. El planteamiento constructivo y estructural tampoco fue aceptado de buen grado por la “Building Comisión of New York”, encargada de otorgar las licencias de construcción de los edificios de esta ciudad que, al modo de las actuales oficinas de control, velaba por la seguridad de las nuevas construcciones validando las soluciones estructurales. Como también sucede hoy en día, esta comisión de supervisión era reacia a la utilización de sistemas estructurales novedosos, no contrastados, por lo que el camino recorrido hasta llegar a la construcción final fue también complicado en este aspecto.

Wright se sentía en cierto modo incomprendido y, en respuesta a las múltiples críticas vertidas sobre el edificio, argumentó que para poder llegar a entender el razonamiento del origen museo, era necesario revisar el global de su propia obra. Wright estaba completamente seguro de la apuesta que estaba haciendo respecto de la concepción como museo<sup>54</sup>. Era consciente de que se trataba del edificio colofón de su arquitectura, ya que incorporaba todos los principios arquitectónicos que han estado presentes a lo largo de toda su obra: La interpretación de las formas geométricas primarias (sistema de bloques de madera de Fröbel), la utilización del voladizo, el edificio de un solo material (el hormigón), el espacio organizado alrededor de un patio, la iluminación natural cenital, la proyección circular llevada a tres dimensiones (la vasija), la condensación de imágenes históricas arraigadas en la sociedad (Torre de Babel) transformadas en algo nuevo (Zigurat optimista) y el ornamento integral.

La explicación a todas las dudas que se le plantearon a Wright, las resumió en una alusión al estudio de su propia obra, que durante casi setenta años había desarrollado de una manera coherente. En este sentido, según Castro, para la

---

<sup>54</sup> “*Asumo en mi nombre que no hay una ‘estructura rectilínea de referencia’ para la exhibición de una pintura... No corresponde a su capacidad (la de los críticos) comprender que todos ustedes, director del museo incluido, saben muy poco del Arte madre: la Arquitectura. El tiempo demostrará la sabiduría de Mr. Guggenheim con su legado, y el hecho que la idea de hacer algo importante en una democracia libre como la nuestra, puede estar conforme con la naturaleza...*” Cita extraída del trabajo de José Ramón Castro. Pág. 234.



comprensión más enriquecedora de esta obra colofón, el Guggenheim Museum 1943-1959, es necesario recurrir a esta fuente de información. Con este análisis se deja constancia de que el desafío lanzado por Wright no sólo se ha ido cumpliendo, sino que es el único camino para llegar a su entendimiento completo: “*Pasarán 100 años y ellos aun la examinarán y representarán*”<sup>55</sup>

La relación existente entre los aspectos generales de la obra de Wright y el Guggenheim Museum se manifiesta con cierto paralelismo entre las cuestiones estructurales del global de la obra y del museo. De hecho, gran parte de los principios de la arquitectura de Wright antes citados contienen implícitamente elementos estructurales, tanto a nivel tipológico como en la utilización de los materiales: el voladizo, la analogía con comportamientos estructurales presentes en la naturaleza, la utilización del hormigón o la integración de la ornamentación con la estructura, merecen un análisis detallado desde este punto de vista. Wright fue el inventor del voladizo como tipo estructural con una clara función arquitectónica, cuestión no analizada hasta el momento en términos resistentes. De hecho, del conjunto de arquitectos más influyentes del siglo XX, en raras ocasiones se ha analizado su obra en referencia a los valores aportados por la estructura, tal como se ha expuesto en la primera parte del trabajo. Hay numerosos trabajos acerca del urbanismo de Le Corbusier, la base filosófica de Kahn o los aspectos sociales de Wright, pero en ninguna ocasión sobre la función de la estructura en sus arquitecturas, más allá de una aproximación meramente plástica.

Un caso excepcional es el de Mies van de Rohe, cuya obra fue analizada minuciosamente bajo la óptica estructural en un trabajo desarrollado por uno de sus antiguos colaboradores, Peter Carter, poco tiempo después de su muerte. “*Mies van der Rohe at work*”<sup>56</sup> es un exhaustivo repaso de la obra de Mies que estudia la obra del Maestro organizándola, en la primera parte del texto, principalmente desde un punto de vista de tipología estructural. Llama la atención que, en uno de los libros más importantes sobre la obra de este arquitecto, uno de los puntos de vista utilizado sea la propia estructura, cuestión que pone de manifiesto cuán importante es su función arquitectónica. En concreto se dedica casi el primer tercio del libro a clasificar las obras según “conceptos estructurales y espaciales”. También se hacen referencias a la arquitectura de acero y vidrio del siglo XIX y a la arquitectura industrial europea de principios del siglo XX, que en ambos casos influyeron en Mies en cuanto a la concepción estructural de sus edificios. La clasificación se resume en tres grandes grupos: edificios de gran altura, edificios de baja altura y edificios de planta libre, a partir de la cual se agrupa toda su obra. Igualmente se hace una referencia a la utilización de los materiales estructurales, principalmente el armazón de acero. Dentro de esta clasificación se resumen las obras mediante fichas en las que se especifican todo tipo de detalles estructurales tales como módulo estructural, dimensión de las crujías, espesor y tipo de forjados así como las dimensiones generales del edificio. Tal como lo hubiese hecho Mies, de una manera escueta, pero precisa, al final se obtiene una visión general de su obra bajo la óptica de la estructura de sus edificios, poniendo de manifiesto no sólo la

---

<sup>55</sup> Referencia extraída del trabajo de José Ramón Castro, pág. 238

<sup>56</sup> CARTER, Peter. “*Mies van der Rohe at work*” Ed. Phaidon 2006

relación de unos datos concretos, sino también, en una segunda derivada, la función formal de la estructura dentro de su obra.

A pesar de que la arquitectura de Mies no tiene demasiada relación con la de Wright, el modo de realizar este estudio puede sugerirse igualmente apropiado para el último caso. En relación a Wright las fuentes de inspiración son bien diferentes y el interés por ciertos modelos estructurales difiere claramente de los utilizados por Mies, más próximos a la retícula de la Escuela de Chicago. No obstante puede realizarse una agrupación de las obras de Wright atendiendo a los aspectos estructurales, tanto en referencia a los detalles técnicos como a su especial integración con la arquitectura. En este sentido, así como en el caso de Mies la clasificación es muy clara, en cuanto a Wright la fusión completa de los aspectos formales de la estructura con el resto de la arquitectura dificulta en cierta manera deshilvanar y extraer los conceptos con claridad. En muchas situaciones un mismo edificio o estructura podría pertenecer a varios grupos al mismo tiempo. Este es el caso del voladizo, que de alguna manera está presente en el resto de las tipologías que se exponen más adelante.

Wright comenzó su andadura profesional junto a Joseph Lyman Silsbee inicialmente y con Adler y Sullivan después. Como otro tipo de influencias, el desarrollo de la tecnología de la construcción forma parte también del legado social y cultural. La obra de Wright se ubica en un momento de cambios muy dinámicos en el desarrollo tecnológico. El sistema “*balloon frame*”, heredado de la tradición americana a través de Silsbee se refleja en cierta manera en las casas de la pradera (variando la escala del sistema) o en los “tejidos” formados por el sistema “*block*”. Adler y Sullivan incorporaron por primera vez en sus edificios algunos elementos novedosos, como el aire acondicionado, que Wright utilizó posteriormente por primera vez en el edificio Larkin. Los sistemas de cimentación profunda mediante pilotes flotantes, empleados en Chicago durante su colaboración con Sullivan, fueron aplicados a su vez en el Hotel Imperial de Tokio y pudieron haber inspirado también el sistema de cimentación mediante raíz pivotante, propuesto unas décadas después. El descubrimiento del hormigón supuso una reinterpretación de sus principios estructurales, cuya utilización fue debida, en principio, al bajo coste de este material, su facilidad para configurar todo tipo de formas y sus mejores propiedades frente al fuego en relación a la estructura metálica utilizada en Chicago a finales del siglo XIX y principios del XX. En la revista *Ladies' Home Journal*, Wright publicó en 1907 una casa a prueba de incendios por 5.000\$, gracias al aprovechamiento de la integración de cerramientos, estructura y ornamento en un solo material económico. Desde el proyecto del Monolithic Bank de 1901, donde propone la utilización del hormigón por primera vez hasta las rampas del Guggenheim pasando por el bloque textil, el uso de este material estructural ha caracterizado gran parte de sus edificios, otorgando a su obra la consistencia inherente en el monolitismo del material. El primer edificio construido con hormigón fue la Iglesia Unitaria en 1904, donde Wright tomó conciencia de sus cualidades tectónicas. De hecho, a partir de la construcción de este edificio, comenzó a desarrollar un sistema que permitiese la industrialización de este material para reducir su coste, el sistema block, consistente en un método de piezas prefabricadas de hormigón ensambladas entre ellas de manera que incorporasen todos los aspectos generales del edificio (estructura, cerramiento y ornamento). A

grandes rasgos, la preocupación de Wright en los edificios residenciales era la optimización de un sistema constructivo económico, a base de un “tejido”, bien de madera, bien de hormigón” que configurase todos los componentes del edificio; este es el denominador común entre la casa Jacobs o las casas de California. En cambio, en los edificios de uso público de mayor tamaño, su preocupación se centró en aprovechar la propiedad moldeable del hormigón para generar formas con analogías al comportamiento estructural de la naturaleza; este es el punto donde convergen proyectos como las oficinas de la Johnson, la St. Mark’s Tower o el Guggenheim Museum.

En el texto publicado por Vincent Scully un año después de la muerte de Wright se insinúa en varias ocasiones la influencia de la estructura y los materiales estructurales en la obra de Wright. El rechazo por el uso disparatado de las formas clásicas desencadenó su veneración por el paisaje y la utilización de los diferentes materiales como elementos básicos de su arquitectura. “...su amor por los materiales y por su expresión en estructuras idealmente adaptadas a su naturaleza específica.”<sup>57</sup>, cuestión que le resultó tremendamente dificultosa. El interés por los materiales estructurales como forma de expresión arquitectónica seguramente le llevó a compartir con Jaroslav J. Polivka el trabajo del Guggenheim Museum. La concepción del conjunto estructural del edificio dentro de un todo es una consecuencia directa de la construcción de éste con tales materiales que permitan una visión integral del espacio, de los huecos y llenos.

*“Creía firmemente que cuando un edificio realizado por los hombres para servir a un propósito específicamente humano, no sólo evidenciaba tal propósito con sus formas visibles, sino que llegaba a ser, asimismo, una estructura integrada, adquiriría entonces el carácter de un organismo existente de acuerdo con sus propias leyes completas y equilibradas. Esto es lo que Wright entendía por orgánico”<sup>58</sup>*

Con las primeras casas de la pradera, Wright ya había resuelto el problema de la continuidad espacial en edificios con estructura de madera. Anteriormente había utilizado elementos de acero para resolver la estructura, como los anclajes metálicos y las cinchas que unen los dos cuerpos en el molino con estructura de madera, construido para su familia en Spring Green de 1896. Para resolver los voladizos de las casas también utilizó grandes vigas de acero que a priori eran ajenas al sistema “*balloon frame*”. Las fachadas perdieron su función estructural, convirtiéndose en un mero biombo que definía el espacio interior junto a la cubierta extendiéndose por encima de las mismas.

Este aspecto que parece claro en edificios como la casa de la Cascada o el interior de las oficinas de la Johnson, pero, sin embargo, estuvo presente desde el inicio. En la escuela para sus tías en Spring Green de 1902, los muros de fachada se transforman en seis pilastras de madera, dando lugar a una franja de separación

---

<sup>57</sup> SCULLY, Vincent. “*Frank Lloyd Wright*”. Editorial Bruguera, Barcelona 1961, págs. 9-10

<sup>58</sup> A lo largo del texto se hacen varias definiciones del término “orgánico”, algunas más inmediatas, como la de esta referencia, pero en otros casos más sutiles, referentes a cuestiones particulares de su arquitectura. Todas estas definiciones, aunque traten aspectos diferentes, no son contradictorias sino complementarias.

entre el vuelo de la cubierta y el muro por donde devenía la continuidad entre el interior y el exterior. Este mismo esquema se repitió en la casa Martin de 1904, el Templo Unitario de 1904 o la casa Robie de 1906. No obstante, en el caso de edificios de mayor escala, a Wright le resultó más complicado conseguir este efecto, sobre todo en edificios en altura, y no es hasta el proyecto del National Life Insurance Company Office en 1924, donde encontró la solución que más tarde repitió en todos los edificios en altura y con la que conseguía el mismo efecto de continuidad espacial. En este momento a Wright no le preocupaban demasiado los materiales y sí el efecto que producía la disposición espacial de la estructura. Como se ha mencionado, en las casas de la pradera utilizó potentes vigas de acero que permitieron generar los grandes voladizos, y en el edificio Larkin de 1903 el sistema estructural fue el entramado de acero, aunque con una caracterización propia, adelantando la alineación de los pilares del patio central respecto al forjado de cada planta, reforzando así su carácter de verticalidad.

El Hotel Imperial de Tokio reunió todos los aspectos hasta aquí citados (voladizos, cerramientos-mampara, hormigón, etc...) y para Wright resultó ser uno de sus edificios predilectos desde un punto de vista técnico, ya que sobrevivió al terremoto de 1922 confirmando todos sus augurios. En ese momento la creencia de Wright sobre la unidad de las cosas, estructura con el resto del edificio, otorgaba una serenidad al edificio muy diferente a la visión maquinista de la arquitectura de Le Corbusier. Para Wright la integración entre los aspectos formales de sistemas constructivos y estructurales suponía la identidad propia de la arquitectura americana, en contraposición a la arquitectura desarrollada en Europa, donde la opción tomada era justamente la contraria, la disociación de elementos. En este sentido Wright encontró en el sistema "block" una herramienta fundamental que le permitió resolver con un mismo elemento todas las variantes posibles del sistema constructivo y estructural, incluso su integración en el paisaje.

Para Scully, la Casa de la Cascada, en 1935, pone de manifiesto esta completa integración de la función de la estructura con sus valores formales:

*"Falling Water muestra que Wright había hallado finalmente el modo de utilizar la pirámide maya y sus fuertes líneas de sombra horizontales, en términos creadores que eran estructural y espacialmente integrales, no meras derivaciones pintorescas."*<sup>59</sup>

La estructura de esta casa se resolvió mediante fuertes voladizos empotrados en los potentes contrafuertes de la base, donde la casa se apoya directamente en la roca. Unas grandes vigas solucionan los voladizos mediante una sección de "T" invertida donde, a pesar de las creencias populares, las barandillas de hormigón no colaboran apenas en la rigidización del sistema. Los problemas estructurales que han afectado a este edificio no devienen de un mal planteamiento estructural sino de un defecto en el dimensionado de la armadura de las vigas. De hecho, si no hubiese sido por la claridad de su funcionamiento estructural, posiblemente no se hubiese mantenido en pie hasta su refuerzo y reparación.

---

<sup>59</sup> SCULLY, Vincent. *Frank Lloyd Wright*. Editorial Bruguera, Barcelona 1961, pág. 25

Aproximadamente en esa época, en 1936, las formas curvas empezaron a aparecer en su arquitectura. “*El primero y probablemente el mejor de los edificios de esta serie fue el de las oficinas de la Johnson Wax Company, de Racine, Wisconsin, realizado entre 1936 y 1939*”<sup>60</sup>. Las columnas dendriformes, estabilizadas unas con otras, forman una sala hipóstila limitada por fachadas sin función estructural. Este aspecto está remarcado por la franja de vidrio (tubo pirex) que separa las fachadas de la cubierta.

El proyecto de la tienda Morris de 1948-1949 es, a pequeña escala, un resumen de todas las influencias tempranas de su obra: Estructura en espiral dentro de una caja de ladrillo, arco de entrada de influencias Richardsonianas y monolitismo de cerámica que recuerda a McKim, Mead and White o las casas Charnley o Winslow del propio Wright. En el caso del Guggenheim, las referencias a su propia obra son a mayor escala, culminando con *la conquista del tiempo mismo por medio de la espiral continua, más allá del tiempo y del infinito, que torna cíclicamente y parece no acabar nunca*<sup>61</sup> y con la construcción del mueso, donde muchos detalles de la estructura parecen a priori toscos, como reflejando la premura de un próximo fin. Por este motivo, el hormigón es lo más apropiado que se ajusta a la forma y presenta un aspecto vigoroso.

*“De este modo, al final de su larga, difícil y valerosa vida, Wright utilizaba todas las imágenes que le habían acompañado a lo largo de su existencia, y cuantas nuevas podía encontrar, con el fin de dar forma satisfactoria al sentimiento de cambio y al deseo de permanencia, tan arraigados en el espíritu americano.”*<sup>62</sup>

El edificio del Guggenheim es una conclusión de todos los principios y planteamientos de su arquitectura, pasando por la utilización de la estructura con un fin mucho más amplio que el resistente. Los doce pilares de la rampa, aunque en posición antagónica, algo tienen algo que ver con la intención de los pilares del atrio del edificio Larkin, 50 años después.

La admiración de Jaroslav J. Polivka por la obra de Wright se remontaba ya a los años previos a su migración a los Estados Unidos. Polivka era un especialista en hormigón armado y del estudio de la naturaleza de su comportamiento resistente y posiblemente ese fue, junto a su extensa cultura arquitectónica, el nexo de unión que le permitió el contacto profesional con diversas personalidades de la ingeniería y la arquitectura tales como, Robert Maillart, Augustin Mesnager, E. Freyssinet, F. Emperger, E. Torroja, D.B. Steinman, Raymond E. Davis, August Perret, Adolf Loos, Le Corbusier, Antonin Raymond, Richard Neutra o Eric Mendelsohn<sup>63</sup>.

La colaboración entre Polivka y Wright se produjo en un momento de madurez profesional de ambos, a partir de 1946, con motivo del encargo de la Modern Gallery. Los planteamientos de Wright nunca encajaron con la mentalidad del ingeniero medio y en este singular proyecto aun menos podía resolverse con este

---

<sup>60</sup> SCULLY, Vincent. “*Frank Lloyd Wright*”. Editorial Bruguera, Barcelona 1961, pág. 28

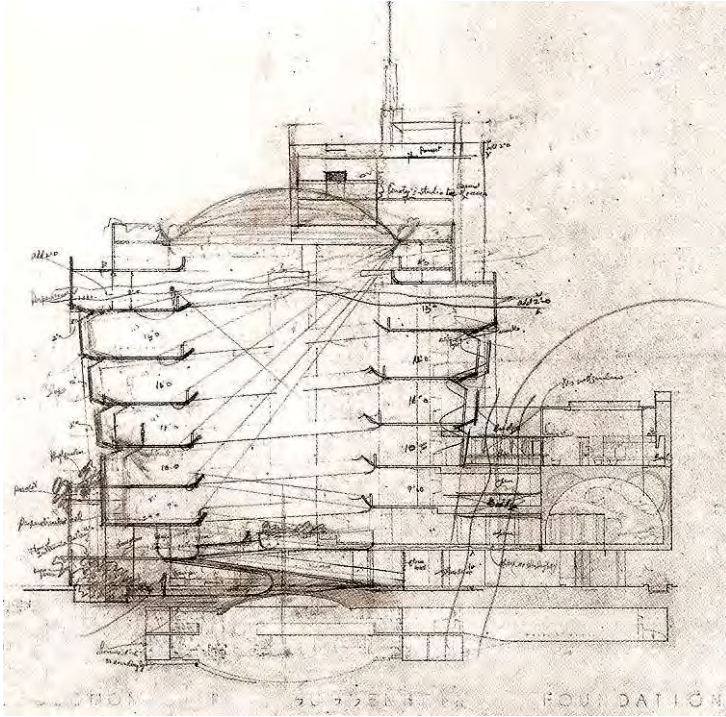
<sup>61</sup> SCULLY, Vincent. “*Frank Lloyd Wright*”. Editorial Bruguera, Barcelona 1961, pág. 30

<sup>62</sup> SCULLY, Vincent. “*Frank Lloyd Wright*”. Editorial Bruguera, Barcelona 1961, pág. 31

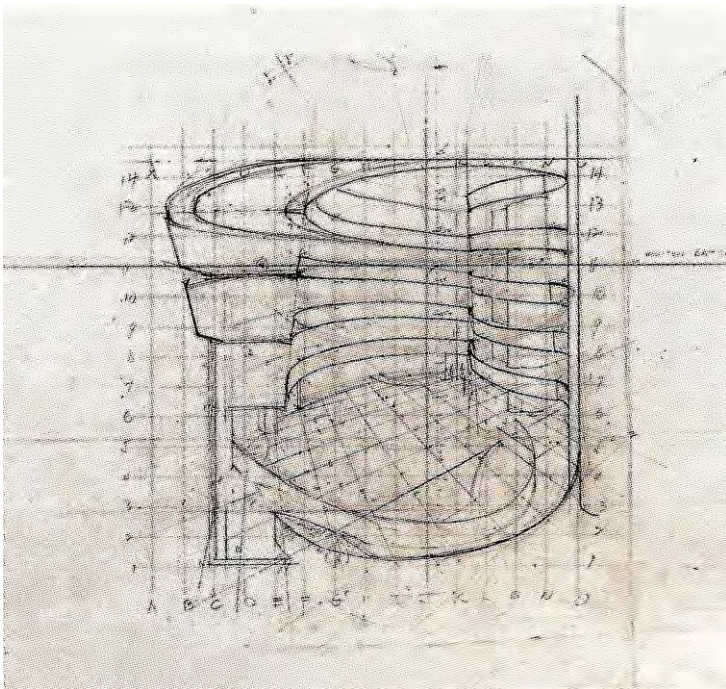
<sup>63</sup> Polivka Papers, Folder 1.07 “*What it’s like to work with Wright?*”

tipo de ayuda. Por eso, a raíz del primer contacto de Polivka con Wright (Polivka llevaba ya desde 1936 en Berkeley, investigando sobre fotoelasticidad y puentes de hormigón), a éste le pareció apropiado iniciar una relación profesional que fructificó en siete proyectos diferentes. El desarrollo de la Modern Gallery, más tarde Guggenheim Museum, se dilató hasta 1959 y durante este período Polivka trabajó paralelamente en otros seis proyectos de los cuales únicamente se llegó a construir la torre de investigaciones de la Johnson Wax en Racine, en 1950, aparte del Guggenheim Museum. De estos proyectos, expuestos con detalle más adelante, en todos los casos el planteamiento estructural se guió por el principio básico del entendimiento del comportamiento de la naturaleza del material, integrándose con el resto del proyecto arquitectónico. La formación de Polivka en Europa y los dos años de Wright en el IIT de Chicago, antes de empezar a trabajar como aprendiz con Silsbee, posibilitó que se produjese un buen entendimiento entre ambos, teniendo Polivka plena conciencia de la función arquitectónica de la estructura, así como Wright de los fenómenos resistentes de la misma.

De esta manera, a lo largo de la segunda parte del trabajo, se aborda la revisión de la obra de Wright, ya muchas veces analizada, pero no desde este punto de vista novedoso, ordenando tipológicamente las obras más significativas desde una óptica *estructural*. *El criterio de selección de las obras no ha sido tanto la popularidad de las mismas, sino la claridad tipológica dentro de la clasificación.* De la revisión se intuye a priori un denominador común que parece confluir en el edificio del Guggenheim Museum, confirmando la insinuación del propio Wright sobre la búsqueda de razones a lo largo de su extensa obra. Al igual que Peter Carter hizo con la obra de Mies, se pretende desgranar los aspectos más significativos en este sentido; no tanto haciendo un análisis cuantitativo sino cualitativo, tanto sobre su papel en el proyecto como sobre sus mecanismos de comportamiento estructural y la relación con el espacio que definen.



**Fig. 2.1.1** Sección principal de la Modern Gallery hacia 1943-1944.



**Fig. 2.1.2** Dibujo de la malla que permite identificar las intersecciones de las diferentes circunferencias de la espiral. Propuesta hacia 1956.

## 2.2 Tipologías estructurales empleadas

Como se ha mencionado, en la clasificación tipológica de las estructuras de la obra de Wright no se pretende realizar una división como la que podríamos hacer únicamente desde un punto de vista técnico (según la estricta utilización de los materiales o productos industrializados), sino más bien una agrupación siguiendo criterios de relación con el espacio, así como con los mecanismos resistentes del funcionamiento estructural. En este sentido, es difícil que la clasificación se haga en varios grandes grupos de manera cerrada ya que, como se ha comentado, muchas de las obras incorporan más de uno de los criterios de selección, como puede ser el tema del voladizo. Por este motivo, dentro de los grupos definidos se han incluido las obras que mejor representan a cada tipología, a pesar de que podrían estar incluidas también en otros grupos. Paralelamente, se establece una clasificación según el criterio del material estructural utilizado, ya sea hormigón, acero o construcción tradicional<sup>64</sup>, y, aunque mayoritariamente las obras pertenecen a la categoría de hormigón, las obras desarrolladas con otros materiales son suficientemente significativas como para separarlas de este grupo.

Al margen de esta clasificación, merece la pena comentar un grupo de obras iniciales, no tanto por la claridad de sus esquemas sino porque establecen las bases de modelos más evidentes en obras posteriores. Son obras anteriores a 1903, como el edificio Hillside Home School de 1902, el molino Romeo and Juliet de 1896, junto al mismo emplazamiento, o la Ward Willitts House de 1902. Estas primeras construcciones conectan y se derivan hacia dos aspectos fundamentales: la pérdida de la función portante de los muros y la proyección del voladizo. En el primer aspecto, tal como reflexionó Scully en su libro sobre Wright, el muro de fachada se diluyó formando pilastras que soportaban la cubierta. De esta manera, la entrega con la cubierta se realizó a través de grandes ventanales que permitían realizar una transición entre el espacio interior y el paisaje exterior [Fig. 2.2.2]. Si, como ocurre en la casa Ward Willitts, las pilastras de las esquinas desaparecían liberando el ángulo, el efecto diagonal, dominado ya por Wright en las distribuciones interiores, se ampliaba hacia el exterior. La materialización de esta idea surgió a partir del sistema constructivo tradicional americano de las casas victorianas de madera, que acompañaron la infancia de Wright, donde el muro de madera se componía de “sticks” o listones interiores que soportaban la madera o mampara del cerramiento [Fig. 2.2.1]. A través de un cambio de escala de los elementos, en estos ejemplos se encuentra una operación similar, donde el muro de fachada se convierte en una mera pantalla que limita el espacio interior, bien sea de madera o de mampostería, como en el caso de Hillside Home School, pero sin función estructural.

El complemento a este efecto de transición hacia el exterior es la cubierta. En las casas del período de la pradera la cubierta se manifestaba mediante grandes voladizos de hasta 4,30m como en la casa Robie de 1906. En los ejemplos predecesores, los voladizos eran mucho menores, pero expresaban de igual modo la intención de fluir el espacio hacia el exterior.

---

<sup>64</sup> Bien mampostería o entramado de madera.



Ambos elementos, cubierta y fachada no portante, provocaban el efecto de ingravidez de la cubierta y mostraban así la continuidad del espacio integrado con la estructura. A este espacio Wright lo llamó “La Arquitectura de la Democracia” el mismo término al que se refiere Polivka en el texto *“What it’s like to work with Wright”* a propósito del puente *Butterfly Wings*: *“Presiento que el nuevo puente puede necesitar su genial creatividad para llegar a ser la apoteosis democrática entre arquitectura e ingeniería...”* o lo que el propio Wright escribió en su autobiografía a propósito del Guggenheim: *“La democracia demanda este tipo de edificios, lo que ya no puedes obtener en una iglesia deberás conseguirlo aquí...”*<sup>65</sup>

En el Unity Temple de 1904, que se analizará más adelante con detalle, el concepto inicial fue el mismo. De hecho, la similitud con Hillside School o Ward Willitts en el planteamiento de las fachadas resulta evidente. La diferencia radica en la utilización del material, en este caso el hormigón, que Wright propuso por una cuestión fundamentalmente económica y, como consecuencia, descubrió (intencionadamente o por casualidad) las posibilidades de un nuevo material [Fig. 2.2.3-5].

Hay que destacar dentro de estas obras precedentes el edificio Larkin de 1903. Era uno de los primeros edificios no residenciales de dimensiones considerables que abordaba, por lo que los avances técnicos desarrollados por Wright para la arquitectura doméstica hasta el momento se escapaban de este nuevo ámbito. Para la estructura del Larkin, Wright utilizó un entramado de acero revestido de fábrica cerámica, al más puro estilo de la Escuela de Chicago y recogiendo así la herencia constructiva legada por Sullivan. Un sistema de pórticos de acero (pilares y vigas) sustentaba unos forjados también metálicos. Los soportes de acero quedaban ocultos por la mampostería cerámica y las vigas y forjados de acero se protegían del fuego con un proyectado de yeso y un falso techo. No obstante, pese a emplear el mismo sistema que utilizaba la arquitectura de la que él intentaba escapar, el efecto formal conseguido fue bien diferente. Las franjas verticales en sombra que marcaban las pilastras en las fachadas longitudinales y sobre todo los núcleos de escaleras en las fachadas transversales remarcaban el carácter tectónico de la arquitectura de Wright al que se refiere Kenneth Frampton en su artículo sobre la tradición tectónica de la arquitectura moderna<sup>66</sup>. Este efecto tenía su reflejo en el atrio interior del edificio, retrasando los forjados respecto a la cara de los pilares de manera que se reforzaba la verticalidad y el carácter catedralicio del espacio. Como anécdota, Wright instaló un órgano al fondo de este espacio central, para amenizar los tiempos de los descansos y enfatizar el aspecto sobrenatural del atrio, aparte de por sus propias dimensiones [Fig. 2.2.8].

En relación a la clasificación de la obra de Wright, se han definido cuatro grupos principales que son:

---

<sup>65</sup> Polivka Papers, Folder 1.7 *“What is like to work With Wright”*

<sup>66</sup> FRAMPTON, Kennet. *“Studies in Tectonic Culture: The poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture”*.

- El voladizo como elemento estructural, que al margen de ser un grupo en sí mismo, queda incluido en casi todos los ejemplos del resto de grupos. Ya se verá en el desarrollo particular del capítulo que el voladizo es una constante en su obra desde el inicio hasta los últimos proyectos. Desde los tímidos voladizos de las cubiertas anteriores a 1903 hasta edificios que en lugar de tener voladizos, son ellos mismos un voladizo.
- La utilización de patrones de repetición o sistemas de columnas dendriformes. La estructura se genera a partir de la agrupación de un módulo tipo, generalmente estable al agruparse y no de forma independientemente. El mejor y más conocido ejemplo de este tipo es el edificio administrativo de la Johnson Wax.
- La evolución de la torre como tipología estructural. Los esquemas de Wright nada tienen que ver con los patrones clásicos de este tipo, próximos a los de Chicago, sino que están de acuerdo con los principios de su arquitectura.
- Disposiciones en espiral, símbolo y materialización del espacio dinámico, bien sea hacia el exterior o hacia el interior. Dentro de este tipo, la rampa en espiral puede tener funciones estructurales bien diferentes, ser soportada inicialmente o servir como soporte en el caso de Guggenheim Museum.

Semejantemente, desde el punto de vista de los materiales utilizados para la estructura, las obras pueden asociarse en dos clases:

- La utilización del hormigón armado como la búsqueda de la identidad nacional, bien como hormigón “in situ” y su capacidad de amoldarse a formas orgánicas de comportamiento estructural análogas a la naturaleza, bien por sus posibilidades de prefabricación para configurar sistemas constructivos, como un “tejido” propiamente americano, signo de identidad desde la escala urbanística hasta la modulación de la edificación.
- El uso del acero para la configuración de retículas o pórticos. La capacidad a tracción del material, virtud que Wright requería a los materiales estructurales. La ligereza de este tipo de estructuras en virtud de la entrada de luz a través de ellas.

En correspondencia al material de la estructura, los antecedentes de estos dos grupos se encuentran en la tradición americana del “balloon *frame*” y la pérdida de la función estructural de las fachadas de mampostería<sup>67</sup>. En este sentido, dentro del sistema de entramados de listones de madera pueden diferenciarse dos formas básicas: El “*platform frame*” (en el que las plantas son independientes del cerramiento) con forjados continuos que interrumpen el alzado de los pilares, y el “*balloon frame*” (donde los forjados de las plantas quedan trabados con la estructura y la envolvente exterior) con pilares continuos no interrumpidos por los forjados<sup>68</sup>.

---

<sup>67</sup> FRAMPTON, Kenneth, *The Textile Tectonic, 1915-1924. Modernization and mediation: Frank Lloyd Wright and the impact of technology.* Artículo que forma parte del catálogo de la exposición de Wright en el MOMA en 1994.

<sup>68</sup> BRUFAU, Robert, *Rehabilitar con acero.* Apta. Madrid. 2010. Capítulo 2.3 Evolución histórica del uso de la madera, pág. 58.

En el primer caso, los elementos de fachada son discontinuos entre los forjados, de manera que la estructura de soporte del edificio requiere de un sistema independiente, en la línea del Movimiento Moderno de separar formalmente las diferentes funciones constructivas o estructurales. En el segundo caso, el sistema constructivo de las fachadas resulta ser a la vez soporte estructural y cerramiento, integrándose así en un mismo elemento varias funciones constructivas y formales. El razonamiento realizado por Wright está en la línea de hacer converger la función formal y de soporte en un mismo elemento. Pero, a diferencia del “*balloon frame*” cuya aplicación literal hubiese estado ligada a la arquitectura popular americana, Wright realizó un cambio de escala de los listones, llegando así a una nueva aportación formal de la estructura más allá de los sistemas habituales del momento. Es interesante mencionar en este sentido que en los primeros proyectos se produjo paralelamente una pérdida de función estructural de los tramos de mampostería, por lo que éstas devinieron como mamparas. Esto implicó la introducción de elementos de acero (vigas en doble “T”) para resolver los grandes voladizos de las casas de la pradera. En definitiva este proceso fue un preámbulo de la filosofía de tejido de las casas Usonianas, análoga a la del sistema “block”, pero en madera.

Al margen de esta clasificación hay dos grupos de obras que se considera oportuno mencionar. En un primer grupo están las obras precursoras donde se sentaron las bases de los rasgos fundamentales del trabajo futuro. A pequeña escala, en algunos casos, son claros ejemplos de hacia dónde discurrió la arquitectura de Wright y, en otras ocasiones, son ensayos o declaraciones de intención. La perfecta concordancia entre la elección del material estructural y la función formal de la estructura que se produjo en obras posteriores, en algunas situaciones en este grupo de proyectos, hizo que prevaleciese la función arquitectónica sobre la armonía entre el material y la tipología. Edificios como el Larkin o muchas casas de la Pradera, utilizaron elementos de acero al uso de la Escuela de Chicago, sin mostrar las cualidades expresivas propias del material, pero apuntando hacia una clara intencionalidad arquitectónica de la estructura.

El proyecto para el Monolithic Concrete Bank de 1894, aunque no se llegó a construir, fue el primer edificio propuesto íntegramente en hormigón. La razón principal de esta propuesta era básicamente económica. El hormigón, como se expondrá más adelante, resultaba ser un material muy económico y, si cualquier ornamento quedaba integrado en el mismo material así como la función estructural y de cerramiento, el coste global del edificio resultaba considerablemente inferior al de los sistemas constructivos tradicionales. Wright, como cualquier persona dotada de un gran optimismo, aprovechó esta situación a priori desfavorable para iniciar su camino hacia una nueva arquitectura: la integración de los materiales, la estructura y el espacio. Más tarde, este intento, por la misma razón económica, lo materializó en la Iglesia Unitaria de 1904 de donde extrajo conclusiones importantes para el futuro, como la posibilidad de prefabricar piezas de hormigón que mejorasen la calidad del edificio [Fig. 2.2.6].

La construcción de la torre para el molino, el Romeo and Juliet Windmill Tower en Hillside Home School en 1896, resultó ser un buen ejemplo donde se demostraba la intuición estructural de Wright. La sección de la torre de madera estaba formada

por un octógono y un rombo, maclados y unidos monolíticamente mediante un zunchado de acero, del mismo modo que los toneles de madera, precursores del sistema de postensado del hormigón. De esta manera, se conseguía una rigidez del conjunto suficiente como para soportar el empuje del viento. Por otro lado, en relación a la estabilidad al vuelco del conjunto, Wright dispuso de un lastre rocoso en la base, anclado a la torre mediante barras de acero traccionadas. La función estructural de estas dos situaciones, en este caso sólo se insinuó tímidamente a través de las franjas horizontales que formaban el fuste de la torre, pero significaron también un punto de partida importante para casos futuros [Fig. 2.2.7].

Wright rechazaba las propuestas formales de la Escuela de Chicago y su subordinación al entramado de acero de la estructura como pauta generadora de los espacios. Sin embargo, en esta primera época, al margen de pequeñas incursiones con el hormigón, los sistemas constructivos habituales para pequeñas edificaciones eran la mampostería y la madera; el entramado de acero para casos de mayores dimensiones. Así como en la pequeña escala Wright se veía capacitado de innovar con el hormigón, a una escala mayor no encontró soluciones asequibles desde el punto de vista tecnológico hasta bastantes años más tarde. En el edificio para la escuela de sus tías, Hillside Home School de 1902, el sistema constructivo fue tradicional, mediante mampostería y madera. Las fachadas perdieron su función estructural, transformándose únicamente en cerramientos. Esto fue debido a la separación entre la cubierta y el muro, lo que se solucionó mediante unos pilares de madera, siguiendo el esquema "*balloon frame*", pero adaptado mediante un cambio de escala. En este caso, las esquinas todavía se mantuvieron cerradas, pero este mismo esquema lo utilizó más adelante en la Ward Willitts House de 1902, donde las esquinas se desmaterializaron para dar paso a la relación entre el espacio interior y el paisaje de Oak Park.

Respecto a edificios de una escala mayor, una de las primeras propuestas fue la del Abraham Lincoln Center en Chicago de 1900. Este proyecto, al igual que el Monolithic Concrete Bank, tampoco se llegó a construir, por lo menos según el proyecto de Wright, pero fue la primera situación donde Wright se enfrentaba a una intervención de mayores dimensiones, de manera que se vio obligado a utilizar el entramado de acero del tipo de la Escuela de Chicago. La propuesta, tanto formalmente como constructivamente, insinuaba cuestiones planteadas más adelante en el edificio Larkin. Los espacios se articulaban alrededor de un atrio central que contenía las líneas de soporte interior. El lenguaje formaba parte de la tradición heredada de su trabajo con Sullivan, pero el esquema de organización del programa y la estructura se aproximaban claramente al Larkin Company Administration Building de 1903. Éste fue el segundo caso donde Wright afrontó un edificio de uso público de dimensiones considerables y, como se ha mencionado, las herramientas constructivas y estructurales de las que Wright disponía para abordar esta escala eran todavía las habituales en Chicago hacia finales del siglo XIX: Estructura de vigas y pilares de acero soportando forjados también metálicos, todo ello revestido mediante muros de ladrillo que caracterizaban este tipo de arquitectura [Fig. 2.2.9].

En los Midway Gardens, Chicago 1913, y un año más tarde en el Hotel Imperial de Tokio, a pesar de ser edificios de gran escala, su escasa altura permitió a Wright explorar nuevas propuestas estructurales, al igual que había ido abriéndose camino en los proyectos de Oak Park. La estructura de los Midway Gardens, siguió el esquema de fachada/mampara sin función estructural. Los soportes de la cubierta eran pilastras que permitían la transición del interior hacia el exterior, acompañada por voladizos considerables. La disposición de la planta, alrededor de un gran patio, recuerda a otras propuestas anteriores y las esquinas se aprovecharon como elementos de rigidización así como para la ubicación de los núcleos de escaleras, como en el edificio Larkin. Debido a las dimensiones de los espacios, Wright se vio obligado a utilizar cerchas metálicas como estructura horizontal en algunos puntos [Fig. 2.2.11]. En estos casos, como se repite en todos los ejemplos de esta época, cuando no tenía otra alternativa que recurrir a estas soluciones estructurales, en lugar de mostrarlas éstas quedaban ocultas dentro de falsos techos o cerramientos. Si hacemos un zoom más amplio de su obra, está claro cuáles eran los instrumentos que consideraba útiles para su arquitectura, mostrándose siempre con toda su expresividad. Pero cuando la utilización de ciertos elementos estructurales se debía simplemente a que no había encontrado todavía soluciones estructurales satisfactorias, éstos siempre quedaban ocultos. El Hotel de Tokio, expuesto anteriormente, resultó en este sentido de gran orgullo para Wright desde el punto de vista estructural, ya que, utilizando soluciones propias, se mantuvo en pie después del terremoto de 1922. Los muros portantes interiores, de sección variable (más anchos en su base), resultaron ser especialmente efectivos frente a cargas sísmicas, debido a la baja posición del centro de gravedad [Fig. 2.2.12].

Abandonada la primera etapa de su vida, a principios de los años veinte, Wright encontró en el hormigón el material idóneo para resolver los requerimientos de su arquitectura. En su exploración del material, donde pueden encontrarse algunos fracasos<sup>69</sup>, Wright requirió la ayuda de personas especializadas, como es el caso de Jaroslav J. Polivka que, a raíz del comienzo del proyecto de la Modern Gallery de New York aportó a Wright, entre otras cosas, las herramientas para desarrollar complejas estructuras de carácter singular. De las siete colaboraciones entre ambos, tres pueden englobarse dentro de este grupo: el puente Butterfly Wings, para el cruce sur de la Bahía de San Francisco, planteado desde 1947, el Pabellón Belmont Racetrack de 1956 y la Torre de la Milla, también en 1956. Por desgracia ninguno de estos ejemplos llegaron a ser construidos, pero, tanto por su singularidad como por la madurez del planteamiento en cuanto a la integración de la estructura con la arquitectura, merecen ser reseñados al margen de la clasificación principal.

En 1947 Polivka, que llevaba un año trabajando con Wright, le propuso la colaboración mutua para diseñar una alternativa al cruce sur de la Bahía de San

---

<sup>69</sup> Toda exploración pionera, arriesgada en el sentido de avance, encuentra en ocasiones fracasos o defectos, que asumidos por mentalidades optimistas permiten afianzar y mejorar propuestas futuras. En el avance tecnológico, aparte de la investigación teórica, es fundamental el ensayo prueba-error, que en arquitectura no es otra cosa que reconsiderar los errores para mejorar propuesta futuras. Este es el caso de los voladizos de la Casa de la cascada, comentados más adelante.

Francisco. *“Acompañé algunas notas revisando mi idea para el nuevo puente de la Bahía de San Francisco y estaría encantado de discutir las con usted...”*<sup>70</sup>

El *Butterfly Wings Bridge* se planteó como el que habría sido el arco de hormigón armado más grande hasta el momento, 305m de luz y 53m sobre el nivel del agua. El resto del puente se trataba de un viaducto sobre arcos de mariposa *“Butterfly”*, muy rebajados que se abrían en la parte superior para formar el tablero y quedaban en voladizo a ambos lados del eje central. La propuesta se planteaba íntegramente con hormigón armado y Wright y Polivka trabajaron conjuntamente para conseguir una estructura económica e integrada en el paisaje. Polivka se lamentó años más tarde por el “desastre” de ingeniería que se llegó a construir, de mayor impacto para la Bahía de San Francisco y con un coste muy superior su propuesta, tanto de construcción como de mantenimiento: *“La calamidad visual podría haberse evitado si las autoridades hubiesen accedido a algunas sugerencias enviadas por el autor”*<sup>71</sup> (refiriéndose a él mismo). En este sentido, Polivka manifestó su opinión acerca del diseño de puentes en uno de sus artículos:

*“La construcción moderna ha potenciado desenfadadamente la construcción de puentes con estructura de acero, extravagantes y obsoletos, que siguen siendo una mancha devastadora en nuestros paisajes. Las nuevas formas de hormigón más amables con la naturaleza, han llegado para ocupar el lugar de los antiguos puentes. No solamente por su gran economía, sino también por su verdadera belleza, negada a las antiguas formas. Una mayor uniformidad con la naturaleza es posible a la naturaleza humana. Muchas formas científicas y artísticas de los puentes experimentan un rápido crecimiento. La superación de grandes luces debe tomar ventaja en la gran economía y belleza que es posible gracias a los nuevos avances científicos del hormigón armado”*<sup>72</sup>

Este proyecto es un ejemplo integrador entre las propiedades mecánicas del hormigón y sus características expresivas y tanto Wright como Polivka intentaron poder llevar a cabo su construcción en diferentes emplazamientos hasta el final de sus vidas [Fig. 2.2.13].

*Como podrá comprobar en las dos separatas adjuntas, Frank Lloyd Wright y yo mismo hemos propuesto para el segundo cruce de la Bahía de San Francisco un puente muy económico formado por hormigón prefabricado y pretensado, de alrededor de \$100 millones de coste, en comparación con otra propuesta de estructura de acero. El conocimiento de las condiciones del suelo para el puente a través del Río Tigris es muy importante para poder realizar un diseño racional y económico por lo que apreciaríamos gratamente toda información acerca de ello que pueda estar disponible.*<sup>73</sup>

El Belmont Racetrack Pavilion fue un caso peculiar ya que no se basaba en la utilización del hormigón como material estructural. Remontándonos hasta los

---

<sup>70</sup> Polivka Papers, Folder 1.7, *“What is like to work with Wright”*. Fragmento de la carta enviada el 21 de julio de 1947 contenida en el artículo

<sup>71</sup> Polivka Papers, Folder 1,05\_43-48. Conclusión de Polivka de su artículo *Aesthetics*.

<sup>72</sup> Polivka Papers, Folder 1,05\_43-48. Del artículo *Aesthetics Bridges*.

<sup>73</sup> Polivka Papers, Folder 1,08\_10. Fragmento de la carta escrita por Polivka dirigida a la Comisión Técnica para el Desarrollo de Bagdad, el 16 de julio de 1958.

anclajes de Romeo and Juliet, Wright siempre había admirado las propiedades resistentes del acero en cuanto a su capacidad de soportar tracciones. En esta propuesta, una gran catenaria, sistema análogo a la de los puentes atirantados, en el borde del voladizo servía para soportar la marquesina de grandes dimensiones. La idea de Wright era que esta cubierta fuese lo más ligera posible por lo que también aprovechó los conocimientos de Polivka sobre materiales plásticos. Si Wright y Polivka hubiesen continuado trabajando juntos unos cuantos años más, seguramente su interés mutuo por las formas de expresión de los nuevos materiales hubiese ido por ese camino. Parece que la combinación de la ligereza del acero y sus propiedades mecánicas en combinación con los nuevos plásticos le resultaba a Wright de gran interés. Polivka estudió y analizó detalles, materiales y costes para los 450.000 pies cuadrados del edificio (41.800m<sup>2</sup>), pero finalmente no se llegó a materializar.

*Volví a Taliesin West en febrero de 1957 y estoy luchando ahora con algunos problemas estructurales sin precedentes bajo los consejos del Gran Maestro. Por ejemplo los 450.000 pies cuadrados de cubierta de plástico sin soportes interiores. Este es otro proyecto en el que Wright me da crédito y reconocimiento total de cooperación.*<sup>74</sup>

Paralelamente a este último proyecto, en 1956 Wright intentabó llevar a cabo el proyecto de la "Mile High" Office Building. Tipológicamente este proyecto podría formar parte de las otras propuestas de torres realizadas por Wright. No obstante, la imponente altura del edificio de 1.609m, suponía nuevos retos no sólo arquitectónicos sino sobre todo tecnológicos. La energía de Wright en estos últimos años de su vida no había decaído y se disponía a afrontar este nuevo reto con las mayores garantías. Polivka le sugirió para ello contar con la ayuda de las grandes autoridades mundiales en materia de ingeniería estructural. Los nombres de Eduardo Torroja, Beggs-Cross, Pier Luigi Nervi o Robert Maillart, figuraban al lado del Dr. J.J.Polivka, motivo de gran orgullo para él, ya que significaba el reconocimiento por parte de Wright de su capacidad técnica e intelectual.

*De especial interés para mi, y estoy muy orgulloso de ello, es la Torre de una Milla de altura en Illinois, (a compararse con la torre concebida por Frank Lloyd Wright medio siglo atrás), donde en una nota adyacente figuran los nombres de varios ingenieros a quienes merecía su honor, como por ejemplo Roebing, Maillart, Torroja, Nervi, etc... y, modestia aparte, Polivka, cuestión que, en cualquier caso, aprecio más que mi Legión de Honor*<sup>75</sup>

Para solucionar esta estructura, Polivka pensaba en un sistema de postensado vertical en el plano de las fachadas, que ayudase a controlar las deformaciones horizontales frente al viento, aumentando la rigidez vertical para reducir al máximo las oscilaciones. *¿No es acaso un misterio que la Tower Lady, publicada en 1910-1911 en Berlín en un libro titulado "Frank Lloyd Wright ausgeführt bauten" (Frank Lloyd Wright-construido) haya sido realmente la materialización del sueño del Maestro de la Torre de la Milla, tan popular hoy en día y para la cual estoy*

---

<sup>74</sup> Polivka Papers, Folder 1.07. "What is like to work with Wright"

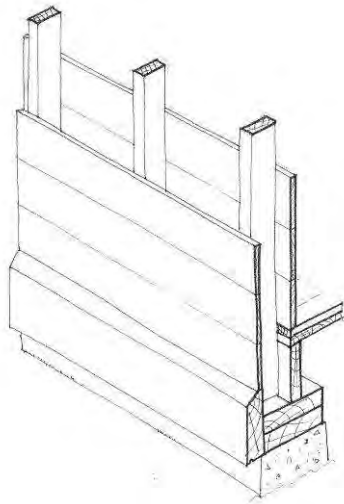
<sup>75</sup> Polivka Papers, Folder 1.07. "What is like to work with Wright"

*investigando en estos momentos respecto a la eliminación del peligro de oscilación?*<sup>76</sup> [Fig. 2.2.14].

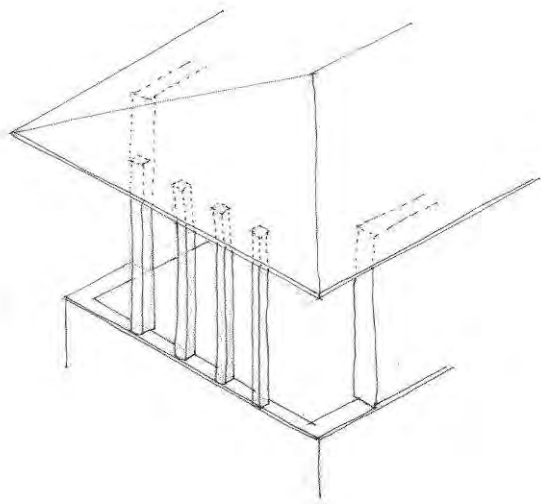
---

<sup>76</sup> Polivka Papers, Folder 1.07. *“What is like to work with Wright”*



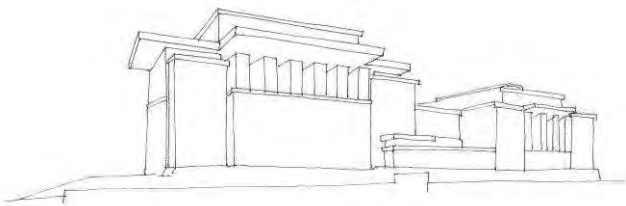


**Fig. 2.2.1** Sistema constructivo “*balloon frame*”, realizado mediante listones de madera. Las dimensiones de los listones o “sticks” y la separación entre ellos son reducidas. Es un sistema constructivo basado en el ensamblaje de piezas pequeñas de madera.

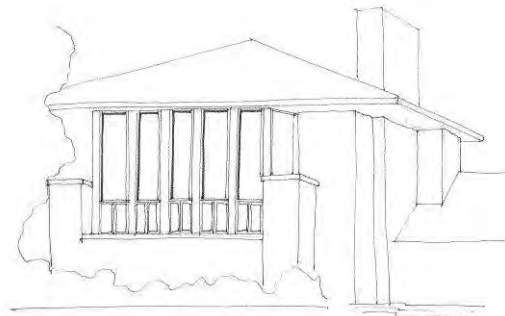
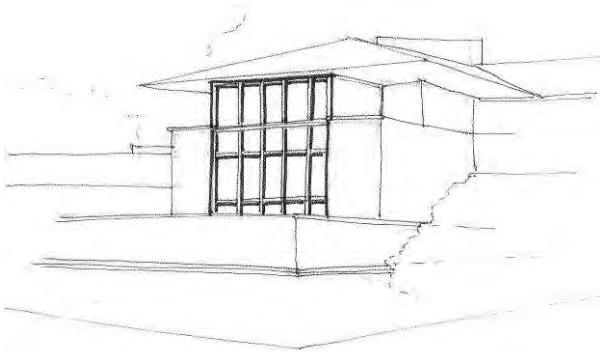


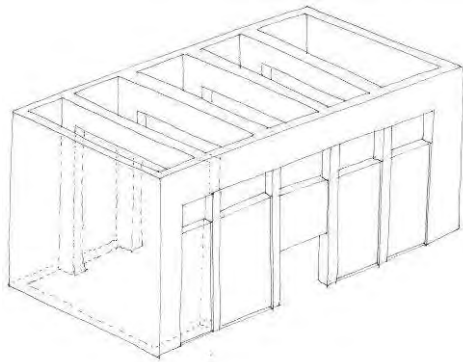
**Fig. 2.2.2** La liberación de la esquina, acorde con el patrón de diseño de las plantas de Wright en diagonal, se basa en una estrategia estructural.

La estructura se configura a partir de un cambio de escala del sistema “*balloon frame*”, donde los listones se convierten en pilares y los tableros de revestimiento se transforman en una fachada sin función portante.

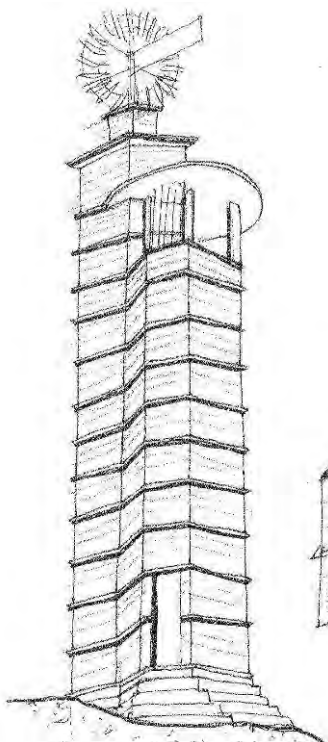
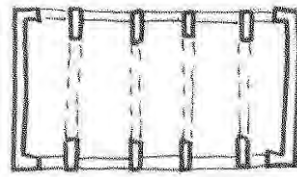
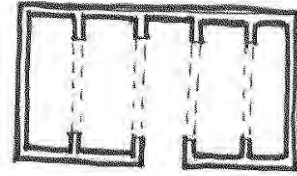


**Fig. 2.2.3-4-5** Fachadas de la casa Ward Willitts y de la escuela en Hillside, donde la composición se basa en una manifestación de este proceso de cambio de escala del sistema “*balloon frame*”. La fachada de la Iglesia Unitaria, aunque realizadas con hormigón, el esquema compositivo-estructural es el mismo.

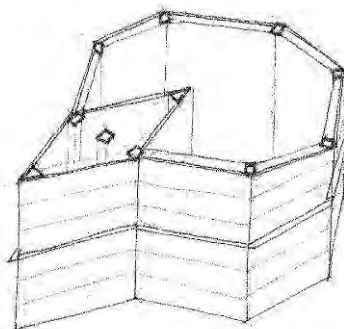


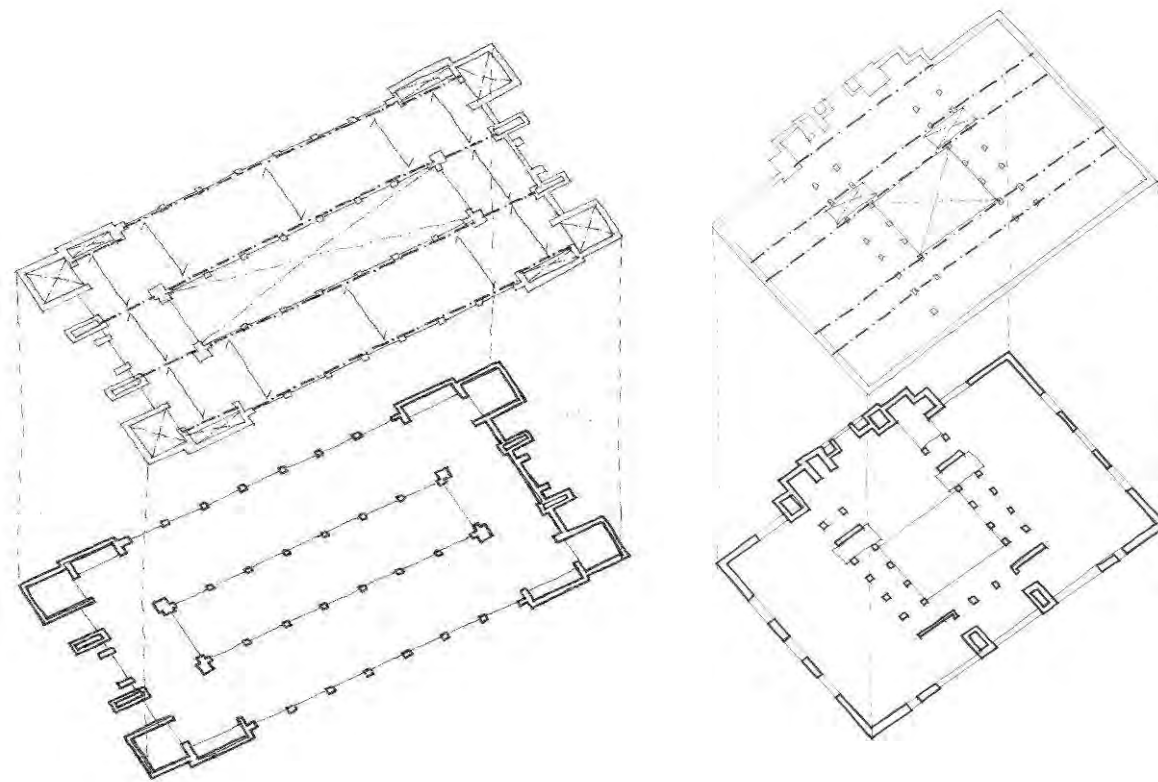


**Fig. 2.2.6** Esquema estructural del Monolithic Concrete Bank, primera aplicación integral del hormigón como estructura, cerramiento y ornamento.

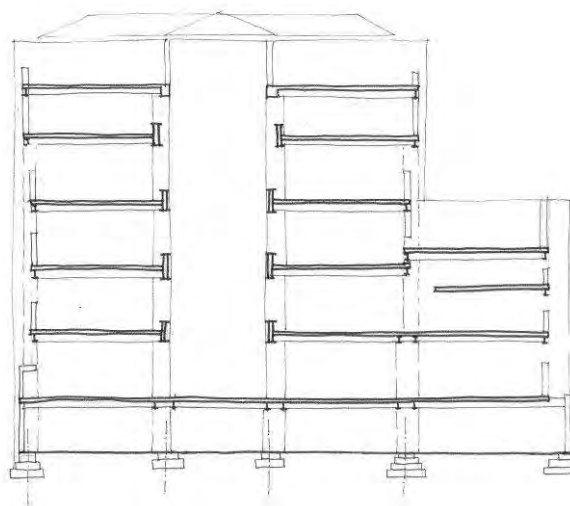


**Fig. 2.2.7** Molino Romeo and Juliet, cuya estructura está formada por un sistema de listones empesillados entre ellos mediante marcos zunchos que abrazan las dos geometrías (rombo y octógono). El sistema se ancla mediante barras de acero a la roca de la base para evitar el vuelco.

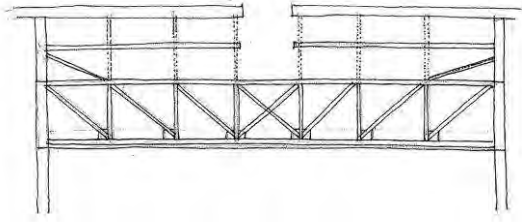




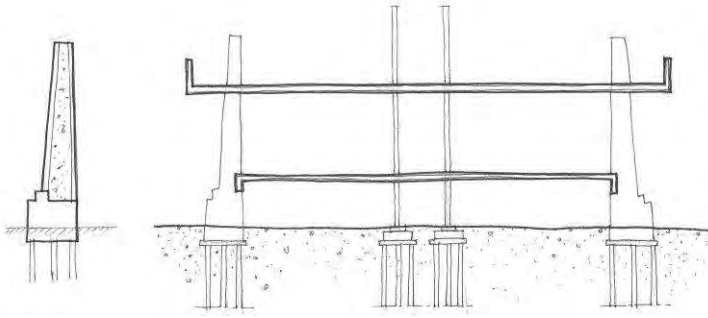
**Fig. 2.2.8-9** Esquemas de la estructura del edificio Larkin y del proyecto del Abraham Lincoln Center. Un sistema de vigas metálicas queda embebido dentro de otros elementos constructivos, aunque hay una cierta intención de manifestarse a través de la disposición de los pilares en los atrios centrales, adelantados respecto al forjado.



**Fig. 2.2.10** En el Abraham Lincoln Center unas potentes vigas de acero forman la estructura longitudinal de cada uno de los niveles. Entre estas vigas, que definen el borde de la fachada exterior y del patio interior, se dispone un forjado de vigas metálicas, según los criterios constructivos de la época.



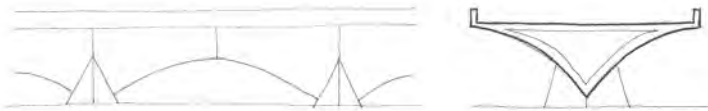
**Fig. 2.2.11** Modelo de cerchas utilizadas en los Midway Gardens para resolver la estructura de los espacios de mayores dimensiones. Las cerchas metálicas quedan ocultas en falsos techos.



**Fig. 2.2.12** En el Hotel Imperial de Tokio, Wright consigue estilizar los pilares interiores gracias al equilibrio que se produce a partir de los voladizos de la planta superior y el aprovechamiento de continuidad de los vanos.

Los muros de fachada se construyen a partir de un sistema pseudoprefabricado, entre dos paneles de hormigón.

El sistema de pilotes permite empotrar los muros al terreno mejorando su comportamiento sismorresistente al trabajar en voladizo en esta situación.



**Fig. 2.2.13** El esquema estructural del Puente Butterfly Wings se basa en una sección con voladizos a ambos lados, resueltos a través del comportamiento laminar del arco principal.



**Fig. 2.2.14** Funcionamiento de la estructura de la Torre de la Milla: para conseguir una mayor rigidez del núcleo frente a las cargas horizontales de viento, se propone un postesado externo del mismo, en el plano de las fachadas, simulando el funcionamiento de las torres de comunicaciones atirantadas. Hay que destacar la similitud de funcionamiento existente respecto a los anclajes metálicos propuestos para el molino *Romeo and Juliet* sesenta años antes, aunque a una escala mucho mayor.

**Clasificación de obras PRECURSORAS**

OBRA	ESTADO	ESTRUCTURA	COMENTARIOS
Lake Mendota Boathouse. Madison, Wisconsin. 1893	Proyecto	TRADICIONAL	No tiene un interés especial. Sin embargo hay algún elemento estructural en la parte inferior, como tornapuntas, que demuestran interés hacia soluciones futuras (grandes voladizos).
Lake Monona Boathouse. Madison, Wisconsin. 1893	Proyecto	TRADICIONAL	Estructura de cubierta octogonal con cerchas de madera tipo " <i>polonceau</i> ".
Monolithic Concrete Bank. 1894	Proyecto	HORMIGÓN	Primer edificio proyectado con Hormigón, donde la estructura, el cerramiento y los ornamentos se integran en el mismo elemento.
Frank Lloyd Wright Studio. Oak Park, Illinois. 1895	Construido	TRADICIONAL	El esquema de ampliación de su casa para su estudio responde al mismo modelo que la iglesia unitaria. La formalización de las fachadas apunta hacia soluciones utilizadas posteriormente, donde las pilastras separan la cubierta del resto del edificio.
Romeo and Juliet Windmill Tower for Hillside Home School. Spring Green, Wisconsin. 1896	Construido	TRADICIONAL	Es interesante la descripción que hace de la torre del molino en la Autobiografía. Concepto de raíz, contrapeso para compensar el vuelco y zunchado del fuste.
Abraham Lincoln Center. Chicago Illinois. 1900	Proyecto	ACERO	Muros de de fábrica cerámica y forjados con vigas metálicas, a la manera convencional de la Escuela de Chicago.
Assembly Hall for Hillside Home School. Spring Green, Wisconsin. 1901	Construido	TRADICIONAL	Primeros planteamientos de separación de la cubierta de los muros de fachada. Cambio de escala del sistema de <i>sticks</i> del <i>balloon frame</i> .
Hillside Home School. Spring Green, Wisconsin. 1902	Construido	TRADICIONAL	Muros de mampostería no portantes. Empieza a insinuarse el voladizo de la cubierta, lo que será el sistema habitual de las casas de la pradera

OBRA	ESTRUCTURA	COMENTARIOS
Susan Lawrence Dana House. Spring Field, Illinois. 1902	Construido TRADICIONAL	Está entre las fachadas no estructurales del tipo de Hillside Home School o Ward Willitts House y las casas de la pradera con potentes voladizos. Es donde se ubica la escultura de la "Dama y la Torre" que según Polivka, evoca a la futura Torre de la Milla.
Ward Willitts house. Oak Park, Illinois. 1902	Construido TRADICIONAL	Las fachadas son como mamparas sin función estructural,, pero en este caso utilizando el sistema <i>balloon frame</i> de madera.
Larkin Company Administration Building. Buffalo, NewYork. 1903	Construido ACERO	Muros de fábrica y forjados de vigas metálicas, a la manera convencional de Chicago. Resultan interesantes los detalles constructivos de la claraboya del patio, reminiscencia del lucernario del Guggenheim.
Unity Temple. Oak Park, Illinois. 1904	Construido HORMIGÓN	Primer edificio construido con Hormigón, donde la estructura, el cerramiento y los ornamentos son el mismo elemento.
Midway Gardens. Chicago Illinois. 1913	Construido HORMIGÓN	Estructura que sigue el esquema de fachada/mampara sin función estructural. La estructura está formada por pilastras que soportan los voladizos de cubierta. Las esquinas se aprovechan como elementos rígidos y para la ubicación de los núcleos de escaleras, como en el edificio Larkin.
Imperial Hotel. Tokyo, Japan. 1914	Construido HORMIGÓN	Tanto la sección tipo del edificio como la sección de los muros portantes, favorecen el comportamiento frente a sismo de la estructura. Wright explica en la Autobiografía como se cumplieron sus augurios durante el terremoto de Japón de 1922.
Automobile with Cantilevered Top. 1920	Proyecto ACERO	Diseño de carrocería de coche, con la cubierta en voladizo, de manera que los pies derechos delanteros no entorpezcan la visión en diagonal.

**Clasificación de obras SINGULARES**

OBRA		ESTRUCTURA	COMENTARIOS
Administration Building. University of South Florida. Lakeland, Florida. 1945	Construido	HORMIGÓN	La disposición de la estructura recuerda al planteamiento de los pilares del Butterfly Bridge.
Butterfly Bridge for the Wisconsin River near Spring Green, Wisconsin. 1947	Proyecto	HORMIGÓN	Puente sobre el río Wisconsin con luces de 61m entre una única fila de pilares centrales. El tablero está en voladizo desde el eje central. Entre pilas, ligera forma de arco (arcos mariposa). Típica sección de voladizos de hormigón.
Twin Suspension Bridges for Pittsburgh Point Parc Civic Center. Pittsburgh, Pennsylvania. 1948	Proyecto	ACERO	Puente de conexión con el Point Park Civic Center. Son dos brazos atirantados desde un único gran mástil. Fuste del puente de hormigón de sección triangular.
Butterfly Bridge, San Francisco, California. 1949	Proyecto	HORMIGÓN	Planteado como el que hubiese sido el arco de hormigón con la luz más grande del mundo. 305m de luz y 53m sobre el nivel del agua. El resto del puente es un viaducto sobre arcos igual que el Butterfly Bridge (arcos mariposa).
The Belmont Racetrack Pavilion. Long Island, New York. 1956	Proyecto	ACERO	Estructura formada por catenarias con una cubierta de material plástico para cubrir 450,000 pies cuadrados (41.800m <sup>2</sup> ) sin soportes.
"Mile High" Office Building. Chicago Illinois. 1956	Proyecto	ACERO	Torre de una milla de altura (1.609m). Núcleo central a modo de espina con los forjados en voladizo, pretensado de las fachadas mediante cables para rigidizar el núcleo y minimizar las oscilaciones.

### 2.3 Estructuras basadas en el voladizo

El tema del voladizo es una cuestión que se repite desde los primeros trabajos de Wright hasta el Guggenheim Museum. Es la constante más recurrente de toda su obra, la materialización del principio compositivo mediante planos deslizantes y, todo ello, atribuido al papel formal de un elemento estructural. El voladizo va unido a la pérdida de la función portante de las fachadas por lo que sus orígenes, como se ha visto anteriormente, se remontan a los primeros proyectos de Spring Green. La mayor parte de las obras de Wright podrían incluirse dentro de este grupo ya que en casi todos los casos aparecen voladizos en mayor o menor medida, bien aparentemente o bien como concepto. De este modo, todas las obras que además de contener voladizos tienen otros elementos claramente diferenciados pertenecientes a los diferentes grupos (espiral, repetición de patrones o la torre) no se han incorporado en esta primera agrupación. Sin embargo, aquellos proyectos donde el motivo principal ha sido el del edificio “con voladizos” o el edificio “en voladizo” se han seleccionado para este grupo. Hay que señalar que la gran diferencia entre los planteamientos de Wright y los de otras arquitecturas contemporáneas radica en la propuesta estructural. En los casos de la Escuela de Chicago y el Movimiento Moderno, la retícula estructural marca la pauta de la caja o envolvente y, bien ajustándose a ella o bien separándose, el entramado estructural “contiene” el edificio. En cuanto a Wright, este aspecto es exactamente a la inversa; no existe a priori una malla estructural y los elementos que forman la estructura “explotan” hacia el exterior, diluyendo los límites físicos del edificio, que se fusiona con el entorno. Esto es posible mediante las diferentes modalidades de voladizos, o lo que es lo mismo, a través de un elemento fundamentalmente estructural. Para Bruno Zevi, la Casa de la Cascada contiene todas las invariantes del lenguaje moderno de la arquitectura, de las cuales merece la pena reseñar la última: “*Wright lleva hasta el fondo la profundización lingüística partiendo de consideraciones estructurales*”, refiriéndose a los voladizos del conocido edificio. También insiste en el mismo concepto un poco más adelante: “*La invariante estructural del lenguaje moderno concierne más que a los voladizos, membranas y caparazones, al principio de participación de todos estos elementos arquitectónicos en la orquestación estática*”<sup>77</sup>. Zevi apunta hacia uno de los principios fundamentales de la arquitectura de Wright: *...lleva hasta el fondo la profundización lingüística partiendo de consideraciones estructurales*.

Desde el punto de vista constructivo, la evolución del voladizo en el conjunto de la obra de Wright pasó por diferentes fases. Al igual que en otras tipologías o en utilización de los diferentes materiales estructurales, la madurez de Wright en este caso se puede decir que no apareció hasta la fusión de la utilización del hormigón con la propia tipología, como es el caso de la Casa de la Cascada. Las modestas dimensiones de los primeros voladizos, aunque no carentes de significado, resultaban fácilmente controlables con los medios constructivos al alcance de Wright. Evolucionada su obra hacia las casas de la pradera, los voladizos

---

<sup>77</sup> ZEVI, Bruno. “El lenguaje moderno de la arquitectura” Ed. Poseidón, 1978. Capítulo dedicado a las estructuras en voladizo, caparazones y membranas. Pág. 55



comenzaron a ser considerables y requerían de ciertos elementos que permitiesen resolver satisfactoriamente su estructura, como es el caso de vigas de acero ocultas en la cubierta. Aunque esta solución, la de la estructura metálica oculta, Wright la utilizó en algunos proyectos posteriores a la Casa de la Cascada, el resultado no es el mismo que cuando aprovechó la capacidad plástica del hormigón. El análisis de elementos de hormigón en voladizo no es tan directo como el de los entramados de acero y puede ser que al margen de otros requerimientos concretos, los diferentes colaboradores de Wright hubiesen condicionado también las diferentes soluciones<sup>78</sup>. Lo que sí parece claro es que a Wright le satisfacían más las soluciones con hormigón, ya que encajaban de mejor manera con su posición integradora entre estructura y espacio. Aún así, los diferentes ejemplos resueltos con acero apuntaban también hacia una clara intención expresiva del voladizo como elemento estructural.

En cuanto a las casas de la pradera, son la primera manifestación formal de esta intención, con unas dimensiones que algunos casos no pasan desapercibidas; son una de las primeras demostraciones de una estructura generadora del espacio y la arquitectura. Los famosos voladizos bajo los que se albergan y desarrollan estas viviendas son en cierta manera de un grado superior respecto de muchos edificios americanos contemporáneos, tanto técnicamente como conceptualmente. Las influencias de la arquitectura japonesa, en concreto de la Villa Katsura, de la que Wright era conocedor, se reflejan en dos conceptos íntimamente ligados: la presencia formal de la cubierta y su extensión hacia el paisaje con la pérdida de función portante de las fachadas.

El ejemplo más conocido es el de la casa Robie de 1906, que, aunque se sitúa en el ocaso de esta etapa, es un claro modelo resuelto, como se ha referido, con perfiles de acero de sección en doble “T”, consiguiendo así unos imponentes voladizos de 4,30m. Hay otros ejemplos anteriores con demostraciones parecidas, como la casa Thomas, con vuelos de 3,30m, o las casas Henderson, Hoyt y Boynton, donde resuelve los voladizos que sobrepasan las fachadas mediante un sistema de escuadrías y tirantes de madera [Fig. 2.3.1-2]. Respecto a la casa Winslow o la casa Dana, aunque contemporáneas a las anteriores, su planteamiento estructural se asemeja más al que se ha explicado en las escuelas de Hillside o en la casa Ward Willitts.

La tecnología constructiva para llevar a cabo estos ejemplos no iba más allá de la referencia al “*balloon frame*” o la construcción con mampostería y madera. El esquema que resuelve a nivel estructural estos voladizos era un sencillo sistema de vigas y tornapuntas en voladizo como extensión del sistema doméstico de construcción americano, por lo que Wright tuvo que recurrir en ocasiones a elementos ajenos a estas tipologías tradicionales. En cuanto a la casa Robie, dos grandes vigas doble “T”, ocultas en las pendientes de la cubierta, permitieron resolver el potente voladizo. En este momento Wright no había encontrado todavía la expresividad propia de los materiales, pero es evidente que el voladizo resultante otorgó de significado a la cubierta [Fig. 2.3.3]. En cierto modo, una de las razones

---

<sup>78</sup> Polivka Papers. Folder 1.3\_23. Véase más adelante la discusión entre Polivka (defensor de la lámina de hormigón en el caso del Guggenheim) y Wes Peters (proponiendo un entramado de acero recubierto para el mismo edificio).

por las que Wright abandonó esta etapa fue la desconexión entre el material, en este caso los perfiles de acero, y la forma y expresión del voladizo como elemento arquitectónico. Aunque empezaba a familiarizarse con el hormigón a partir de la construcción del Templo Unitario, los recursos para el control de comportamiento de este material todavía quedaban lejos de los voladizos de la Casa de la Cascada.

En otros proyectos, como en Poultry House and Stables for Eduard C. Waller en 1901, puede apreciarse tímidamente en el planteamiento estructural de una de sus partes un esquema que será utilizado en su obra posteriormente. Este es el caso del pináculo de coronación de la cubierta, que recuerda a la propuesta de la Torre de la Milla, por supuesto a una escala muy diferente [Fig. 2.3.4]. El esquema de “trípode”, considerando Wright el triángulo como una forma llena de contenido simbólico y de geométrica más estable, se repitió en varios proyectos durante toda su obra, como en la Catedral de acero de 1926 o la Iglesia Unitaria de 1947, expuestos más adelante.

En general, las Casas de la Pradera, a pesar de no haber llegado todavía a la apoteosis del hormigón, apuntaban sin lugar a dudas hacia las intenciones de Wright de eliminar los límites del edificio, abriéndose hacia el exterior mediante una nueva concepción estructural contrapuesta a la retícula de acero habitual en Chicago.

Abandonada esta época, las propuestas de Wright en la segunda década del siglo XX comenzaron a sugerir la cubierta no sólo como elemento en vuelo, sino como un volumen completo en voladizo. Este es el caso del proyecto de la casa para Andrew Porter en Spring Green, 1911, la planta primera volaba sobre la planta baja a ambos lados de esta. En este edificio, Wright se atrevió con un vuelo de 5m aunque nunca se llegó a construir. En cualquier caso este ejemplo resulta de especial interés ya que fue la primera situación donde toda una planta se desplazaba sobre la inferior manifestando así todas las intenciones formales del deslizamiento de planos, buscado por Wright en la mayor parte de sus edificios [Fig. 2.3.5]. Aquí parece que la estructura se planteó mediante un sistema de vigas de madera, con las consecuentes limitaciones del sistema, pero dos décadas más tarde, contextualizadas dentro de la filosofía usoniana de Wright, proyectó varias casas que siguieron el mismo esquema: una planta completa deslizándose sobre la inferior. Este es el caso del prototipo para las All Steel Houses en California, en 1938 o la Rose Pauson House en Phoenix, Arizona, en 1939. En ambos casos la estructura se resolvió mediante vigas de acero de gran rigidez ancladas a un macizo posterior. Todo el conjunto quedó revestido por un sistema de cerramientos de madera que ocultaba la estructura, de manera que ésta podía protegerse convenientemente contra el fuego. No obstante la casa Rose Pauson fue en 1942 pasto de un incendio, del cual sólo sobrevivieron los robustos contrafuertes de mampostería a los que se anclaba la estructura, quedando éstos como testimonio de un sistema estructural ciertamente comprometido [Fig. 2.3.6].

La relación de estos dos proyectos con la Casa de la Cascada, es bastante directa, especialmente con el proyecto de All Steel Houses, aunque sus estructuras se diseñaron con materiales diferentes. Posiblemente el éxito de la casa Kaufmann es debido en parte a la utilización del hormigón armado, que a diferencia de los otros dos ejemplos manifiesta la unidad entre la estructura y el conjunto. No obstante, la

filosofía usoniana que contextualiza las casas con la estructura de acero enlaza con su facilidad de fabricación y montaje, en la línea de los otros sistemas constructivos propuestos por Wright para las casas de esta época, asequibles para el ciudadano medio. Este no es el caso de la Casa de la Cascada, donde, a pesar de converger la utilización del hormigón con la expresión de los voladizos, el esfuerzo de construcción del encofrado de todo el conjunto superó con creces la flexibilidad de las propuesta con acero [Fig. 2.3.7].

El proyecto de All Steel Houses consistía en un conjunto de 100 viviendas sobre las laderas de los Ángeles. A partir de un volumen macizo anclado en el terreno, diferentes niveles de terrazas se prolongaban en voladizo sobre las vertientes. Todo ello rematado con una cubierta horizontal también con prominentes voladizos. Al ser un conjunto de varios edificios similares, la propuesta recogía un sistema de industrialización mediante una estructura metálica prefabricada, de manera que pudiese facilitar su construcción y abaratar los costes. Toda la estructura se preveía revestida con madera, siguiendo esquemas parecidos a la tipología usoniana [Fig. 2.3.10]. Es otro intento más de Wright por desarrollar sistemas de estandarización de casas que permitiesen economizar su construcción, igual que el sistema “block” de piezas prefabricadas de hormigón.

En el caso de la casa Rouse Pauson, a pesar de ser un único edificio, la intención resultaba ser la misma: aprovechar un sistema industrializado para abaratar el coste. En este ejemplo, la imponente dimensión del voladizo de la terraza obligó a colocar un sistema de tornapuntas por la cara inferior, de manera que se consiguiesen controlar las deformaciones debidas a la flexibilidad del sistema de vigas de acero. Todo ello quedó recubierto nuevamente de madera dándole el aspecto monolítico que hubiese tenido en el caso de realizarse el mismo esquema con hormigón. De la misma manera se planteó la casa George Sturges, aunque en esta ocasión con una estructura principal realizada mediante secciones de madera [Fig. 2.3.11].

¿A quien sino a Wright se le ocurriría colocar una casa sobre una cascada? Y de hacerlo así, ¿de qué manera sino mediante voladizos podría haberse realizado? “*Nadie sitúa una casa sobre una cascada si no ha adquirido conciencia del fluir de las cosas*”<sup>79</sup>. La Casa de la Cascada, o casa Kaufmann, posiblemente es el edificio residencial más famoso de los Estados Unidos. Frank Lloyd Wright lo proyectó en 1934 para un empresario de Pittsburg, Edgar E. Kaufmann, como casa de vacaciones en Bear Run, Pensilvania y su construcción se dilató hasta 1939. Vincent Scully<sup>80</sup> compara este edificio con la Novell House, de Richard Neutra, proyectada y construida entre 1927 y 1929. Ambos edificios se configuran a partir de geometrías rectangulares en voladizo, aunque la estructura proyectada por Neutra se resolvió mediante un entramado de acero más próximo al Estilo Internacional. La diferencia fundamental consiste en el uso de la estructura como herramienta de proyecto, de manera que Wright, a través del uso de la estructura de hormigón, consiguió difuminar el límite patente entre el exterior y el interior de la casa Novell. Por tanto, la Casa de la Cascada se configuró a partir de la

---

<sup>79</sup> ZEVI, Bruno. “*El lenguaje Moderno de la Arquitectura*” Editorial Poseidón, 1978. Temporalidad del espacio. Pág.66

<sup>80</sup> SCULLY, Vincent. “Frank Lloyd Wright” Ed. Bruguera, Barcelona 1961. Pág. 25

desestructuración del entramado de la estructura, transformándolo en una superposición de planos deslizantes.

El contexto en ese momento no era demasiado favorable para Wright, cuya carrera estaba en declive, entre otras cosas debido a la depresión posterior a 1929, así que este proyecto suponía aire fresco para materializar sus ideas respecto de los planteamientos orgánicos de su arquitectura. La composición a partir de planos deslizantes se hace evidente aquí a través de los grandes voladizos de sus terrazas sobre el río que permiten establecer una relación estrecha con el entorno. Este concepto arquitectónico tan claro, sin embargo representaba ciertas dificultades técnicas ya que los voladizos eran de 5m en la terraza inferior y de 6,5m en la terraza superior. Para resolverlo, el proyecto de Wright preveía un sistema de vigas en voladizo embebidas en el espesor de la terraza, formando una sección en “T” invertida. Tanto el Sr. Kaufmann como el contratista dudaron de la efectividad de esta solución y de su dimensionado. Como tantas otras veces, la perseverancia de Wright y su seguridad en las soluciones propuestas consiguieron que finalizase la construcción, en la que el contratista acabó utilizando el doble de acero del que indicaban los planos, como medida de seguridad [Fig. 2.3.8].

Al poco tiempo de la construcción, los movimientos de la estructura se hicieron patentes y Wright de alguna manera se desentendió del asunto. Posteriormente, Mendel Gleckman, ingeniero civil de Wright, reconoció que existía un déficit importante de cuantía de acero en la cara superior de las vigas, por lo que éstas se iban deformando progresivamente y haciendo patente su problema a través de las múltiples grietas y fisuras aparecidas. Todos los elementos constructivos, carpinterías, cerramientos, etc... evidenciaban también de manera clara la progresiva deformación, por lo que los Kaufmann consultaron a varios ingenieros con la intención de resolver el problema. Finalmente, después de la muerte del Sr. Kaufmann en 1963, sus hijos vendieron la casa a la fundación Frank Lloyd Wright.<sup>81</sup>

Una estructura bien planteada, pero mal calculada, es mejor que una mal planteada y bien calculada. Evidentemente la situación de la casa de la cascada se debió a un fallo en el dimensionado y armado de las vigas de los voladizos, fruto de un cálculo no ajustado, pero si se ha mantenido en pie a pesar de sus problemas ha sido gracias a la claridad de funcionamiento de su estructura (y a que el contratista prudentemente duplico las cuantías de acero). En 1997 se planteó la posibilidad de reparar y reforzar la estructura ya que las deformaciones seguían creciendo. Desde su construcción se ha podido comprobar que la deformación acumulada era ya de 18cm.

La reparación estructural consistió en incorporar un postensado externo en las vigas en voladizo con un tendón a cada lado de la viga. De esta manera, no sólo se restituye la cuantía de acero que falta (por uno de mucha mejor calidad), sino que además se comprime toda la sección de hormigón, mejorando sustancialmente sus condiciones de durabilidad. El proyecto de reparación fue llevado a cabo por Robert Silman Associates, ingenieros de estructuras especializados en la reparación y conservación de patrimonio arquitectónico [Fig. 2.3.9].

---

<sup>81</sup> Documental “*Saving Fallingwater*” 2.006 USA. Director Kenneth Love

Los fracasos de la historia de la arquitectura no suponen en muchos casos un paso atrás, sino el aprendizaje para situaciones futuras<sup>82</sup>. En el caso anterior, era la primera vez que Wright se enfrentaba con un sistema estructural complejo de hormigón que, visto, en perspectiva no representaba ningún reto especial, pero contextualizado en 1939 y con las dificultades de accesibilidad del emplazamiento, posiblemente resultaron múltiples las dificultades a las que, para llevar a cabo su construcción, Wright tuvo que hacer frente. Al poco tiempo de finalizar las obras comenzaron los problemas, a lo que Wright, lejos de abandonar este sistema constructivo, abordó nuevos proyectos de la misma manera, incrementando la complejidad de las diferentes propuestas estructurales. Edificios como las torres de Crystal Heights en 1939, el Pittsfield Defense Plant en 1942 o el mismo proyecto de la Modern Gallery se planteaban desde sus inicios mediante singulares estructuras de hormigón, llevando este material hasta sus límites resistentes y constructivos. Los fracasos en ocasiones resultan ser un peaje necesario para éxitos futuros. No se trata de buscar un culpable para el caso de la casa Kaufmann, pero sí está claro que en proyectos posteriores Wright puso los medios para no repetir los mismos errores. De este modo, Jaroslav J. Polivka comenzó a trabajar en 1946 con Wright en el proyecto de la Modern Gallery de New York, la estructura más compleja de láminas de hormigón abordada por Wright en toda su obra, poniendo a su disposición las herramientas suficientes para garantizar el éxito de esta propuesta.

Polivka también participó, entre otras colaboraciones, en el proyecto de la Morris House durante 1948. Esta vivienda, situada en un acantilado al borde del mar, cerca de San Francisco, se planteó como una superposición de voladizos a partir de un eje central. La propuesta de Wright era la de utilizar hormigón para todo el edificio, aunque Polivka le sugirió aligerar la estructura con un tipo de paneles aislantes rígidos con posibilidad de gunitarse, para aliviar así el peso propio de la estructura; “*Creo que se puede conseguir un considerable ahorro utilizando paneles aislantes resistentes tipo “Sonotherm” como solución adecuada para ser gunitada, con la cual tengo la experiencia de un edificio en Berkeley*”<sup>83</sup>. El conocimiento de Polivka de nuevas técnicas y materiales resultó a Wright de gran ayuda y realizando una estimación de coste para la casa de unos 150.000 dólares si utilizaban este sistema. Este edificio no se construyó, por lo que las mejoras estructurales propuestas por Polivka no llegaron a ponerse en práctica [Fig. 2.3.12-15]. El proyecto fue completado en 1955 con una casa de invitados, que tampoco llegó a construirse debido a la muerte de Mr. Morris.

Hay toda una serie de proyectos, algunos sin construir, que se considera oportuno incluirlos en el grupo de “voladizos”. Son edificios de escala superior a la doméstica y que, por sus dimensiones, presentan cierta singularidad a la hora de plantear el

---

<sup>82</sup> PETROSKI, Henry. *To engineer is human. The role of failure in successful design*. St. Martin's press. New York.

SALVADORI, Mario. *Why buildings stand up? The Strength of Architecture*. W.W. Norton & Co. New York 1990

SALVADORI, Mario– LEVI, Matthys. *Why buildings fall down? The Strength of Architecture*. W.W. Norton & Co. New York 1994.

<sup>83</sup> Polivka Papers. Folder 1,04\_38. Carta de Polivka a Wright a propósito de la casa Morris.

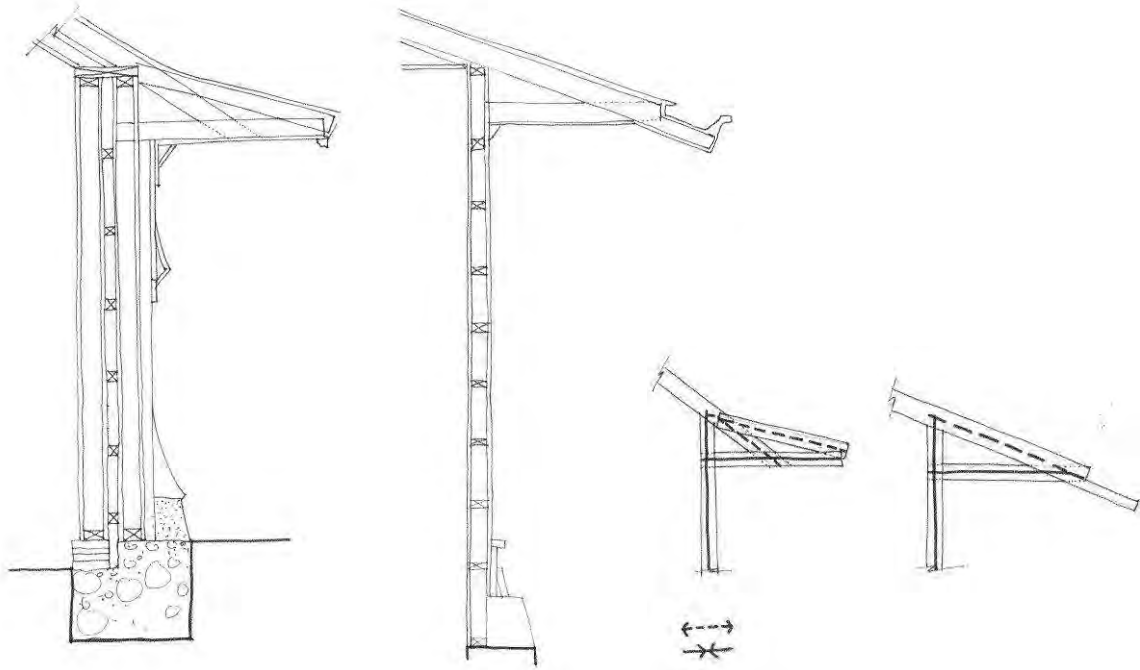
voladizo. Las dos propuestas para el Monona Terrace Civic Center en 1938 y posteriormente en 1954 se configuraron a partir de una gran plaza semi-circular que se proyectaba en voladizo sobre el lago. En la primera propuesta, dada la geometría circular y la magnitud del vuelo, parece que la única manera de haberlo resuelto fuese mediante hormigón armado. En la segunda versión, la forma de los arcos del nivel inferior recuerda a los del puente Butterfly Wings, y por analogía confirman la hipótesis de la utilización del hormigón. En este caso, los pilares se dispusieron radialmente sobre una circunferencia interior y soportaban los tres niveles del conjunto. Parece que la propuesta del puente desarrollada con Polivka influyó en toda una serie de proyectos posteriores, aunque no hay constancia de que Polivka colaborara directamente en ellos. La utilización de este tipo de arcos se repitió hasta una de sus últimas obras, el Centro Cívico Marin Country de California, en 1957.

El proyecto sin construir para el Club deportivo Huntington Hartford, en Hollywood, California, de 1947, estaba formado por una serie de grandes terrazas en voladizo sobre la ladera de la montaña. El edificio principal se desarrolló en tres terrazas iguales situadas a partir de los vértices de un triángulo equilátero, de manera que los momentos de vuelco generados por los voladizos quedan compensados en gran parte por la simetría de la disposición. En la sección se intuye el razonamiento estructural del conjunto, donde también se contrapesan los potentes voladizos a través de la inclinación y macizado del núcleo [Fig. 2.3.16]. Para resolver la estructura se pensó en hormigón postensado con barras de acero, rigidizando así los voladizos de manera que el sistema fuese resistente a los terremotos. El núcleo central triangular era un gran núcleo de piedra macizado con hormigón que, como el tronco de un árbol con sus raíces, permanece firmemente anclado sobre lo alto de la montaña. Para Wright el efecto de “enraizar” el tronco del edificio es la mejor manera de hacer frente a los terremotos y, mediante la utilización del hormigón y otros materiales naturales, conseguir un equilibrio entre la economía y la natural integración en el paisaje. La forma de los voladizos puede interpretarse como casquetes de esfera que, derivado de su efecto laminar cóncavo, se obtiene un comportamiento óptimo (control del pandeo de la parte inferior comprimida debido a la forma de concha).

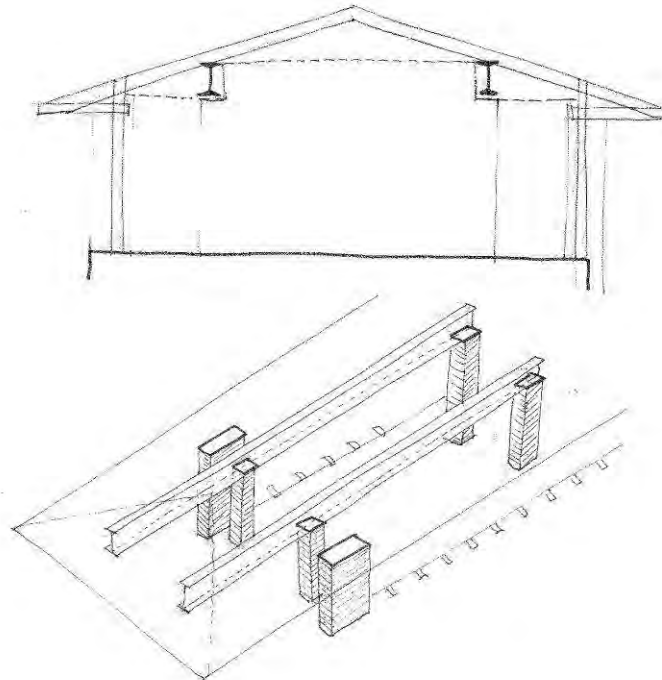
En el proyecto de la Iglesia Ortodoxa de 1956 el efecto del voladizo es más sutil. En la planta circular del edificio se situaron únicamente cuatro apoyos, de manera que cada cuadrante de la planta queda en voladizo respecto de los mismos [Fig. 2.3.17]. Como es habitual en todos los edificios de Wright, la geometría es la base del proyecto, materializándose a través de la estructura. La cruz (que se forma entre los apoyos) y la cúpula (tanto de cubierta como de base) son símbolos de la iglesia ortodoxa, pero no se aplican como una mera forma, sino que son la propia estructura del edificio, integrando así la materialización simbólica de la forma con la función estructural.

En conclusión, el voladizo es el elemento estructural básico del repertorio de Wright y, en las siguientes tipologías desarrolladas a continuación, puede identificarse también de manera aislada. Es un elemento siempre identificable en las obras más significativas aunque, como se ha podido ver, no siempre se

manifiesta de la misma manera. Ejemplos similares a la Fallingwater se repiten, pero en ocasiones su demostración es más sutil. De esta manera, también aparece en las columnas del edificio administrativo de la Johnson o en el porche del aparcamiento de la casa Friedman en Pleasantville, así como en multitud de ejemplos a mayor escala. En todos estos casos, parece que la opción de utilización del hormigón armado le permite a Wright formar una unión indivisible entre la forma de la estructura, su funcionamiento resistente y su función arquitectónica, aprovechando todas las cualidades mecánicas y plásticas del material.

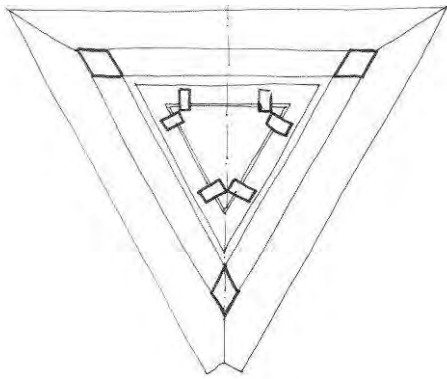


**Fig. 2.3.1-2** Secciones constructivas de los voladizos del establo de la casa Edgar C. Waller y de la casa Willitts, resueltos mediante un sistema de vigas de madera estabilizadas mediante tornapuntas horizontales también de madera. Los voladizos van desde los 120cm a los 140cm. El funcionamiento estructural se corresponde con el esquema.

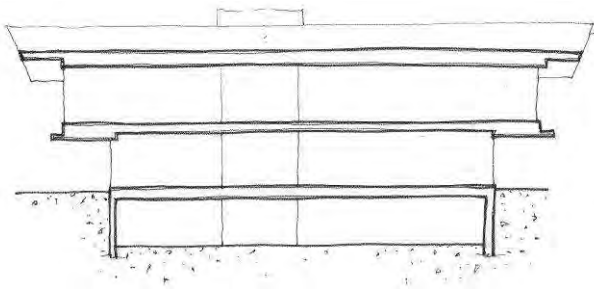


**Fig. 2.3.3** Esquema estructural para resolver el gran voladizo de la casa Robie, mediante dos potentes vigas metálicas de sección doble "T" que acompañan la línea de carga de la cubierta. Las vigas quedan embebidas ocultas entre el falso techo y la cubierta.





**Fig. 2.3.4** El Poultry House Stables, es un precedente a pequeña escala de estructuras posteriores basadas en un funcionamiento de “trípode”, como la Catedral de acero y vidrio o la sinagoga Beth Solomon.



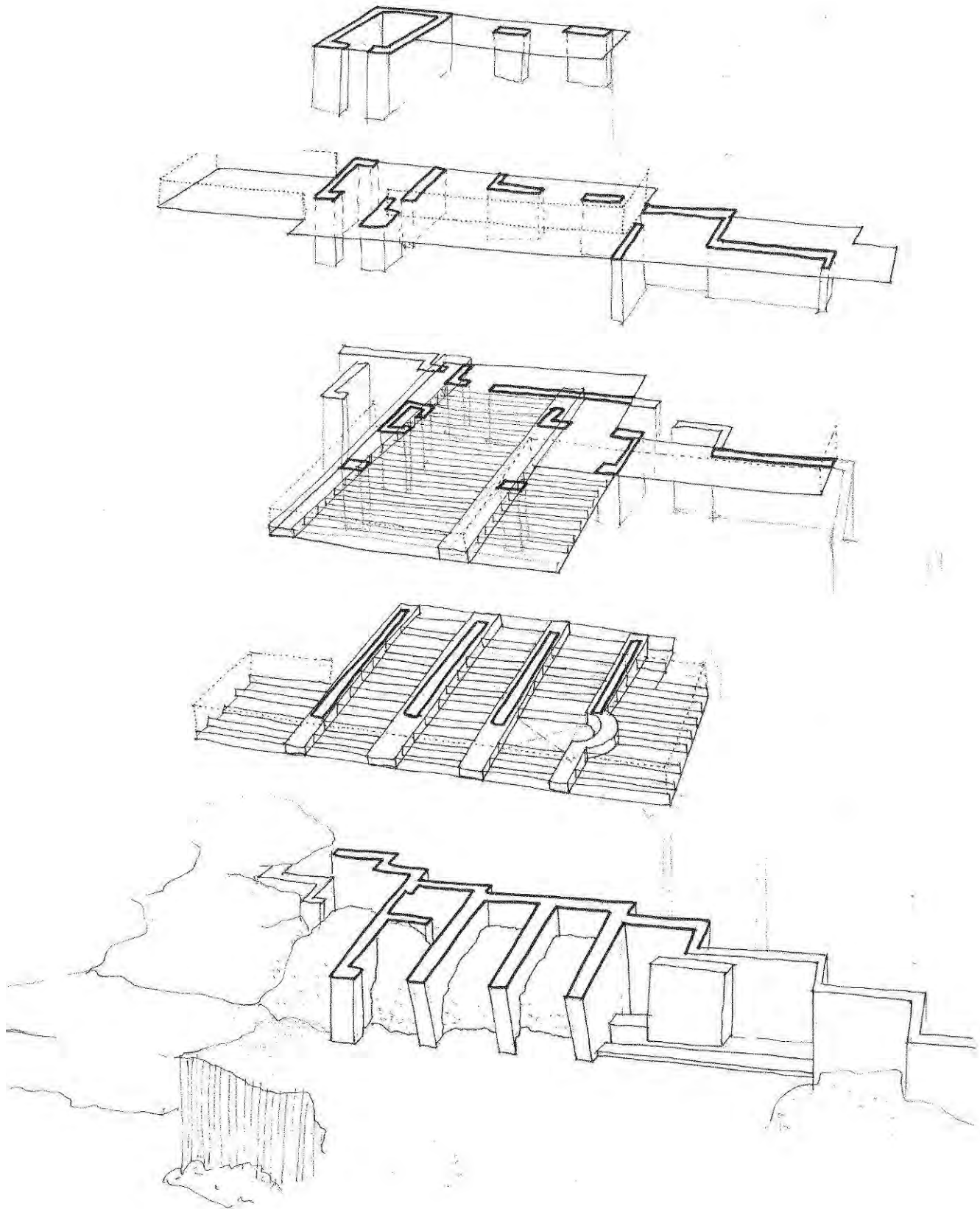
**Fig. 2.3.5** Sección de la casa Andrew Porter, donde las plantas superiores se proyectan en voladizo sobre las inferiores. No hay detalles al respecto, pero parece que Wright proponía resolverlo mediante una estructura de madera convencional.



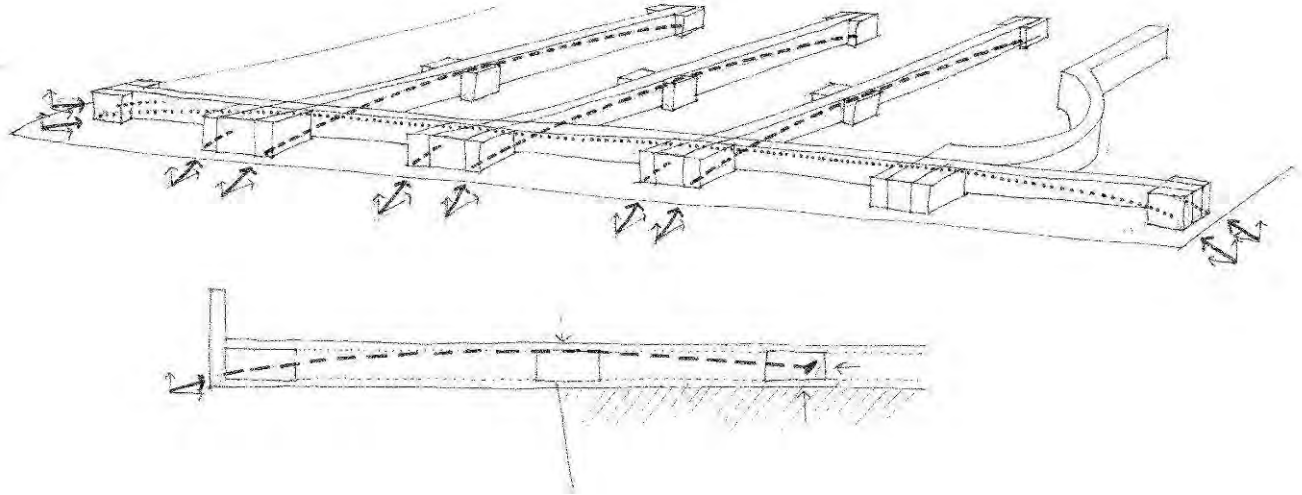
**Fig. 2.3.6** Imagen de la casa Rose Pauson después del incendio sufrido. Únicamente perduran los contrafuertes y soportes de mampostería.



**Fig. 2.3.7** Encofrados de los voladizos de la Casa de la Cascada, donde se aprecia la aparatosidad del sistema constructivo debido a la utilización del hormigón “in situ”.

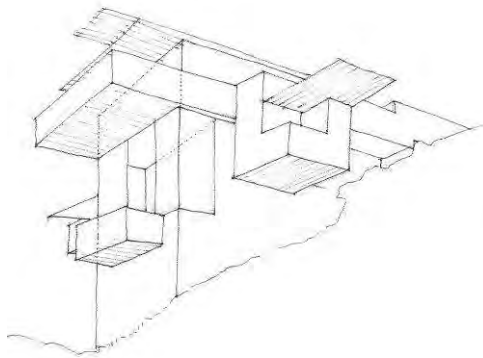


**Fig. 2.3.8** Esquema estructural de la casa de la Cascada.

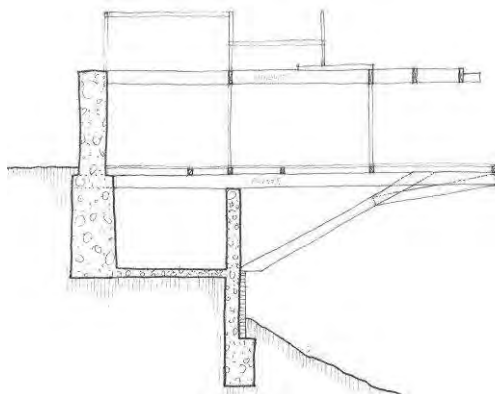


**Fig. 2.3.9** Reparación de las vigas en voladizo de la Casa de la Cascada, mediante un sistema de postensado externo, embebido en el espesor de las vigas de la gran terraza.

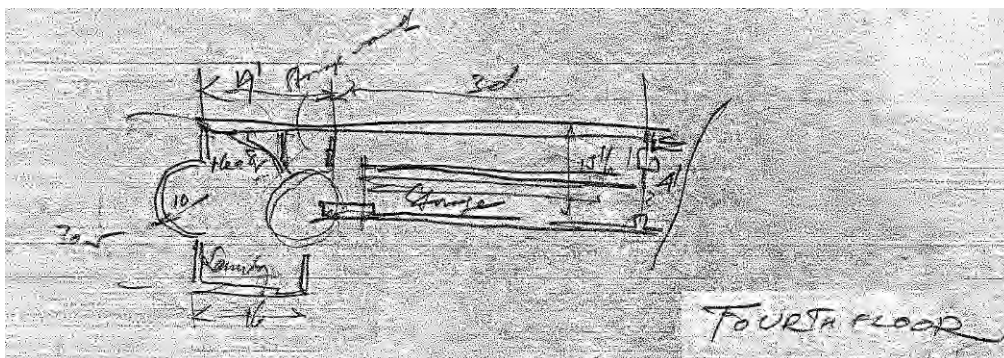
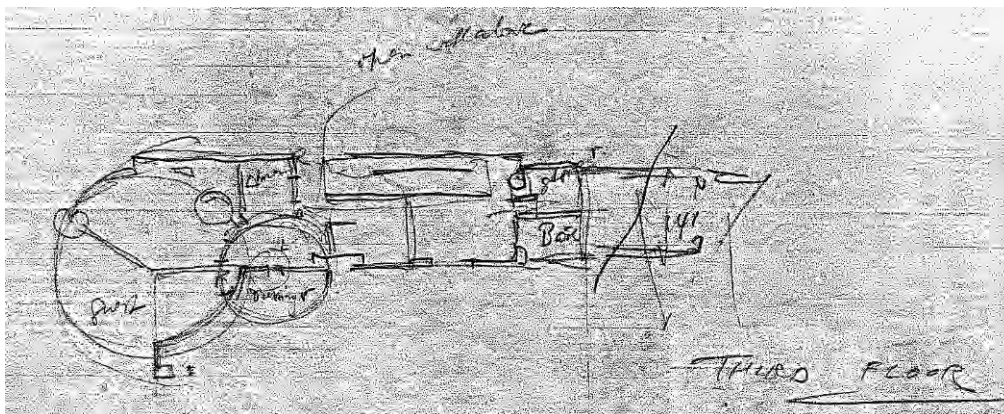
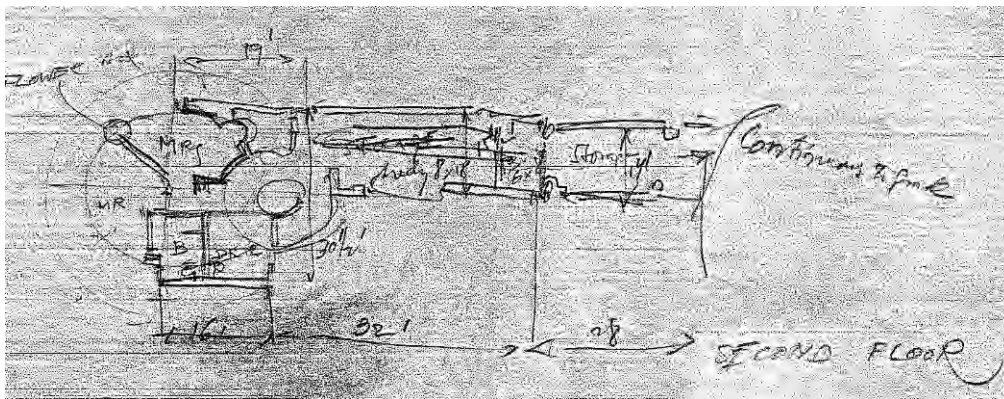
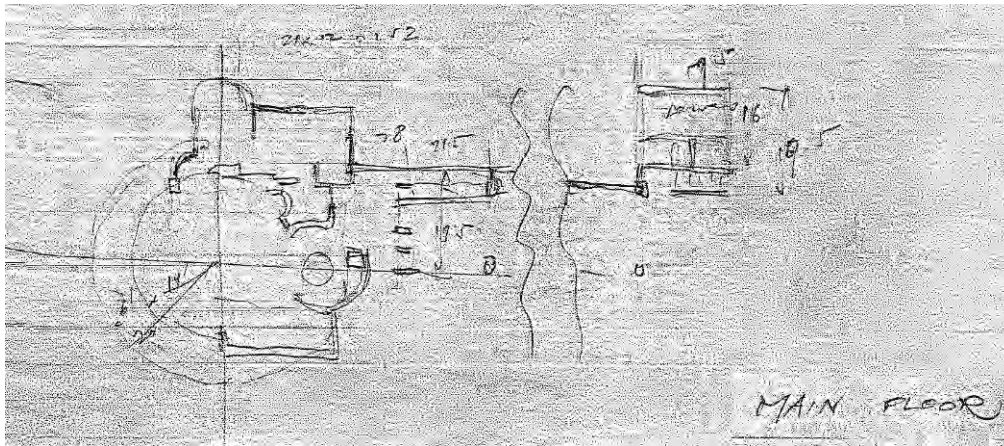
Las cargas equivalentes del trazado de los cables actúan como un apoyo ficticio en la punta del voladizo, comprimiendo además toda la sección de las vigas y mejorando su comportamiento a flexión y cortante así como su durabilidad.



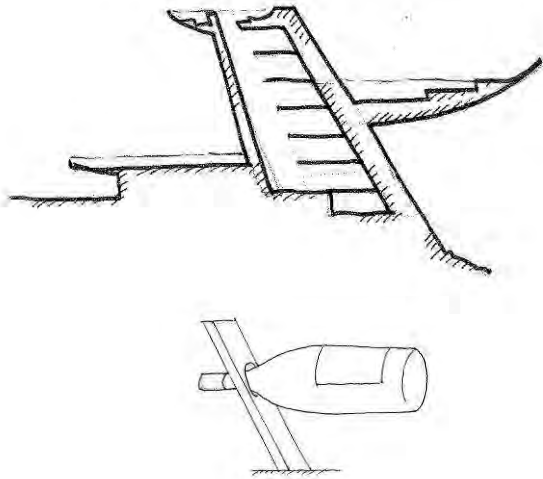
**Fig. 2.3.10** Volumetría de All Steel Houses, compuesta también a través de voladizos salientes desde un cuerpo principal, pero en este caso planteados mediante una estructura de acero.



**Fig. 2.3.11** Sección de la estructura de la casa George Sturges, planteada mediante vigas de madera y tornapuntas inferiores. El potente macizo de hormigón y mampostería posterior actúa como contrapeso al voladizo.



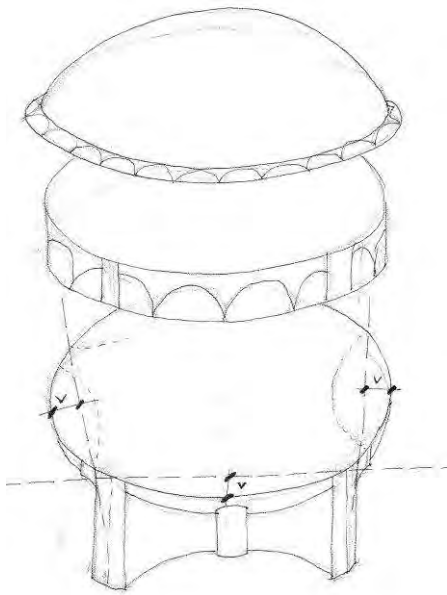
**Fig. 2.3.12-15** Croquis realizados por J.J. Polivka de la casa Morris, en una primera aproximación al esquema estructural del edificio.



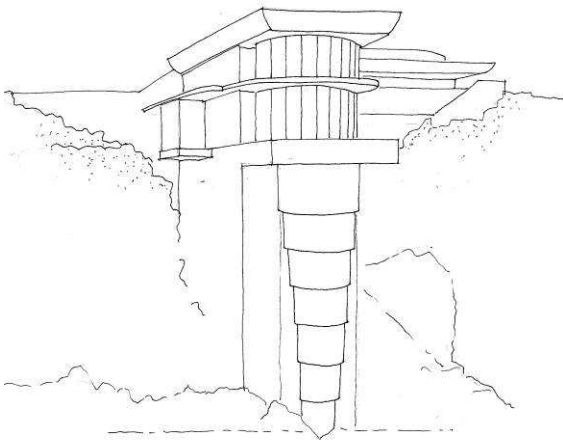
**Fig. 2.3.16** El modelo estructural del club Club Huntington Hartford está basado en el equilibrio de cargas respecto al centro de gravedad del apoyo, en este caso el centro del triángulo equilátero que forma el mástil desde el que se proyectan tres balcones.

Objetos cotidianos, como este botellero, también se basan en el mismo principio de equilibrio.

La configuración del voladizo, con forma de casquete esférico, favorece su comportamiento frente a las tensiones de compresión.



**Fig. 2.3.17** Esquema de la estructura de la Iglesia Ortodoxa. En la base la rigidez del casquete de esfera otorga la rigidez suficiente como para proyectarse en voladizo, en esta ocasión respecto a la línea secante que une los cuatro cuadrantes.



**Fig. 2.3.18** Casa Morris, que se proyecta en voladizo desde el acantilado. La formalización de los voladizos del volumen principal recuerda a los del edificio Monitor, del Guggenheim.

La colaboración con Polivka puede hacerse patente también a través de las diferentes propuestas de utilización del hormigón, bien sea encofrado o gunitado.

### *Clasificación de obras VOLADIZOS*

<b>OBRA</b>		<b>ESTRUCTURA</b>	<b>COMENTARIOS</b>
House and Stables for William H. Winslow. River Forest, Illinois. 1893	Construido	TRADICIONAL	Casas de la pradera, cubierta en voladizo. Primeras manifestaciones de la estructura (cubierta) como elemento generador del espacio.
Poultry House and Stables for Eduard C Waller. River Forest, Illinois. 1901	Proyecto	TRADICIONAL	Detalles constructivos de la solución del voladizo típico de las casas de la pradera. Detalle constructivo de pináculo: recuerda a la torre de la milla, pero a otra escala.
House for Frank Thomas. Oak Park, Illinois. 1901	Construido	TRADICIONAL	Casas de la pradera, cubierta en voladizo. Detalles constructivos del voladizo de la cubierta.
House for F.B. Henderson. Elmhurst, Illinois. 1901	Construido	TRADICIONAL	Casas de la pradera, cubierta en voladizo. Detalles constructivos del voladizo de la cubierta.
House for P.d. Hoyt. Geneva, Illinois. 1906	Construido	TRADICIONAL	Casas de la pradera, cubierta en voladizo. Detalles constructivos del voladizo de la cubierta.
House for Frederik C. Robie. Chicago Illinois. 1906	Construido	TRADICIONAL	Casa de la Pradera con uno de los voladizos mayores de esta tipología.
House for E.E. Boynton. Rochester, New York. 1908	Construido	TRADICIONAL	Una de la últimas casas de la Pradera, con voladizos importantes de la magnitud de la casa Robie.

OBRA		ESTRUCTURA	COMENTARIOS
Houses for Andrew Porter, scheme 1-2. Hillside, Spring Green, Wisconsin. 1911	Construido	TRADICIONAL	Primer ejemplo de edificio en voladizo, no sólo la cubierta. La estructura parece resuelta mediante un sistema de vigas de madera.
Lake Tahoe Resort. Lago Tahoe, California. 1922	Proyecto	MADERA	Sigue el esquema del proyecto anterior, con las plantas superiores que surgen tímidamente en voladizo respecto al zócalo de apoyo sobre el terreno.
Fallingwater house for E.J. Kaufmann. Bear Run, Pensilvania. 1935	Construido	HORMIGÓN	Las terrazas se proyectan en voladizo, deslizándose unas sobre otras. Para resolver el voladizo utiliza unas jácenas en forma de "T" invertida, que quedan ocultas en una cámara bajo el pavimento de las terrazas.
All Steel Houses. Los Angeles, California. 1938	Proyecto	ACERO	Casas con voladizos de gran tamaño. Estructura metálica prefabricada con chapa y perfiles.
Monona Terrace Civic Center. Madison, Wisconsin. 1938	Proyecto	HORMIGÓN	Gran plaza circular en voladizo desarrollado mediante una estructura de hormigón.
House for George Sturges. Brentwood Heights, Los Angeles, California. 1939	Construido	MADERA	Cuerpo en voladizo sobre una ladera inclinada. Detalle constructivo del voladizo, posiblemente resuelto mediante una estructura de madera.
Rose Pauson House. Phoenix, Arizona. 1939	Construido	ACERO	Edificio en voladizo resuelto con una estructura de acero, que queda completamente oculta por un cerramiento de madera. Las vigas en voladizo se anclan en machones de hormigón y mampostería, igual que el la casa de la cascada. Estos machones son lo único que quedó después del incendio de 1979.
House for John C. Pew. Shorewood Hills, Madison, Wisconsin. 1940	Proyecto	HORMIGÓN	Vivienda unifamiliar muy parecida a la Casa de la Cascada
Arch Oboler House. "Eagle Feather" California. 1940	Proyecto	ACERO	Vivienda planteada como un potente voladizo soportado por un contrafuerte de la ladera.

OBRA		ESTRUCTURA	COMENTARIOS
Adelman Laundry for Benjamin Adelman. Milwaukee, Wisconsin. 1945	Proyecto	HORMIGÓN	Nave redondeada en los extremos con un voladizo circular en uno de ellos. El planteamiento del voladizo es como el de uno de los módulos dendriformes del edificio Johnson.
Ayn Rand House. Hollywood, California. 1947	Proyecto	ACERO	Vivienda con voladizos proyectados a partir de unos contrafuertes en la ladera.
Play Resort and Sports Club for Huntington Hartford. Hollywood, California. 1947	Proyecto	HORMIGÓN	Tres grandes terrazas circulares voladas desde un núcleo central triangular, sobre una ladera en pendiente. En la sección se puede ver la forma inclinada del núcleo para contrapesar los voladizos.
The Morris House. San Francisco, California. 1949	Proyecto	HORMIGÓN	Casa en voladizo adosada a un acantilado. La estructura de hormigón fue resuelta por Polivka, que propuso utilizar unos paneles aislantes gunitados con hormigón.
Point View Apartment Tower. Pittsburgh, Pennsylvania. 1953	Proyecto	HORMIGÓN	Edificio de apartamentos que siguen un esquema a partir de voladizos. Sistema de muros y contrafuertes de la ladera desde los que surgen las plantas en voladizo.
Monona Terrace Civic Center #2. Madison, Wisconsin. 1954	Proyecto	HORMIGÓN	Segunda versión. Mantiene los grandes voladizos sobre el lago. En el perímetro utiliza arcos "mariposa" igual que en los puentes.
Annunciation Greek Orthodox Church. Wauwatosa, Wisconsin. 1956	Construido	HORMIGÓN	El voladizo surge al apoyar la planta circular sobre los cuatro cuadrantes. La forma de casquete esférico de la cara inferior de la planta, le otorga rigidez suficiente como para resolver el vuelo.
Marin Country Civic Center. San Rafael, California. 1957	Construido	HORMIGÓN	En este proyecto Wright utiliza el repertorio de soluciones en voladizo mediante hormigón, análogas a los arcos de "mariposa" o a la iglesia ortodoxa.



OBRA		ESTRUCTURA	COMENTARIOS
Central building of post and telegraph. Bagdad, Irak. 1957	Proyecto	HORMIGÓN	El esquema en planta es como el del edificio Larkin, con un patio central. En sección, unos forjados se proyectan sobre otros con prominentes voladizos que matizan la relación interior - exterior.

## 2.4 Sistemas de columnas dendriformes

El esfuerzo de Wright por huir del entramado estructural clásico, desarrollado en Chicago a finales del siglo XIX, paradójicamente se funde con las propuestas desarrolladas a partir de una pauta evidente. Bajo la filosofía usoniana de estandarizar subyace una retícula sobre la que se modulan y ordenan todos los elementos constructivos. Este recurso, más bien constructivo que compositivo, en algunos edificios aumenta de escala y se vuelve fácilmente identificable, dejando de manifiesto que para Wright no es lo mismo ajustarse a una malla (o contener el edificio dentro de una retícula) que generarlo a partir de la repetición de ciertos elementos pautados. Scully lo ilustra de manera muy clara:

*“La intención que animó toda existencia fue la de conformar la vida humana en patrones rítmicos que para él eran a la vez poéticos, y dar cuerpo a esos patrones en edificios que, en cada caso, constituyeran por sí mismos obras poéticas específicas y únicas”<sup>84</sup>*

Este párrafo parece que sea una alusión directa al edificio administrativo Johnson and Son Co. donde la pauta de la columna dendriforme no limita sino que expande el carácter del espacio interior [Fig. 2.4.1]. Este edificio, al igual que la Casa de la Cascada del grupo anterior, supone el comienzo de una nueva etapa, la del encuentro de la simbiosis entre el espacio, la estructura y el material. La facilidad de moldear el hormigón permitió la generación de formas curvas con cierta facilidad, para Wright más acordes con la geometría de la naturaleza.

El origen de este modelo se remonta al edificio comercial Stohr Arcade [Fig. 2.4.2], construido en Chicago en 1909. En este ejemplo no puede identificarse un patrón tan claro como en el edificio Johnson, pero sí parece que la estructura interior estaba generada a partir de la repetición de un módulo. El espacio interior quedaba todavía a medio camino entre los esquemas 1 y 2 [Fig. 2.4.1], pero el concepto de sala hipóstila delimitada por unas fachadas no portantes era el mismo que en el edificio Johnson u otros ejemplos similares. Para esta primera muestra de la serie se propuso una estructura de cubierta mediante una losa de hormigón armado, seguramente aprovechando la experiencia con este material adquirida en la Iglesia Unitaria. El interés de este caso no es tanto el resultado visto de forma independiente, sino la posterior evolución del esquema, que desencadenó uno de los edificios más famosos de Wright.

Más de dos décadas después, en 1931, Wright intentó repetir, en el proyecto del edificio de oficinas para el Capitol Journal, una disposición similar claramente mejorada y mucho más próxima a la futura materialización del edificio Johnson, aunque con un desarrollo funcional no tan elaborado. La diferencia fundamental con el edificio de 1909 es que en este nuevo ejemplo el espacio ya no estaba definido por un sistema de vigas y pilares (“*post and beam*”) siguiendo un patrón determinado, sino por la repetición, adición, de módulos o unidades que por sí solas ya definían un espacio. Su reiteración otorga una nueva cualidad espacial al entorno que queda configurado claramente según el esquema 2. Tanto en planta

---

<sup>84</sup> SCULLY, Vincent. “*Frank Lloyd Wright*” 1960. Pág. 7

como en sección se pueden identificar las columnas ya como un elemento independiente. Las fachadas de chapa y vidrio se separaron de la estructura, actuando sólo como mamparas que delimitan el espacio interior. Las columnas se propuso realizarlas mediante un cilindro de hormigón armado que nacía con una base muy estrecha, ensanchándose según aumentaba la altura de la columna. El modelo estructural puede asimilarse a una articulación en la base y un nudo rígido en la coronación de la columna. En este ejemplo los soportes quedaban estabilizados entre ellos a través de la losa de hormigón de la cubierta, ya que la entrada de luz hacia el interior, a diferencia del edificio Johnson, se realizó a través de un lucernario ajardinado en el centro de la planta [Fig. 2.4.3]. La estabilidad horizontal del conjunto quedaba garantizada por el empotramiento de las columnas con el techo, a través de la forma de capitel circular. Debido a que no se llegó a construir, no hay demasiadas especificaciones sobre la materialización de los detalles, aunque se presupone que hubiesen sido similares a los desarrollados para el edificio construido en Racine cinco años después.

H.R. Hitchcock expuso la similitud entre el comportamiento<sup>85</sup> de las columnas dendriformes y la estabilidad de una bandeja sobre la mano de un camarero, donde el centro de gravedad de las cargas que actúan pasa exactamente por la mano del camarero o la base de la columna. En el caso de una sola columna con su capitel, al que Wright llamó “pétalo”, la estabilidad horizontal del conjunto quedaba condicionada a la aparición de fuerzas horizontales, ya que la articulación en la base resultaba ser incapaz por sí sola de afrontar el vuelco debido a este tipo de acciones. Los ajustes de posición que puede realizar la mano del camarero para mantener siempre el centro de gravedad en el mismo punto, en el caso de las columnas no son posibles por lo que necesariamente debía haber algún mecanismo que, por un lado, afianzase el equilibrio del sistema y por otro le permitiese afrontar otro tipo de acciones horizontales como el viento. De este modo, la agrupación de varias unidades [Fig. 2.4.4] relacionadas entre sí permite la generación de un pórtico cuya estabilidad horizontal depende no del enlace de la base, sino del grado de empotramiento entre el pilar y el pétalo o capitel. Todo depende de la indeformabilidad de la unión entre el pétalo y el tallo, a través de cáliz. Es un modelo de estabilidad similar al del arco triarticulado (rótulas en los arranques y la clave), asumido como un modelo canónico en muchos tipos de estructuras. En el edificio para el Capitol Journal, la relación entre columnas se realizó mediante la losa de hormigón de cubierta, quedando de esta manera todas las columnas unidas entre ellas por franjas de diferentes alturas. Una primera franja perimetral, de altura inferior, formaba un anillo de ocho módulos (longitud total de la fachada), de manera que por el efecto laminar del conjunto se conseguía la estabilidad en ambas direcciones. En un segundo anillo de seis por seis columnas, con mayor altura, éstas quedaban unidas de dos en dos en sentido perpendicular a la fachada, consiguiendo también su estabilidad gracias al efecto laminar del conjunto. En el centro de la planta da la sensación de que no existe la losa de cubierta, para permitir la entrada de luz, quedando los capiteles de la cubierta aislados. En este caso, simplemente al conectarse de manera tangente entre ellos, su estabilidad queda garantizada por la del resto del conjunto.

---

<sup>85</sup> HITCHCOCK, H.R. “*Frank Lloyd Wright y la tradición académica de principios de la década de 1890*”

Esta misma situación se produjo en el edificio administrativo Johnson, con la diferencia de que en este segundo caso el área de capiteles sin la losa de cubierta era bastante mayor. No obstante los mecanismos para conseguir la estabilidad del conjunto eran los mismos: mediante la conexión con pequeñas barras en los cuatro cuadrantes de los capiteles circulares se conseguía estabilizar las unidades interiores, a través de las cuales entra la luz, con el conjunto de columnas del anillo exterior, que sí que quedaban unidas monolíticamente mediante la losa de cubierta.

En ambos proyectos el papel de las fachadas es meramente delimitador del espacio interior, sin ninguna función estructural. En el edificio Johnson, Wright enfatiza este aspecto a través del lucernario continuo perimetral, realizado con tubo de pìrex, que desconectaba todo el desarrollo de las fachadas, del conjunto de cubierta, manifestando de este modo la pérdida de su función estructural.

Entrando en el detalle de la solución adoptada en la Johnson Wax, la articulación de la base de las columnas se materializó mediante una pieza metálica con forma de pirámide invertida. Para enfatizar el carácter de apoyo sobre el vértice, las aristas de la pirámide se acompañaron con rigidizadores simétricos que se apoyaban en una base también de acero. El estrangulamiento de esta pieza impide que se realice cualquier transmisión de momentos de flexión, por lo que se produce el mecanismo de rótula buscado. Con este recurso de carácter estructural utilizado por Wright se consigue enfatizar la ligereza de la cubierta, pareciendo que los pilares “levitan” sobre su base. La disminución del ancho de los pilares en la parte inferior, que queda en 23cm, se agudiza también este efecto. Cada uno de los pétalos tiene un diámetro de 19 pies [5,79m] y se previó su vuelco mediante la conexión tangencial entre los nenúfares adyacentes en los cuatro cuadrantes. El sistema es efectivamente una trama continua multisoporte en las dos direcciones por lo que la ausencia de momento flector en la base permite la instalación de una rótula en el pie de cada soporte [Fig. 2.4.6]. Una vez más, Wright y sus ingenieros Peters y Glickman fueron al límite, desde el encofrado de las columnas con sus complejas formas, la utilización de la resistencia temprana del hormigón y la aplicación de un sistema interno de vibración hasta al bombeo del hormigón recién vertido donde fuese necesario. Este método de construcción sin precedentes simplificó la solución de forma global y facilitó un estrecho seguimiento de cada lote de hormigón. La forma exacta fue el resultado de utilizar encofrados de chapa de acero soldada y el hormigón armado se reforzó mediante una malla de metal desplegado (deployé). Hay que señalar que nada de esto hubiese sido posible sin el ensayo de un prototipo hecho “in situ”.

Sin embargo, ésta no fue la única innovación pionera que se realizó en el Johnson Administration Building. También la aplicación de los tubos de vidrio pìrex en el perímetro del edificio, de manera que se enfatizó más aún la condición de mamparas no estructurales de las fachadas. En este caso Wright defendía que los tubos no estaban apilados uno sobre otro como ladrillos, sino que formaban un tejido monolítico, trabado desde el interior con unos anillos.

En sentido metafórico, el tejido estaba reforzado por tubos huecos de vidrio, que son la antítesis de las barras de refuerzo de acero. Esta franja de vidrio ayuda a desmaterializar el edificio desde el exterior por la noche, cuando la luz interior se

refleja en ella. Al contrario, durante el día, la desmaterialización se hace patente desde el interior, difuminando la entrada de luz.

Jonathan Lipman<sup>86</sup> describe la estructura de forma conceptual en este sentido: *“Wright llamó columnas dendriformes – con forma de árbol – donde la forma botánica presta su nombre a tres de sus cuatro partes: tallo, pétalo y cáliz. La base de cada columna es de siete pulgadas de altura [17,78cm] con tres acanaladuras, llamadas pata de cuervo. En el resto de la longitud, en el tallo, tiene 9 pulgadas [22,86cm] de diámetro en la parte inferior, y su anchura crece a razón de 2,5° respecto al eje vertical. Las columnas más altas son en su mayoría huecas y las paredes tienen solamente 3,5 pulgadas [8,89cm] de espesor. La parte superior es un amplio hueco rodeado por una banda, al cual Wright se refiere como el cáliz. En el apoyo del cáliz, un hueco de 12,5 pulgadas [31,75cm] de espesor, que Wright lo llamó pétalo. Dos nervios radiales de hormigón discurren en su interior. Ambos, tallo y cáliz, están reforzados con una malla de acero y el pétalo está reforzado con malla y barras de acero.”*

A partir de esta base, la columna se planteó de sección circular maciza hasta un cierto nivel, según se tratase de una columna del espacio principal o del lobby. En el interior de la sala de trabajo, donde se aprecia la mayor dimensión de altura, el macizado de la columna es de aproximadamente dos tercios de su altura total, o sea de 6,7m respecto a los 9,5m totales. En el caso de las zonas con varios niveles, el macizado termina en la unión con el primer nivel, a 2,7m de altura. El sentido estructural de estos dos casos diferentes es simplemente el de otorgar mayor rigidez a los pilares más esbeltos, para controlar así los efectos del pandeo. En el tercio superior, antes de la entrega con el capitel circular, la columna (tallo) pasa a ser hueca, ensanchándose de nuevo en su parte superior (cáliz) para dar lugar al capitel (pétalo). La lámina que forma el pétalo, de 5,6m de diámetro, es de un espesor considerablemente reducido, de 16cm a 7cm, como las paredes del fuste del pilar hueco, y se completa por la cara superior mediante dos mamparas circulares concéntricas y, supuestamente, por lo menos cuatro mamparas radiales que rigidizan el conjunto. El concepto resistente es el mismo que el de las hojas flotantes de los nenúfares gigantes, que con un espesor francamente mínimo pueden soportar el peso de una persona gracias a los nervios que refuerzan el plano de la hoja [Fig. 2.4.7].

Este es el mejor ejemplo de esta tipología y uno de los edificios construidos por Wright de mayor relevancia en la historia de la arquitectura moderna, en parte debido al papel de la estructura del conjunto. Dentro de la propia obra de Wright, el intento de repetir este acierto se sucedió a diferentes escalas en varias ocasiones posteriores a la construcción del edificio Johnson, aunque en ningún otro caso se llegaron a construir. Seis años más tarde, en 1942, Wright propuso, en el proyecto de la fábrica Pittsfield Defense Plant, un planteamiento estructural similar para un edificio de dimensiones considerables. Hay que señalar que en los dibujos de la planta realizados en Taliesin subyacía una malla organizadora de aproximadamente 7,62m x 7,62m, sobre la que se moduló el edificio que, lejos de limitar las posibilidades espaciales, como se ha insistido ya en relación a otros

---

<sup>86</sup> LIPMAN, Jonathan *“Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings”*

aspectos, la retícula no se planteó como un entramado estructural tipo “jaula” sino como una pauta ordenadora de los sistemas constructivos y estructurales, con la intención de facilitar y sistematizar la construcción, como cualquier tipo de arquitectura razonable. Como se ha explicado al inicio del capítulo, el eje del pilar se situó en cada uno de los vértices de la trama, de manera que en lugar de delimitar el espacio entre las doce aristas de un paralelepípedo, este se configura a partir de la suma del espacio alrededor de la columna [Fig 2.4.1]. Este mecanismo de generación del espacio a través del planteamiento de la estructura no tiene limitaciones dimensionales y, en el caso de esta fábrica, el tamaño del espacio de trabajo en planta resultó ser de dimensiones considerables, 358m x 84m. La fachada se resolvió mediante el escalonamiento de la cubierta dividiendo la altura de 9,50m del interior de la nave en tres niveles, para dar lugar a unas áreas de descanso perimetrales. En este ejemplo, las fachadas sin función estructural dentro del conjunto, albergan un uso secundario, desde donde se puede disfrutar de la vista sobre los bosques de fondo, al mismo tiempo que aíslan el espacio de trabajo del exterior. Esta es la misma intención que se insinuaba en el edificio Larkin de 1903 [Fig. 2.4.9].

En la propuesta de 1955 para un centro comercial en El Salvador, el modelo de columna formada por tallo, cáliz y pétalo volvió a repetirse. Las dimensiones y proporciones del edificio eran similares a las del Capitol Journal, aunque en esta ocasión con dos niveles superpuestos. En el nivel inferior, destinado a almacén, las columnas resultaron ser más convencionales, de sección circular constante, y entregadas a la losa del forjado mediante un capitel troncocónico. En el nivel superior, la planta noble, las columnas eran del mismo tipo que en los ejemplos anteriores, articuladas en la base y con una sección que aumenta con la altura hasta llegar al capitel o cáliz y la coronación. Las fachadas, de igual modo, no tenían función estructural alguna y en este caso se protegieron del sol mediante un brise-soleil horizontal con grandes perforaciones circulares. Este voladizo, sin entrar en una valoración formal, es de dudoso comportamiento estructural debido a que, en el caso de ser una extensión de la estructura principal – columnas dendriformes – resultaba ser de una dimensión excesiva ya que su extremo quedaba a unos seis metros de los apoyos. Suponiendo que el voladizo se apoye en las fachadas y se equilibre hacia el interior a través de la continuidad con la parte superior de las columnas, en este caso el esquema tan claro de los ejemplos anteriores quedaría distorsionado. En cualquier caso, se trata de una propuesta sin desarrollar, que de haberlo sido, posiblemente habría clarificado este aspecto. Algunas propuestas de Bagdad, como el edificio del Central Post & Telegraph en 1957, aunque en ellas Wright no utilizó el modelo de columna dendriforme tal como aparece en este proyecto, tienen cierta relación en cuanto a los mecanismos de definición del espacio a través de la estructura, siempre siguiendo el concepto de los esquemas 1 y 2 antes explicados [Fig. 2.4.1].

Ese mismo año, 1955, Wright propuso de nuevo el mismo sistema estructural para el edificio de la compañía eléctrica Lenkurt en San Mateo, California, de nuevo en un conjunto de grandes dimensiones. Suponiendo un módulo de tamaño similar al de los ejemplos anteriores, el edificio podría tener unas dimensiones de unos 170m x 98m. No es tan relevante la magnitud del edificio sino la capacidad de expandirse en horizontal en función de las necesidades. El mecanismo de propagación

estructural funcionó por adición, de manera que podría haberse prolongarse hasta el infinito. Este concepto va íntimamente ligado al espíritu americano de ocupación del territorio y se manifiesta en todos los proyectos de Wright a siempre través de la retícula pautada que ha servido como base para todo tipo de estrategias constructivas, bien con la repetición del módulo dendriforme, como es el caso, o bien mediante la generación del “tejido” constructivo del sistema “*block*” o de las casas usonianas. A la escala en la que se sitúa este edificio, Wright era plenamente consciente de ello y por eso situó el aparcamiento bajo el espacio de trabajo, en un nivel semienterrado, de manera que a través de los múltiples núcleos de escaleras y ascensores que conectan ambos niveles, los trabajadores pudieran aparcar el coche bajo su puesto de trabajo sin necesidad de recorrer todo el edificio.

En el detalle de las columnas del edificio, éstas atravesaban el primer nivel - suelo de la nave - para convertirse en el techo de la misma, donde se formó los lucernarios entre los círculos, cubiertos mediante pináculos generados a partir de la superposición de tubos de pirex. Esta forma de “pagoda” aparecía también en alguno de los proyectos de Bagdad donde Wright aprovechó la capacidad difractora del tubo de pirex para crear un filtro de entrada de luz directa, como fue el caso de la Galería de Arte o el edificio central de Correos y Telégrafos.

Hay otros proyectos, como el Centro Cívico Point Park de Pittsburgh en 1947, donde en la sección apareció también la columna dendriforme así como el mecanismo de repetición del módulo, en este caso en forma de matriz polar en lugar de rectangular. En la planta baja, nexo entre los aparcamientos del sótano y la gran rampa de los niveles superiores, era donde este tipo de columnas formaban la fachada interior del gran espacio central. La versatilidad del sistema resultaba fácilmente combinable con la geometría general del edificio, en esta ocasión circular.

Cuando el módulo de la columna dendriforme adquirió dimensiones considerables, evolucionó de manera natural hacia los arcos de mariposa [Fig. 2.2.13], utilizados por ejemplo en la segunda propuesta para el Centro Cívico a orillas del lago Monona, en 1954. Aunque la formalización de la columna y capitel era diferente por razones estructurales debido a su mayor dimensión, en concepto seguía el mismo criterio que el del esquema 2. Este tipo de formalización de la estructura, con pilares de forma romboidal soportando voladizos en los extremos de la secuencia, se puede observar por ejemplo, a una escala más doméstica, en los proyectos de la Universidad de Florida [Fig.2.4.10].

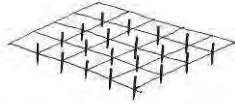
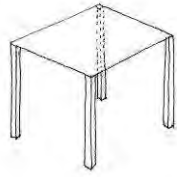
El Capitol Journal y el edificio administrativo Johnson Wax son anteriores a 1946 y, posteriormente a este año, Wright no llegó a materializar ninguna de sus propuestas en esta línea, por lo que no hay evidencias de que Polivka hubiese participado en este tipo de proyectos.

Volviendo de nuevo a la escala doméstica, el aparcamiento de la casa para Sol Friedman, construida en Pleasantville, New York en 1948 constaba de una sola columna dendriforme como cubierta para dos coches. Esta situación manifiesta las propiedades individuales de generación del espacio de este tipo de elementos, sin necesidad de agruparse. Es uno de los mejores ejemplos en los que el elemento estrictamente estructural cubre todas las funciones arquitectónicas al mismo tiempo que el requerimiento principal de Wright de conectar el espacio interior con

el exterior [Fig. 2.4.1]. No obstante, el funcionamiento estructural del conjunto, en este caso, es radicalmente diferente ya que no es posible mejorar la estabilidad del elemento a partir de su agrupación, sino que esto debía garantizarse exclusivamente a través del empotramiento en la base del pilar.

En esta dirección, ejemplos significativos de la arquitectura contemporánea son deudores de este planteamiento. Este es el caso de la ampliación de la Estación de Atocha en Madrid, de Rafael Moneo, o las marquesinas para gasolineras de Repsol de Norman Foster. En la misma línea, es menos reciente el Palazzo del Lavoro, Turín 1961 de Pier Luigi Nervi o la Nacional Distribuidora, México D.F. 1960, de Félix Candela.

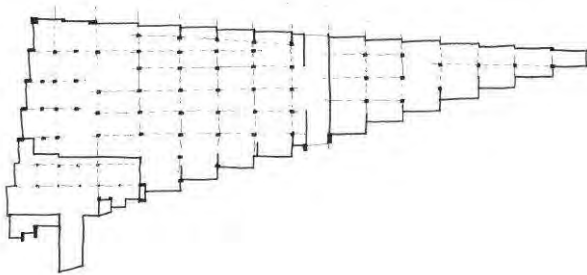




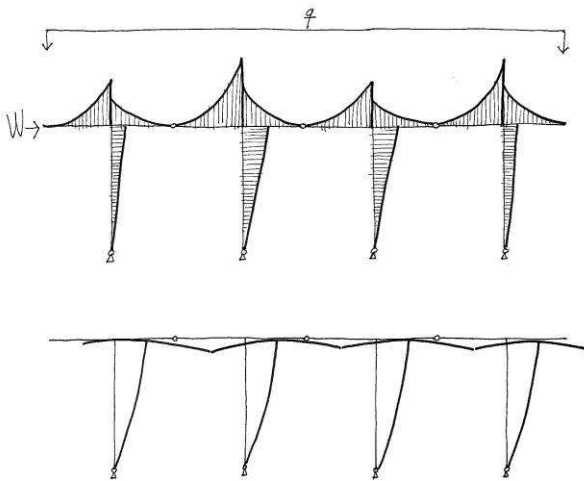
Esquema 1

Esquema 2

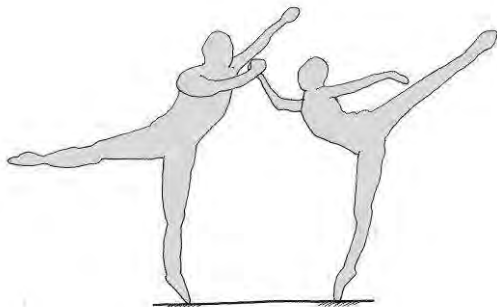
**Fig. 2.4.1** Comparación entre una estructura definida por cuatro soportes o un solo soporte central. La agrupación de estos dos modelos produce percepciones espaciales diferentes, aunque el número total de pilares sea similar.



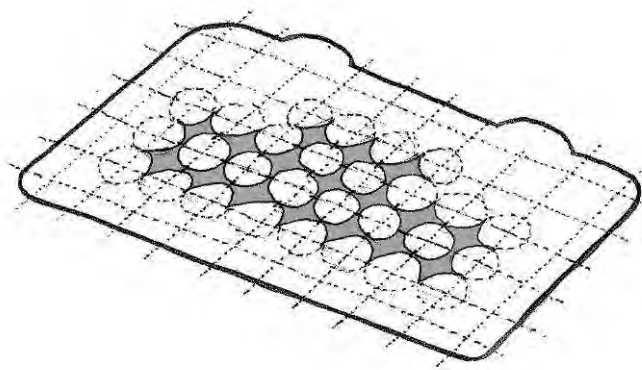
**Fig. 2.4.2** Planta del proyecto Stohr Arcade, donde la sala hipóstila interior caracteriza el espacio, aunque no de la misma manera que en el edificio administrativo de la Johnson and Son Co. o el edificio de oficinas del Capitol Journal. Es evidente que, aunque se apunta hacia ello, en este proyecto Wright no ha conseguido una claridad de organización espacial mediante la estructura tan nítida como en los proyectos posteriores.



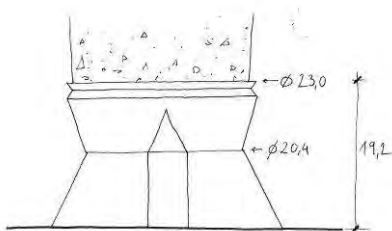
**Fig. 2.4.3** Esquema de funcionamiento estructural de un pórtico con articulaciones en la base de los pilares y en los centros de los vanos. La estabilidad se basa en la rigidez de los nudos entre pilar y viga, que en el caso de las columnas dendriformes de la Johnson, se materializa a través del capitel entre la columna y el pétalo circular.



**Fig. 2.4.4** De la misma manera, los bailarines consiguen el equilibrio a través del punto de contacto entre ellos. Los pies de puntillas únicamente son capaces de transmitir una carga vertical al suelo, no un momento de giro ni su cortante, de modo similar al que ocurre con el contacto entre las manos. La estabilidad del conjunto es debida a la agrupación de varias unidades.

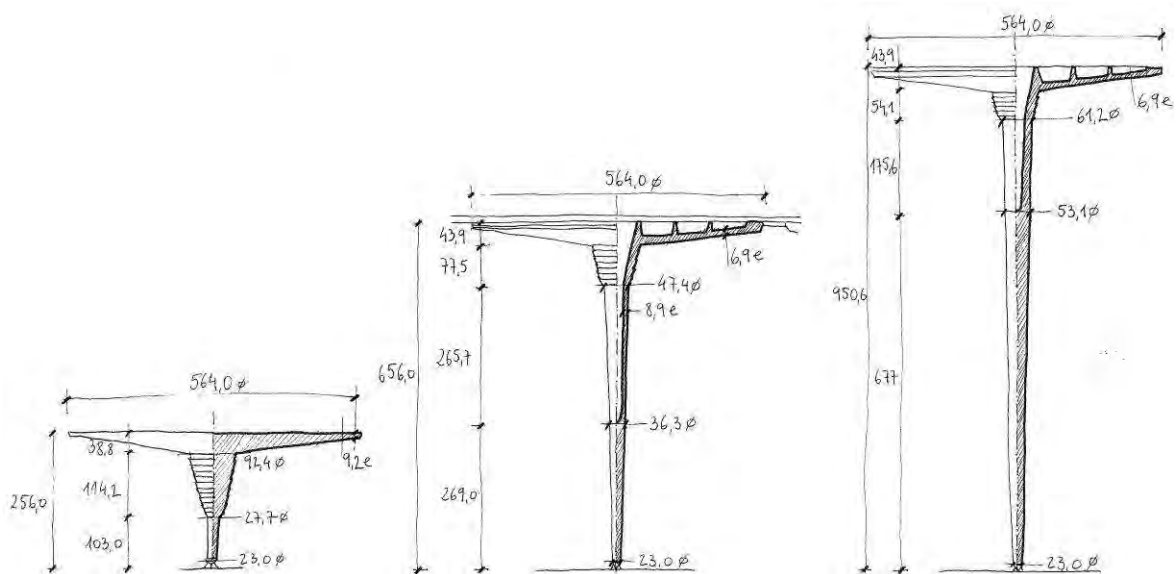


**Fig. 2.4.5** En el caso de las columnas que configuran el anillo perimetral del edificio administrativo Johnson, la unión entre ellas se realiza de una forma más rígida, a través de la losa de cubierta. Esto produce una sobre-rigidización del plano horizontal de cubierta, quedando las columnas tangentes sólo en el centro del edificio.



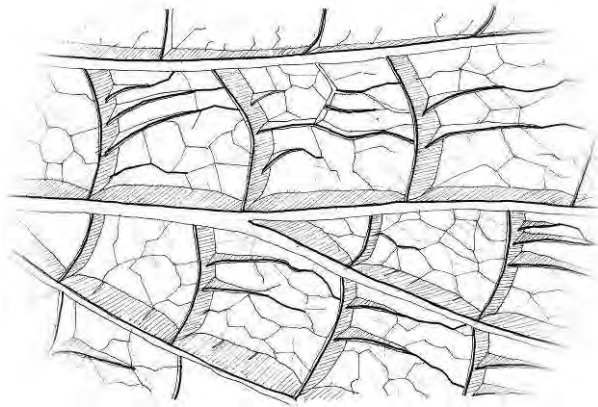
**Fig. 2.4.6** Detalle del artilugio metálico mediante el cual se materializa la articulación de la base de los pilares. El estrangulamiento de hasta 20,4cm impide la transmisión de momentos significativos de la columna a la cimentación.

(Dimensiones en cm)

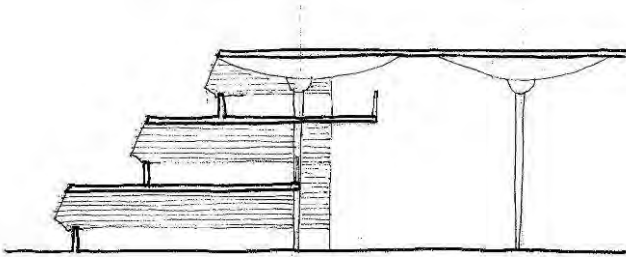


**Fig. 2.4.7** Detalle de los tres tipos de columnas del edificio administrativo Johnson and Son Co. Las columnas de menor altura corresponden a una zona de acceso, por lo que los espacios entre los círculos quedan completados mediante una losa maciza de unos 9cm de espesor. Las columnas intermedias también soportan una sobrecarga de uso, de manera que también se unen entre ellas mediante una losa, en este caso, aligeradas mediante nervaduras en la proyección de las circunferencias. Las columnas centrales del espacio principal, quedan unidas entre ellas mediante una sección de hormigón de unos 6cm de espesor, incapaz de transmitir momentos de flexión entre ellas.

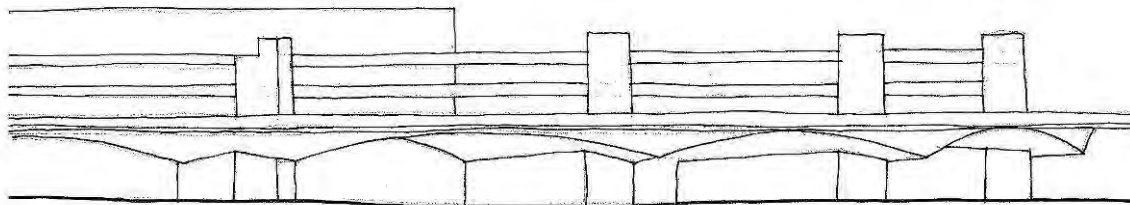
(Dimensiones en cm)



**Fig. 2.4.8** Las hojas del nenúfar gigante (Victoria Regia) son capaces de soportar pesos importantes gracias al sistema de nervios que rigidizan la superficie en varias direcciones, formando una retícula. En esta vista de la cara inferior, pueden apreciarse los nervios.



**Fig. 2.4.9** Las fachadas de la fábrica Pittsfield Defense Plant escalonan la cubierta en el perímetro y se plantean como una estructura independiente de las columnas dendriformes principales. Se utilizan como filtro y relación con el exterior.



**Fig. 2.4.10** En la propuesta del Centro Cívico Monona, Wright utiliza el mismo concepto de generación del espacio que en las propuestas anteriores. En este caso la trama, en lugar de ser rectangular es radial y, debido a las dimensiones del edificio, el sistema de columnas dendriformes se sustituye por los arcos de “mariposa”, utilizados en el puente “butterfly wings”.

**Clasificación de obras COLUMNAS DENDRIFORMES**

OBRA		ESTRUCTURA	COMENTARIOS
Stohr Arcade and Shops. Chicago Illinois. 1909	Construido	HORMIGÓN	Geometría generada a partir de la repetición de un módulo estructural. No se define en detalle el módulo, pero parece más próximo a un sistema de vigas y pilares que a las columnas dendriformes posteriores.
Capitol Journal Office Building for George Putnam. Salem, Oregon. 1931	Proyecto	HORMIGÓN	Antecesor casi idéntico del edificio administrativo Johnson. En el acceso, rampa de comunicación que apunta hacia otro de los grandes grupos (Edificios en espiral).
S.C. Johnson and Son Co., Administration Building. Racine, Wisconsin. 1936	Construido	HORMIGÓN	Es el edificio más significativo y el único construido de los formados por la repetición de columnas dendriformes.
Pittsfield Defense Plant. Pittsfield, Massachusetts. 1942	Proyecto	HORMIGÓN	Utiliza el mismo sistema de repetición de columnas dendriformes que en el edificio Johnson, pero para unas dimensiones mucho más grandes.
Freund y Cia Department Store. San Salvador, El Salvador. 1955	Proyecto	HORMIGÓN	Se utiliza el mismo esquema que en las propuestas anteriores, aunque, en este caso, el voladizo perimetral sobrepasa los límites de esta tipología.
Lenkurt Electric Company. San Mateo, California. 1955	Proyecto	HORMIGÓN	Aparentemente consigue generar una gran nave a partir de la repetición de elementos columna-voladizo. El tubo de pirex se utiliza para formar lucernarios piramidales en los espacios intersticiales entre columnas.



## 2.5 La evolución de la torre

Conceptualmente, una torre es una estructura vertical en voladizo frente al empuje horizontal del viento cuya estabilidad se consigue gracias al empotramiento en la base, que impide el vuelco. Tradicionalmente este tipo de estructuras se han resuelto de múltiples maneras, según fuese su altura. Desde principios del siglo XX la tradición americana de rascacielos ha ido en la línea de utilizar estructuras de acero, formando entramados suficientemente rígidos como para afrontar este tipo de acciones, bien arriostrando algunos pórticos o bien confiando la estabilidad únicamente a la rigidez de los pilares y los nudos con las vigas. En los países de influencia anglosajona la estructura de acero ha sido la principal herramienta a la hora de resolver el problema de la altura, evolucionando en las diferentes tipologías particulares de este tipo de estructuras, como es el caso de los núcleos arriostrados, haces de pilares, o las variaciones de tubos (grupos de pilares) dentro de tubos, complicándose exponencialmente a la altura del edificio. No se trata de hacer ahora un repaso a los modelos estructurales para edificios en altura, ya que en la actualidad las combinaciones entre acero y hormigones de alta resistencia son muy amplias y no es el objeto de este trabajo. La cuestión es que en el contexto histórico y la ubicación donde se sitúan los proyectos de Wright existían unas tipologías estructurales ya consolidadas que resolvían con eficacia el problema resistente en altura. Para Wright este sistema se enfrentaba nuevamente con los principios de su arquitectura de manera que su utilización no le resultaba demasiado satisfactoria.

El planteamiento de Wright para un rascacielos en Chicago, en 1913, fue mediante sistemas y técnicas estructurales convencionales – la trama metálica de la Escuela de Chicago – concentrando las constantes de su arquitectura únicamente en la formalización de la volumetría general del edificio, como había con propuestas anteriores<sup>87</sup>, en este caso en forma de pagoda. Sin embargo, esto no satisfacía a Wright ya que los conceptos de fluencia espacial desarrollados y conseguidos en otros edificios de menor altura no eran compatibles en este caso con el planteamiento estructural. La ubicación de los pilares en los planos de fachada, luego revestidos de mampostería cerámica y coincidiendo con las aristas del paralelepípedo, quedaban lejos de la composición en diagonal de las plantas residenciales desarrolladas en Oak Park. La intención de conectar el espacio interior con el exterior a través del despegue de la cubierta respecto a las fachadas así como la liberación de las esquinas, resultó inicialmente dificultoso aplicarlo a este tipo de edificios, por lo que Wright no se sentía cómodo.

En 1924 Wright presentó en la Exposición anual de Arquitectura de Chicago la maqueta de un rascacielos que llamó “Edificio de oficinas en San Francisco”. Es uno de los primeros edificios en altura propuesto por Wright resuelto con estructura de hormigón. [Fig. 2.5.6]

---

<sup>87</sup> Hasta 1913 Wright había realizado tres propuestas de rascacielos: el Luxfer Prism Company en 1898 [Fig. 2.5.1], el Press Building. San Francisco, California en 1912 [Fig. 2.5.2] y este rascacielos en Chicago en 1913. Todos ellos responden a un planteamiento estructural convencional, mediante un entramado de acero y la formalización de las constantes de Wright a través del lenguaje utilizado en las fachadas.

En 1923, la propuesta para un edificio comercial de vidrio, cobre y hormigón en Los Angeles (que más tarde denominó “Cantilever glass office building” – Edificio de oficinas de vidrio en voladizo) apuntó hacia una posible solución [Fig. 2.5.5]. La sección de la torre insinuaba que las losas de los forjados, de hormigón armado, se podían proyectar en voladizo más allá de la línea de soportes, generando una superficie próxima a las fachadas, pero sin ningún pilar que resultase impedimento en cuanto a la relación con el exterior. Este proyecto se contextualizó en un momento en el que Wright no tenía prácticamente trabajo así que el hecho de poder trabajar en esa propuesta y encontrar al mismo tiempo una solución a un problema general de su arquitectura suponía un gran avance para él. La idea de Wright, a diferencia de Sullivan, se basaba en el concepto de estructura y no en la formalización de un lenguaje de fachadas determinado. Este planteamiento de realizar un rascacielos con forjados de hormigón estaba en cierta manera relacionado con las propuestas de torres de Erich Mendelsohn [Fig. 2.5.4] y Mies van der Rohe [Fig. 2.5.3] desarrolladas en 1919 y 1922 respectivamente; dos propuestas utópicas, pero que conectaban directamente con la intención espacial de Wright - de hecho, en 1924 Wright y Mendelsohn se conocieron en Taliesin. Las losas en voladizo permitían a Wright liberar el espacio interior de la construcción de la caja definida por un entramado de acero. Desde un punto de vista estructural, los voladizos de estos edificios estaban relacionados con la propia naturaleza del hormigón y no con la del acero. Como resultado las fachadas no contenían ningún elemento estructural, por lo que se concibieron como una mera mampara o cortina, filtrando el sol o protegiendo el ambiente interior de las condiciones atmosféricas exteriores. La formalización de las fachadas estaba también en relación con los proyectos de las casas de California de la misma época, construidas con el sistema block, en este caso con el mismo tipo de motivos decorativos, pero a una escala mayor, y materializados en cobre y vidrio en lugar de hormigón.

Posteriormente a este proyecto, a su vuelta a Chicago, Wright realizó el proyecto del Nacional Life Insurance, que claramente consolidaba las cuestiones insinuadas en el proyecto de Los Angeles un año antes. En este nuevo caso, Wright volvió a proponer una estructura de hormigón, un grado más evolucionada, nuevamente con fachadas de cobre y vidrio. Los pilares apuntaban hacia una forma apantallada, afilada en la arista interior, solución que se repitió en proyectos posteriores<sup>88</sup> y, de la misma manera que en la propuesta anterior, las plantas se prolongaron en voladizo quedando la fachada completamente liberada de soportes. Wright concibió esta estructura en forma de árbol como un sistema de pilares y losas en voladizo. La posición de los núcleos de escaleras de emergencia, permite liberar también las esquinas, consiguiendo así el efecto diagonal tan logrado ya en su arquitectura doméstica. En cualquier caso, a pesar de la intencionalidad de Wright de asimilar la estructura de este edificio a la de un árbol, este esquema no quedó del todo claro hasta el proyecto de la St. Mark's Tower en 1929 [Fig. 2.5.7].

La propuesta de este grupo de tres torres estuvo ya completamente en sintonía con los principios de la arquitectura de Wright y, en lo que respecta a la estructura, su función formal había pasado de ser un mero soporte, como en el proyecto de 1913, a ser aquí uno de los motivos principales de su arquitectura. La estructura carecía de

---

<sup>88</sup> Campus de la Universidad del Sur de Florida 1938-1957

pilares y el soporte vertical lo formaban cuatro pantallas dispuestas en forma de cruz, coincidiendo con las divisorias entre apartamentos. Esto permitió liberar toda la superficie de cada apartamento o de fachada de cualquier soporte, favoreciendo la relación del interior con el entorno. Los forjados, de forma cuadrada, se dispusieron girados unos 30° en planta de manera alternada. De esta forma, se generaba en las plantas impares un voladizo en cada esquina resultado del giro del cuadrado, enfatizando la diagonalidad de la distribución en planta [Fig. 2.5.8]. Las dimensiones no demasiado exageradas de la torre, tanto de la planta como la altura total (18 plantas), le permitieron a Wright resolver un edificio en altura de una forma acorde a los principios de su arquitectura, como el motivo del voladizo, la utilización del hormigón o la diagonalidad de las distribuciones. Esta disposición de pantallas de soporte en cruz se repitió en todas las propuestas de torres posteriores, excepto en la torre de investigaciones de la Johnson and Son Co. expuesta más adelante.

También fue la primera vez que propuso como cimentación el sistema mediante “raíz pivotante”, que aparece en casi todos los edificios de esta tipología a partir de 1929. Este sistema de cimentación combinaba un elemento en profundidad, como pueden ser los pilotes, con una losa de cimentación. El funcionamiento del conjunto consistía en la combinación de una cimentación profunda con una superficial. Al núcleo central clavado en el terreno a modo de pilote se le confiaba la transmisión de la carga vertical del edificio al terreno. Sin embargo, en un edificio en altura, el empuje del viento resulta ser también de importante consideración, por lo que debe haber un sistema que evite el vuelco del edificio frente a esta acción horizontal. De este modo, para no penalizar el dimensionado de la clava del núcleo en el terreno, pero mejorando su empotramiento, Wright dispuso de una losa de cimentación unida al núcleo, como base del edificio, de manera que el momento de vuelco se compensa gracias a la reacción de la losa, superficialmente sobre el terreno, tal como se muestra en el esquema [Fig. 2.5.9]. Esta suposición del funcionamiento parece lógica ya que las cargas verticales suelen ser en estos casos de mayor duración y con una velocidad de aplicación lenta, por lo que requieren de un tipo de interacción entre la cimentación y el terreno que minimice las deformaciones verticales. En cambio, la carga de viento suele ser de menor duración y se aplica a mayor velocidad que las gravitatorias, por lo que la respuesta de la losa sobre el terreno puede resultar perfectamente válida. En función de la altura de las diferentes torres proyectadas por Wright, la proporción de la “raíz” y sus dimensiones en planta varían, incluso llegando a formar un sistema ciertamente complejo en la unión entre estos dos elementos.

El proyecto de tres torres junto a la iglesia de St. Mark, en Bouwerie, New York, de 1929 no sólo representó la confluencia entre la utilización de los materiales estructurales y la estructura en este tipo de edificios sino que también representó el asentamiento de las bases técnicas que posteriormente evolucionaron en otros proyectos. Atrás quedaron las propuestas de estructuras mediante entramado de acero como el Abraham Lincoln Center, el edificio Larkin o el rascacielos de Chicago, donde las ideas de Wright todavía no habían convergido en la utilización de la estructura con los materiales y los fines orgánicos de su arquitectura.



Siguiendo el mismo esquema que la St. Mark's Tower, Wright realizó posteriormente diferentes propuestas. Este es el caso de la agrupación Crystal Heights en Washinton D.C, diez años más tarde, proyecto de un complejo hotelero, apartamentos y zona de ocio y comercial. Para ello Wright concibió una agrupación de múltiples torres siguiendo el esquema anterior, pero en este caso agrupándolas de dos en dos, de manera que los voladizos enfrentados se convirtieron en un forjado entre las seis pantallas del núcleo [Fig. 2.5.8]. No hay dibujos al respecto, pero se entiende que el sistema de cimentación utilizado fue el de "raíz pivotante", en este caso duplicado, teniendo dos núcleos clavados por grupo de torres. Toda la estructura del conjunto se resolvió con hormigón armado, tanto para los núcleos como para los forjados y se pensó en un revestimiento exterior de mármol blanco con acabados de cobre.

En 1946 Wright propuso para la torre del Hotel Rogers Lacy, en Dallas, el mismo sistema de estructura. El conjunto estaba formado por una planta cuadrada con un patio central dentro del cual, de manera descentrada, se situaba la torre. La estructura del edificio perimetral, aunque no tiene demasiada altura, estaba diseñada con un sistema de núcleos centrales de hormigón y forjados en voladizo a ambos lados, de manera que no había pilares ni en la fachada exterior ni en la del patio interior. La obsesión de Wright era conseguir un mayor grado de iluminación para todos los espacios interiores por lo que, aparte de eliminar la interferencia con cualquier soporte (no hay soportes verticales excepto los núcleos), aprovechó los conocimientos de Polivka sobre el vidrio "Thermolux" cuyas propiedades entre otras eran las de proyectar la luz captada hasta el fondo de las estancias, consiguiendo así un mayor nivel de iluminación natural en las partes más alejadas de las fachadas. *El vidrio Thermolux difumina la luz y elimina el resplandor. La intensidad de luz reducida (aproximadamente un 40% tras el panel) es restituida en mayor profundidad donde, puede creerse o no, es mayor que la iluminación con vidrios transparentes.*<sup>89</sup> Hay que señalar que el grado de complejidad técnica de este edificio en todos los aspectos era ciertamente elevado, no solo en cuanto a su singular estructura o sus fachadas, sino también en cuanto al sistema de climatización y control térmico. El objetivo de Wright era conseguir el máximo confort de los usuarios del hotel en todos los sentidos [Fig. 2.5.10].

Para la torre del interior del patio, Wright utilizó el patrón inicial de la St. Mark Tower, introduciendo alguna variación como la cuña en planta que se elevó a lo largo de toda la altura de la torre, a modo de fondo de la volumetría. En la cubierta, uno de los cuadrantes se proyectó en voladizo formando una visera de hasta 10m de vuelo respecto de los apoyos.

Todos estos ejemplos, por diversos motivos no llegaron a construirse y este modelo estructural únicamente se llegó a materializar en 1952 en la torre de oficinas y apartamentos Price, en Bartlesville, Oklahoma. Retomando la misma distribución en planta que la del modelo original, en este caso Wright ubicó tres oficinas y un apartamento por planta. Aparte del programa, la diferencia respecto a la St Mark's Tower resultó ser la posición relativa de las cuatro pantallas en cruz respecto al cuadrado de la planta, de manera que los vértices de la planta quedaban siempre

---

<sup>89</sup> Polivka Papers. Folder 1.07 "What is like to work with Wright" Carta enviada por Polivka a Wright el 30 de Julio de 1946

en voladizo, despegados del soporte. En el caso del apartamento, planteado de igual modo en dúplex, la planta inferior surgía en voladizo mediante un giro de 45° de la distribución, manifestándose en la volumetría exterior esta diferencia. Curiosamente, el único ejemplo construido siguiendo este esquema no parece que se resolviera su cimentación mediante la “raíz pivotante”. Hay que señalar que a la claridad de funcionamiento del sistema se contraponen la complejidad de su análisis, ya que es necesario compatibilizar las deformaciones del terreno en profundidad con las superficiales para los diferentes tipos de carga (vertical u horizontal).

En los detalles referentes a los forjados de esta torre, puede apreciarse que se solucionaron mediante una losa de hormigón evolucionada; esto quiere decir, con un menor peso propio se consiguió una rigidez superior, de cara a resolver el voladizo. Para ello Wright utilizó una losa aligerada, con capa de compresión inferior y superior, formando una sección en doble “T” cuya relación peso propio/rigidez es mucho mejor que la de una losa maciza. La cara inferior de la losa tiene 22,6cm de espesor (cara comprimida) y la cara superior 7,5cm (cara traccionada que contiene la armadura del voladizo). El canto total es de 50,8cm para resolver un vuelo máximo de 4,3m [Fig. 2.5.11].

El otro ejemplo de torre que también llegó a construirse fue la torre de investigaciones de la Johnson and Son Co. A pesar de que conceptualmente siguió el mismo esquema de núcleo central de soporte y los forjados en voladizo a modo de ramas de un árbol, en este caso la disposición geométrica no se asemejó a la de los ejemplos anteriores. Para este proyecto Wright contó con la colaboración de J. J. Polivka, tanto para el diseño de la estructura como el de la cimentación mediante “raíz pivotante”, que efectivamente se llegó a construir. El comienzo de utilización de las formas curvadas en el edificio administrativo de 1936, seguramente llevó a Wright a plantear la formalización de la nueva torre acorde con la propuesta del edificio preexistente. De esta manera la planta cuadrada de la torre se suavizó mediante el redondeo de las cuatro esquinas, consiguiendo colateralmente una aparente desmaterialización del volumen de la torre. Un único núcleo central de forma circular de unos 4m de diámetro sustenta los forjados en voladizo. Las plantas se han alternado de forma cuadrada y circular, quedando estas últimas dentro de la envolvente de fachada como un altillo intercalado entre plantas de mayor altura. Así pues, volvió a repetirse el planteamiento de espacios interiores sin pilares, ya que el único soporte es el núcleo central. La consecuencia de este esquema estructural en edificios en altura es que la flexión debida al empuje del viento debe asumirla íntegramente la estructura del núcleo. En torres de poca altura, como es el caso, esto no resulta un impedimento, pero para edificios de mayor altura deben introducirse elementos que mejoren la rigidez total de la torre, como en los ejemplos siguientes [Fig. 2.5.13]. La principal ventaja arquitectónica de la propuesta de Wright fue de nuevo la eliminación de los pilares interiores y de fachada que dificultaban el entendimiento del espíritu orgánico del edificio.

Haciendo una descripción particular de la estructura de la torre, el voladizo de los forjados respecto del núcleo es de 4,15m (excepto en la planta mezzanine que es de 5,35m). Se alternan plantas circulares con plantas cuadradas, lo que genera espacios a doble altura en las esquinas de la torre. En el caso de los forjados cuadrados hay que considerar que el vuelo máximo en realidad se produce en la

diagonal y llega a ser de unos 5m [Fig. 2.5.13]. Para ello Wright y Polivka plantearon también una losa aligerada de canto variable, con un espesor máximo de 90cm en el arranque del núcleo, acabando con un grueso de 27cm macizo en el extremo del voladizo [Fig. 2.5.12]. El conocimiento de Polivka del hormigón, permitió a Wright en esta ocasión proponer esta estructura realmente singular para una torre. La materialización de la “raíz pivotante” resultó también ser un hecho notable por lo que Polivka estuvo simultaneando su trabajo en la Modern Gallery con el diseño de este original sistema de cimentación, cuyo caso es el único ejemplo construido.

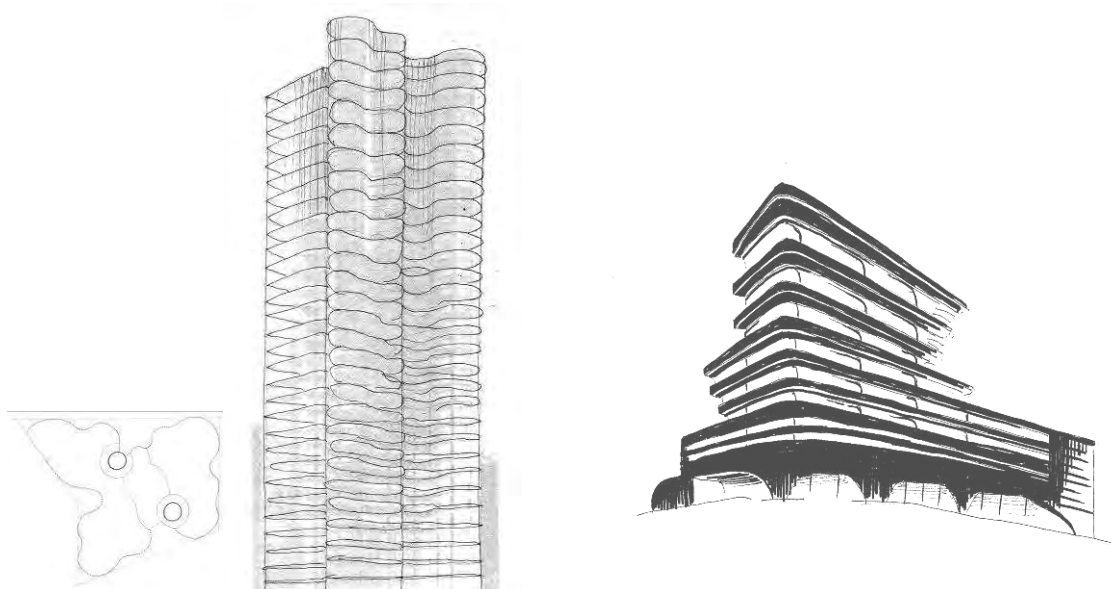
Una de las últimas propuestas de edificios en altura Wright la realizó en 1956 para la torre de apartamentos "*Golden Beacon*" en Chicago. Al ser un programa residencial, Wright optó por recuperar el modelo que desarrolló inicialmente en 1929, en este caso para desarrollar el edificio de apartamentos más alto propuesto hasta el momento con el esquema estructural de la St. Mark Tower. Frente a las dieciocho plantas, ahora se proponía una torre con cincuenta y cuatro, de manera que, a pesar de ser el mismo esquema, las dimensiones en planta del edificio resultaban considerablemente mayores. En este caso, para conseguir una mayor rigidez del núcleo, el espesor de las pantallas en la base también era significativamente mayor que en los casos anteriores, mostrando un aumento considerable de anchura en la zona central de la planta [Fig. 2.5.14].

La torre de una milla, propuesta en 1956, se engloba dentro de este grupo de torres aunque por sus dimensiones singulares bien podría considerarse como un caso aparte, por lo que ya se ha expuesto con anterioridad. Hay que señalar, sin embargo, que a pesar de que los problemas estructurales de un edificio de esa altura nada tienen que ver con los que se han mencionado. Incluso el último ejemplo de cincuenta y cuatro plantas. Aún así, la manera de abordar esta compleja estructura partió de los mismos principios de su arquitectura. Wright retomó la utilización del hormigón para la estructura así como el postensado de los forjados para poder conseguir voladizos mayores en cada una de las plantas sin necesidad de pilares interiores. El planteamiento de la cimentación mediante “raíz pivotante” en este caso adoptó una complejidad y dimensiones proporcionales con la parte aérea del edificio, llegando a los 200m de profundidad. También se aprovechó la capacidad de tracción del acero para postensar las fachadas y así aumentar la rigidez de la torre. Todas estas cuestiones son coherentes con el concepto de “tenuity” planteado por Wright, donde la estructura, los materiales y la arquitectura quedan unidos y entrelazados de manera indivisible.



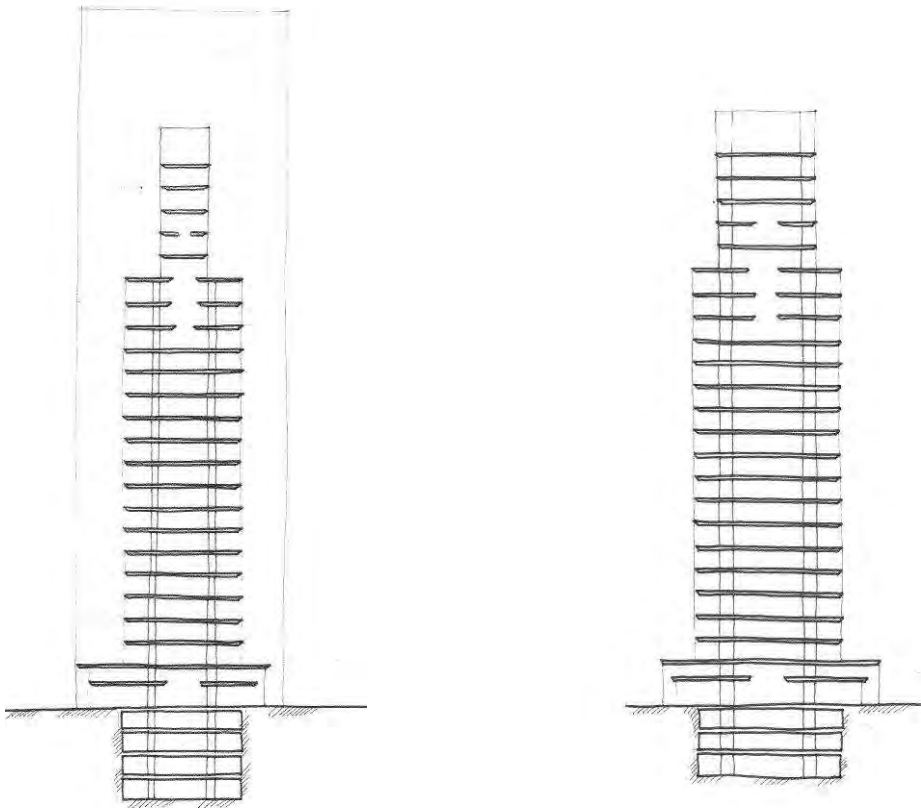
**Fig. 2.5.1** El primer proyecto de Wright para un rascacielos es para la Luxfer Prism Company, en 1895. Se muestra una fachada ordenada a partir de una cuadrícula, posiblemente siguiendo la pauta estructural habitual para este tipo de edificios, con la que Wright se había familiarizado a través del trabajo con Adler y Sullivan. Esta propuesta queda todavía muy lejos de la solución estructural definitiva.

**Fig. 2.5.2** En el rascacielos Press Building (San Francisco Call), proyectado en 1912, Wright muestra de la misma manera la utilización de una retícula estructural, en este caso vertical, aunque aparecen elementos recurrentes en otros proyectos como son los potentes aleros de cubierta, síntoma de la verdadera intención de Wright por atravesar los muros hacia el exterior.

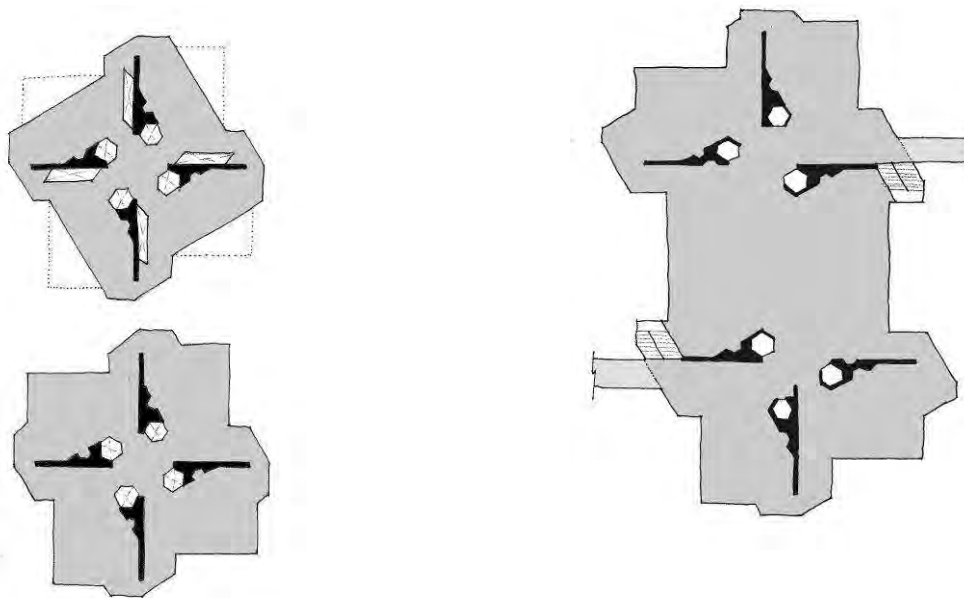


**Fig. 2.5.3** Propuesta de Mies para la construcción de un rascacielos de vidrio. En la planta de esta propuesta no aparecen pilares, posiblemente debido a la dificultad de encajar una retícula de pórticos en esta geometría. Mies se da cuenta de que la estructura caracteriza fuertemente la condición del espacio interior del edificio.

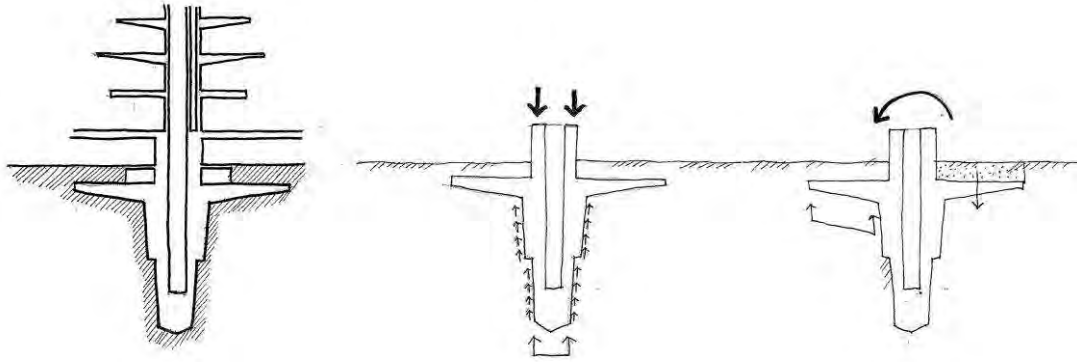
**Fig. 2.5.4** Proyecto de rascacielos para la Kemperplatz de Erich Mendelsohn. La estructura de hormigón se proyecta hacia el exterior huyendo de la definición de bloque envolvente, de una manera muy próxima al planteamiento de plantas en voladizo propuesto por Wright.



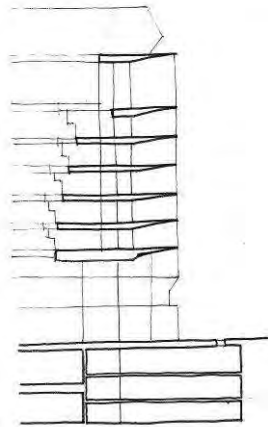
**Figs. 2.5.5-6** Commercial and office Building in Glass, Copper and Concrete y Chicago National Life Insurance Company Building



**Figs. 2.5.7-8** Estructura de la torre St. Mark's y planta tipo de una de las torres del Crystal Heights, a partir del esquema de la torres St. Mark's

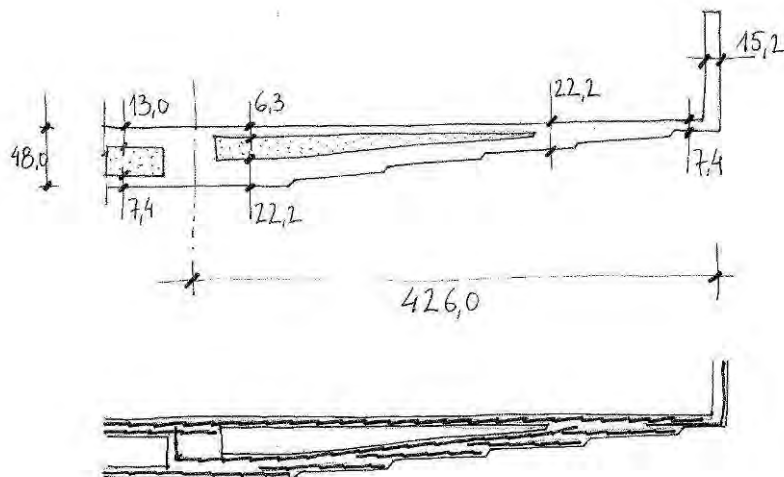


**Fig. 2.5.9** Esquema del funcionamiento estructural del sistema de cimentación mediante raíz pivotante. El núcleo empotrado en el terreno transmite las cargas de larga duración (gravitatorias) mediante rozamiento o punta. La losa superficial da reacción a las cargas de corta duración (viento). La virtud se debe a la combinación de los dos sistemas de cimentación.

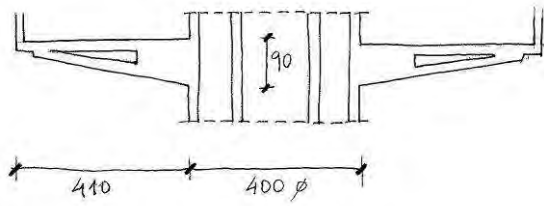


**Fig. 2.5.10** Sección de la estructura inferior del Rogers Hotel Lacy, donde los diferentes niveles se proyectan en voladizo tanto hacia la fachada exterior como hacia el interior del atrio desde unos núcleos centrales.

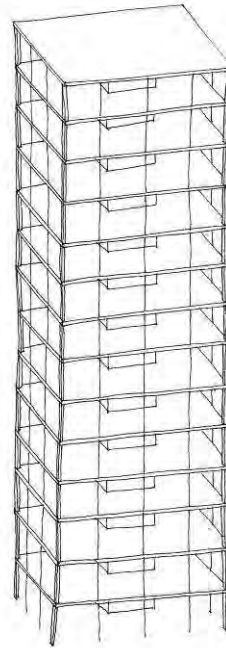
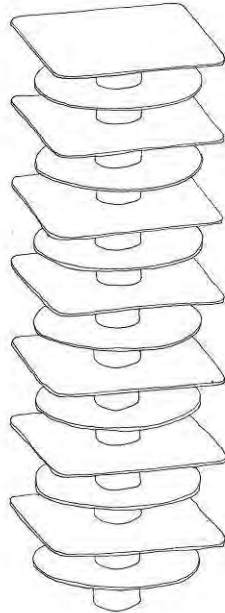
En las plantas tipo este esquema está claro y el núcleo estructural alberga a su vez los baños de las habitaciones. Sin embargo en la planta baja y sótanos, no parece que haya continuidad del núcleo y en cambio aparecen una serie de parejas de pilares triangulares más próximos a las fachadas.



**Fig. 2.5.11** Dimensiones del voladizo de hormigón de la planta tipo de la Torre Price (dimensiones en cm). Se trata de una losa aligerada de canto variable, adaptando sus espesores a las tensiones de cada punto. Hay que resaltar que la armadura está formada por una celosía de acero o chapa “deployé” solapándose tal como muestra el dibujo en la cara inferior del voladizo. Debe observarse que el espesor de las diferentes capas de hormigón indica si asumen tracciones (espesor menor con continuidad en la armadura) o compresiones (espesor mayor con armadura discontinua, con solapes).

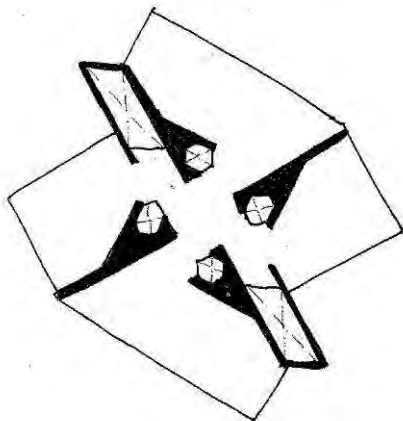


**Fig. 2.5.12** Sección de la estructura de una planta tipo de la torre de investigaciones de la Johnson and Son Co. Los forjados en voladizo se resuelven mediante una losa aligerada de canto variable, que para un vuelo de unos 4,10m el canto se deduce de 90cm en el arranque con el núcleo.



**Fig. 2.5.13** Comparación entre el esquema estructural de la torre Johnson y una torre de las mismas dimensiones con un esquema estructura clásico. Desde el punto de vista resistente, en el caso de la torre proyectada por Wright, el núcleo debe asumir la totalidad del empuje de viento, mientras que en el otro esquema, el viento queda repartido entre el núcleo central y el haz de pilares del plano de fachada, considerando como rigidez de la torre el conjunto del núcleo y los pilares.

Sin embargo, desde el punto de vista arquitectónico, en consonancia con los planteamientos de Wright, la torre del edificio Johnson atribuye a cada planta unas características espaciales que van más allá que las puramente funcionales de una torre de oficinas. Wright consigue de esta manera trasladar los planteamientos espaciales de otros tipo de proyectos desarrollados horizontalmente a una torre, a través del planteamiento estructural.



**Fig. 2.5.14** Estructura de la planta tipo de la torre de apartamentos Golden Beacon.

El esquema es similar al inicial de este tipo de edificios, la torre St. Mark, aunque en este caso, al constar el edificio de 57 plantas, las dimensiones de los muros portantes son también proporcionales a la altura del edificio.

**Clasificación de obras TORRE**

<b>OBRA</b>		<b>ESTRUCTURA</b>	<b>COMENTARIOS</b>
Luxfer Prism Company Skycraper. 1895	Proyecto	ACERO	Edificio de oficinas de diez plantas, planteado con fachadas translúcidas y estructura metálica, siguiendo el patrón reticular de la época en Chicago.
Press Building (San Francisco Call). San Francisco, California. 1912	Proyecto	HORMIGÓN	Torre de oficinas con una potente cubierta en voladizo que remata el edificio. Fachadas que muestran la tectónica del edificio, remarcando la clara verticalidad del entramado estructural.
Skycraper Chicago Illinois. 1913	Proyecto	ACERO	Propuesta de rascacielos, utilizando todavía estructura de entramado de acero.
Commercial Building in Glass Copper and Concrete. Los Angeles, California. 1923	Proyecto	HORMIGÓN	Proyecto de torre de oficinas incorporando la propuesta de una estructura de hormigón. Los forjados se proyectan en voladizo liberando a la fachada de pilares.
National Life Insurance Company Office Building for A.M. Johnson. Chicago Illinois. 1924	Proyecto	HORMIGÓN	El mismo planteamiento que en la torre anterior. Los soportes verticales son pantallas de hormigón en forma de cuña. Los forjados de hormigón también con voladizos en las fachadas.
St. Mark's Tower in the Bouwerie for William Norman Guthrie. New York. 1929	Proyecto	HORMIGÓN	Pantallas verticales de soporte dispuestas en cruz. Forjados en voladizo girando una planta sobre otra.
Grouped Apartment Towers. Chicago Illinois. 1930	Proyecto	HORMIGÓN	Agrupaciones de torres de dos en dos siguiendo el esquema de la Sant Mark's Tower.
Skycraper. Chicago Illinois. 1931	Proyecto	HORMIGÓN	Torre escalonada. La planta cuadrada tiene voladizos en las cuatro caras.
Crystal Heights, Hotel Apartments, Theatre, Shops and Parking. Washington D.C. 1939	Proyecto	HORMIGÓN	Conjunto de torres formado a partir de la agrupación de torres siguiendo el esquema de la St. Mark's Tower.
S.C. Johnson and Son Co., Research Tower. Racine, Wisconsin. 1944	Construido	HORMIGÓN	Plantas en voladizo a partir de un núcleo central. Detalles constructivos del arranque del voladizo.



OBRA		ESTRUCTURA	COMENTARIOS
Rogers Lacy Hotel for Rogers Lacy. Dallas, Texas. 1946	Proyecto	HORMIGÓN	Dentro del conjunto, la torre es del mismo tipo que la St. Mark's ubicada dentro de otro volumen. El volumen más bajo forma un claustro con forjados en voladizo. De dentro del claustro (cubierto) nace la torre. Analogía de los voladizos con el Guggenheim. Colaboración con Polivka.
Price Tower for the H.C. Price Company. Bartlesville, Oklahoma. 1952	Construido	HORMIGÓN	Esta construcción finalmente consigue materializar la idea de la St. Mark's Tower propuesta en 1929. Sistema de forjados en voladizo desde un núcleo central. En el detalle constructivo puede observarse que los forjados están resueltos mediante losas aligeradas de canto variable.
"Golden Beacon" Apartment Tower for Charles Glore. Chicago Illinois. 1956	Proyecto	HORMIGÓN	Diseñada con el mismo principio que la St. Mark's Tower. Es la torre más alta de este tipo.

## 2.6 Edificios en espiral

En 1924 Wright recibió un encargo profético: el proyecto del Automobile Objective Gordon Strong. Hasta el momento en los edificios de Wright las formas utilizadas en los volúmenes eran deudoras del sistema Fröbel utilizado por Wright en su infancia y las geometrías basadas en curvas no eran habituales. Por otro lado, desde la invención del coche en Estados Unidos el medio de transporte de más influencia, además del ferrocarril, era el automóvil y, hacia principios del siglo XX, su industria se había desarrollado en este país de manera muy importante. El número de vehículos crecía y poco a poco el coche empezaba a formar parte de la vida cotidiana de las personas. Wright era perfectamente consciente de este cambio y de las consecuencias que tendría en el futuro, así que empezó a incorporar pequeños aspectos en sus casas que hacían compatible el uso del coche con el diseño de las viviendas. Incluso llegó en 1920 a diseñar, de manera rudimentaria, el chasis de un coche que llamó “Automóvil con voladizo” ya que la cubierta de la cabina únicamente quedaba unida al resto del chasis por la parte posterior, permitiendo así a todos los ocupantes disfrutar del paisaje sin la interferencia de ningún elemento vertical. Esta cuestión que, al margen de lo anecdótico, refleja perfectamente la intencionalidad de los voladizos de todos sus edificios. Enlazando de nuevo con el observatorio Gordon Strong, en este proyecto Wright se imaginaba poder disfrutar del paisaje y de la arquitectura desde el propio coche, aspecto muy norteamericano. En este país se puede ir al cine o comer en un restaurante sin bajarse del coche, de manera que Wright ideó un edificio en el que la aproximación y acceso al edificio se realizase también desde el coche, rodeándolo varias veces para poder participar del entorno. Así, el edificio quedaba integrado en el entorno, formando parte de él, en este caso como la cumbre de una colina. La consecuencia de este planteamiento fueron las propias limitaciones del automóvil y es que éste sólo puede acceder por recorridos con una pendiente determinada de manera que el resultado fue una rampa en espiral.

El recorrido del espacio a través de rampas y la espiral han sido uno de los motivos principales de la Arquitectura Moderna. Le Corbusier propuso en muchas ocasiones el tránsito por el edificio a lo largo de rampas que deambulan por el interior de la arquitectura, haciendo uso de la percepción cambiante del espacio en función de las diferentes posiciones del observador, como por ejemplo en la Villa Shodan o en el interior del Palacio de Justicia de Chandigarh. En programas museísticos que implican un recorrido de considerable desarrollo, la espiral ha sido también uno de los recursos más habituales; por ejemplo el Museo de Crecimiento Ilimitado, también de Le Corbusier, o el Museo para una Pequeña Ciudad de Mies. En el caso de este proyecto de Wright está claro que la intencionalidad del recorrido era la de participar del entorno desde el edificio y, en concreto, desde el coche. Al igual que Le Corbusier indujo a percibir su arquitectura desde diferentes puntos de vista a través de la rampa, en este caso Wright pretendía integrar el edificio con el entorno a través del punto de vista continuamente cambiante del observador, debido al giro de la rampa y el movimiento del coche. La espiral ascendente circulaba a la intemperie, en el borde límite del edificio, participando del paisaje a la llegada al edificio, mientras que la rampa descendente discurría paralelamente en un nivel

inferior, obteniendo como resultado la primera propuesta a partir de una gran rampa en espiral.

Para Wright la estructura de este edificio era una continuación natural de la cima de la montaña, coronándose con la gran cúpula del planetario. El significado de la cúpula implica el concepto de remate de la colina formando así parte de la misma. Además en este caso la cúpula servía como soporte de la rampa, cuyos problemas propios de funcionamiento estructural se verán más adelante. La estructura se proponía realizada mediante hormigón armado, fácilmente adaptable a las exigencias de Wright y la rampa se apoyaba sobre la cúpula mediante un sistema de mamparas para repartir de la manera más homogénea posible la carga [Fig. 2.6.1]. Es sabido que los sistemas abovedados o las cúpulas tienen una gran capacidad de carga y, con espesores relativamente finos, pueden llegar a cubrir luces considerables. La condición es que las cargas sean simétricas respecto a su geometría y que queden lo más repartidas posible para evitar esfuerzos de flexión, que rápidamente exigen espesores mucho mayores que en el caso de trabajar solamente a compresión.

El proyecto del observatorio no se llegó a construir, pero constituyó uno de los puntos de partida para proyectos futuros. Establecer un recorrido en espiral como medio de integración del espacio y al mismo tiempo aprovechar la versatilidad del hormigón para adaptarse a esta geometría dieron lugar a los primeros esquemas del Guggenheim Museum, cerrándose la espiral según ascendía. Posteriormente Wright redefinió la espiral, abriéndola en sentido ascendente y la denominó “tarugiz” en lugar de zigurat. Según Kenneth Frampton *es propio de Wright el perenne orientalismo de estos dos conceptos tectónicos: la pagoda y el zigurat, cuyos orígenes están en China y Persia.*<sup>90</sup>

Dentro de las estructuras en espiral propuestas por Wright pueden diferenciarse dos grupos: donde la rampa en espiral se apoya sobre otro sistema, como era el caso del observatorio, y donde la rampa se sustenta a sí misma o forma parte de la estructura principal del edificio. Esta segunda situación está mucho más evolucionada, principalmente debido a la complejidad estructural implícita, tanto por cuestiones constructivas como de análisis, donde la dificultad crece de manera desproporcionada con la dimensión del edificio. Por este motivo, Wright aprovechó la posibilidad brindada por Polivka de colaborar con él en el proyecto de la Modern Gallery (posteriormente Guggenheim Museum) con la intención de resolver la difícil situación estructural de una rampa autoportante. En el proyecto del planetario de 1924 la espiral no tenía una función estructural principal, pero ya desde las primeras propuestas de la Modern Gallery, la intención de Wright fue que la propia estructura de la rampa fuese también la estructura principal del edificio [Fig. 2.6.2].

El análisis de la estructura del Guggenheim Museum se desarrolla en la tercera parte del trabajo, por lo que, a pesar de ser la obra más importante de esta tipología y seguramente de toda la obra de Wright, no parece oportuno exponerlo con detalle en este apartado, ya que la intención en este momento es contextualizar

---

<sup>90</sup> FRAMPTON, Kenneth. *Modernization and Mediation: Frank Lloyd Wright and the impact of technology*. Artículo que forma parte del catálogo de la exposición de Wright en el MOMA en 1994, págs. 58 a 79.

todas las obras que se relacionan con el Guggenheim. No obstante es interesante destacar ahora que, entre el proyecto del Observatorio Gordon Strong en 1924 y el inicio del proyecto de la Modern Gallery en 1943, no hay otros ejemplos de planteamientos en espiral. El resto de proyectos de este tipo, incluyendo la tienda Morris, el único que se construyó además del Guggenheim, se desarrollaron simultáneamente durante el proceso de evolución de la Modern Gallery a la construcción del Guggenheim, en donde Wright acabó de llevar la tecnología del hormigón armado al límite, no sólo en términos de análisis y de la estricta capacidad del material para soportar las tensiones inducidas por los pronunciados voladizos, sino también por la viabilidad de su construcción.

Una vez ya en marcha la Modern Gallery, el proyecto del "*Daylight Bank*" de 1947 fue un tímido inicio hacia el esquema del Guggenheim. En este caso no había ni una rampa ni una espiral completa, pero el nivel superior en voladizo sobre el espacio circular central recuerda, a una escala menor, al patio central del Museo. Uno de los problemas fundamentales de estabilidad del Guggenheim resultó ser el voladizo hacia el interior resuelto sin pilares en el borde interno. Aquí se resolvió mediante la compensación del forjado con un volumen también en vuelo hacia el exterior [Fig. 2.6.3]. Este volumen exterior que equilibraba el voladizo interior se manifestó en la entrada, marcando una línea de sombra similar al recurso utilizado para el acceso del Guggenheim. El problema fundamental planteado en este edificio se repitió con mayor magnitud en el Museo, ya que al problema del equilibrio del voladizo se sumó su dimensión, la superposición de plantas y la sustitución del apoyo continuo por soportes puntuales. Anecdóticamente, para la cubierta del espacio central Wright proyectó un gran lucernario formado por una estructura ligera, posiblemente metálica, para la cual se insinuaba un sistema de tensores inferiores, a modo de vigas *Fink*, que garantizaran su estabilidad. Este tipo de estructuras no son habituales en la obra de Wright, aunque, como se verá más adelante, aparecen en algunas ocasiones desde el inicio de su carrera hasta las últimas obras.

En el otro extremo de la escala, el Centro Cívico Point Park en Pittsburg, cuya propuesta se realizó el mismo año, se planteó como una gigantesca superposición de plantas circulares que contenían en su espacio central múltiples actividades de ocio. El conjunto, escalonado en sección, permitía deambular por el exterior y el interior del edificio y, en este caso, apoyándose en un sistema de pilares de forma triangular dispuestos radialmente. Estos pilares crecían de forma inclinada hacia el interior, provocando el escalonamiento de las rampas que, a pesar del considerable diámetro del conjunto, quedaban estabilizados unos con otros gracias a la forma de circunferencia completa del sistema [Fig. 2.6.4]. Esta geometría no hubiese sido posible sin el efecto de la curvatura de la planta ya que los pilares inclinados hacia el interior necesitaban poder soportar un momento de vuelco muy importante. Como en el Hotel Rogers Lacy, los forjados quedaron en voladizo a ambos lados de los pilares/núcleos y proponiéndose con una sección variable igual que los construidos en la torre de investigaciones de la Johnson and Son Co. De las múltiples situaciones singulares de este edificio, esta es la que tuvo mayor trascendencia en otros edificios, principalmente en el Guggenheim Museum. La cubierta del espacio central se asemejaba una gran catenaria que además alberga espacios de uso multitudinario y en el interior del atrio se planteó ubicar varios

volúmenes autónomos como un acuario o un auditorio. En el exterior, el conjunto se completó con dos puentes y varios núcleos verticales de comunicación, también desarrollados como rampas en espiral para acceder a los diferentes niveles. Nuevamente, el planteamiento de la estructura se basó en la utilización del hormigón y del aprovechamiento de su comportamiento laminar, no como cuestiones independientes sino como una interacción entre elementos. Este mismo hecho no sólo se produjo entre los diferentes componentes de la estructura sino con la totalidad de los elementos de la arquitectura.

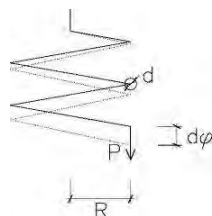
Un año más tarde, la propuesta de la tienda de regalos Morris, en San Francisco, sí que llegó a construirse. Se trató de un edificio de pequeña dimensión, pero que simbolizaba la primera materialización del motivo de la espiral. El exterior del edificio, de planta rectangular, se planteó como una caja completamente desconectada del exterior excepto por la puerta de entrada, que se formalizó mediante un arco que recuerda al de la casa Dana de 1902. Sin embargo, en su interior se incubaba la formalización de la rampa del Guggenheim. En este caso la rampa, con un desarrollo de casi 360°, se prolongó una sola vuelta para comunicar la planta baja con el primer nivel por lo que, junto a la diferencia de dimensiones, no representaba el mismo reto estructural. Sin embargo, a pesar de tratarse en este caso de una solución de menor envergadura, la rampa se propuso como un elemento estructural autónomo o autoportante, siempre con el problema derivado de que la sección tipo de la rampa quedaba en voladizo respecto a sus apoyos. En estructuras helicoidales de diámetro no muy grande, la rigidez longitudinal de la rampa es de crucial importancia, ya que su comportamiento se asimila más a un muelle – como la rampa de Lubetkin<sup>91</sup> – que a un elemento en voladizo<sup>92</sup>. En esta ocasión, la barandilla contribuyó en gran manera en el aumento de rigidez de la rampa. Sin embargo, en espirales de un diámetro mucho mayor, la rigidez longitudinal pasa a un segundo plano por lo que, en este sentido, es de crucial importancia el planteamiento de la sección transversal. Es la intención profundizar este aspecto en el apartado correspondiente al Guggenheim Museum, donde se verá que el papel

<sup>91</sup> Berthold Lubetkin, “Penguin Pool”. Zoo de Londres 1934

<sup>92</sup> TIMOSHENKO, Stephen P. *Resistencia de materiales. Tomo I*, Espasa-Calpe. Madrid 1957. Págs. 263 a 264. Según las expresiones desarrolladas al respecto por Timoshenko, en un muelle helicoidal de sección constante sometido a una fuerza axial P, las tensiones de mayor consideración y la totalidad de las deformaciones se deben al esfuerzo torsor.

Tensión derivada del torsor:

$$\tau_1 = \frac{16 P R}{\pi d^3}$$



Deformación derivada del torsor:

$$d\varphi = \frac{P R R d_\alpha}{I_p G}$$

Donde P es la carga del muelle, R es el radio del muelle, d el diámetro de la sección del muelle,  $I_p$  el momento de inercia polar de la sección y G el módulo de elasticidad transversal.

Nótese que tanto la tensión como la deformación crecen linealmente y al cuadrado respectivamente, con el aumento de radio, resultando inviable valores muy altos de R.

de las barandillas no es tan relevante como se ha podido pensar hasta el momento, igual que sucedió con las barandillas de la Casa de la Cascada.

Volviendo a la rampa de la tienda Morris, la intuición de Wright de rigidizar la rampa aprovechando la barandilla fue acertada y parece que el comportamiento estructural del conjunto puede considerarse como el apoyo continuo entre el borde exterior de la rampa y el soporte también continuo en la barandilla que define el borde interior, trabajando en espiral entre el arranque y la llegada al piso superior. No parece razonable que la rampa saliese en voladizo desde el apoyo del muro perimetral exterior, ya que no existía continuidad hacia el otro lado, por lo que resultaría un comportamiento bastante forzado, en contraste con la suavidad del deslizamiento de la barandilla por el espacio interior.

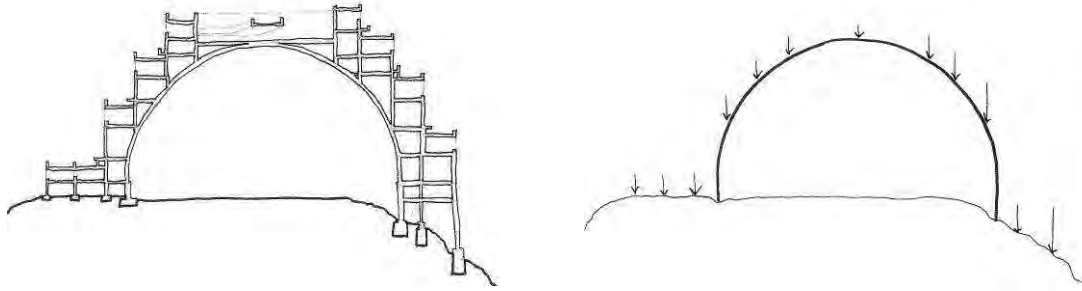
Las grandes dimensiones del edificio para la estación de servicio y garaje de E. Kaufmann propuesto en 1949 evidencian este comportamiento. En esta ocasión se trató de una doble rampa de seis niveles que completaba los 360° donde su diámetro exterior era de unos 62m. De nuevo, la utilización del automóvil dentro del edificio y su recorrido sugería la utilización de la rampa en espiral, en este caso apoyada en los cuatro cuadrantes en el borde exterior y en cuatro grandes pilares en el interior. Los aproximadamente 16,3m de anchura de la rampa imposibilitaron que ésta trabajase tanto en voladizo desde los apoyos interiores o exteriores, como aprovechando la rigidez de fachadas o barandillas. El funcionamiento de la estructura como un “muelle” sólo es posible cuando las dimensiones de la rampa son pequeñas y tanto en este caso como en el Guggenheim, Wright debió utilizar otros recursos para poder resolver la estabilidad de la estructura. Los cuatro apoyos exteriores se formalizaron a través de cuatro parejas de pilares que posiblemente, por su dimensión, albergaban escaleras o ascensores en su interior. En el borde interior de la espiral, dentro de un patio de 29,4m de diámetro, se ubicaron las réplicas de estos apoyos; cuatro potentes columnas que sustentaban una rampa interior y sobresalían por encima del último nivel para recibir un sistema de cables también de soporte. En toda la obra de Wright no hay demasiadas estructuras atirantadas<sup>93</sup>. Sin embargo, la utilización del acero, sobre todo los cables traccionados, responde a una de las virtudes de los materiales que tanto agradaba a Wright<sup>94</sup>. Para esta estructura, los cuatro pilares centrales convergían por encima de la cubierta recogiendo un haz de cables que servían como soporte del borde interior de la rampa. En los dibujos publicados de este edificio no queda demasiado claro, pero parece razonable que los cables soportasen el perímetro interior de la rampa, ya que, dada la anchura de la rampa y el diámetro de su desarrollo, resultaba imprescindible este apoyo interior realizado mediante la suspensión de las losas desde los mástiles centrales. Hay que señalar que la distancia entre apoyos externos es de unos 32m, distancia que, aunque no resulta disparatada, si se considera el efecto de curvatura, podría requerir la consideración del efecto rigidizador de la fachada o una inercia a torsión considerable de la sección de la rampa. [Fig. 2.6.5].

---

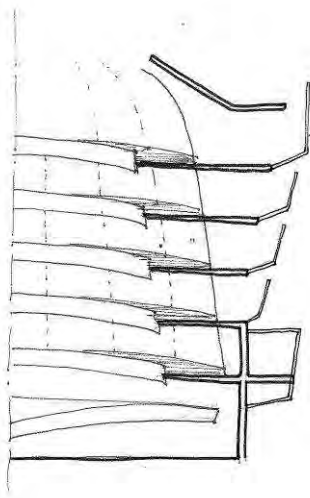
<sup>93</sup> Twin Suspension Bridges for Pittsburgh Point Parc Civic Center. Pittsburgh, Pennsylvania. 1948. The Belmont Racetrack Pavilion. Long Island, New York. 1956. "Mile High" Office Building. Chicago Illinois. 1956.

<sup>94</sup> Ver apartado 2.8: La utilización del acero y entramado

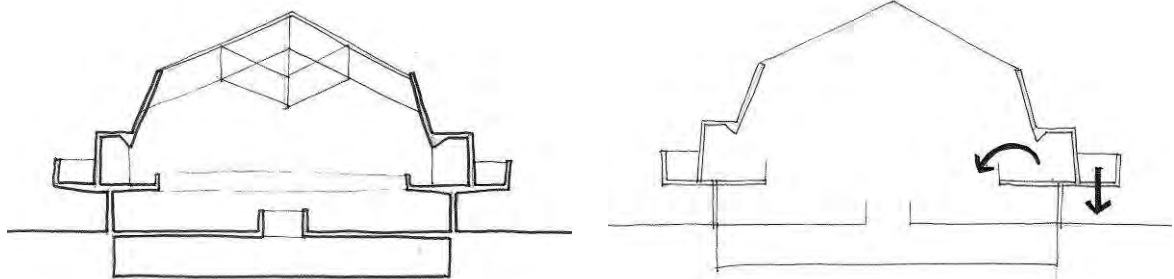
De nuevo en el ámbito doméstico, la casa para David Wright en Arizona reprodujo otra vez el mismo concepto. La sección de la rampa de canto variable se resolvió mediante un tubo que recorría el eje de la misma. Este tubo le otorgaba al conjunto suficiente rigidez como para soportar los esfuerzos de torsión derivados de su geometría. No obstante, debido al gran diámetro interior de la circunferencia, se disponen soportes intermedios (pilares circulares) que garantizasen el buen funcionamiento de la estructura. Esta disposición en espiral fue una constante hasta las últimas propuestas realizadas por Wright. En el monumento a Harún al-Rashid en Bagdad en 1957, Wright recuperó para el diseño de su base la forma de zigurat, propuesta por primera vez en el observatorio y planetario Gordon Strong.



**Fig. 2.6.1** En la sección del proyecto del observatorio para automóviles y planetario se puede apreciar que la estructura de la rampa no es autoportante y que se apoya sobre una estructura de orden superior, la gran cúpula que cubre el planetario.

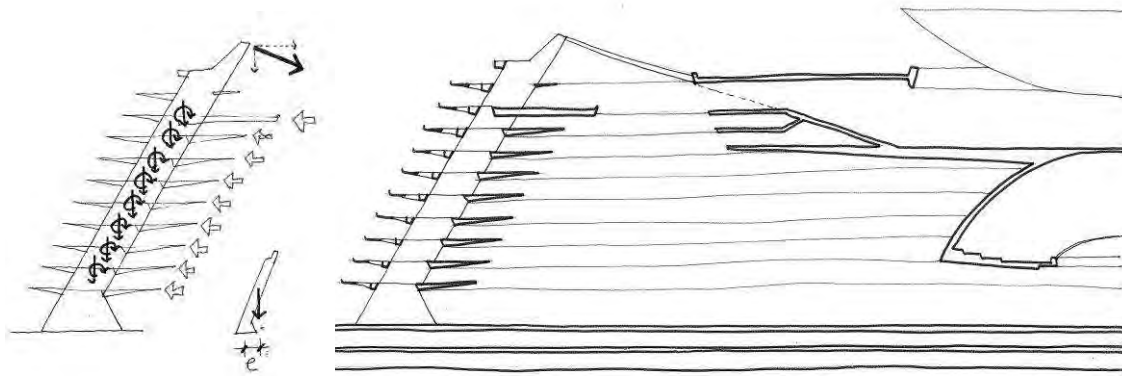


**Fig. 2.6.2** En el Guggenheim o en la tienda Morris, la rampa es el elemento arquitectónico principal y a su vez es un elemento estructural autoportante, es decir, no requiere de una subestructura para sustentarse.

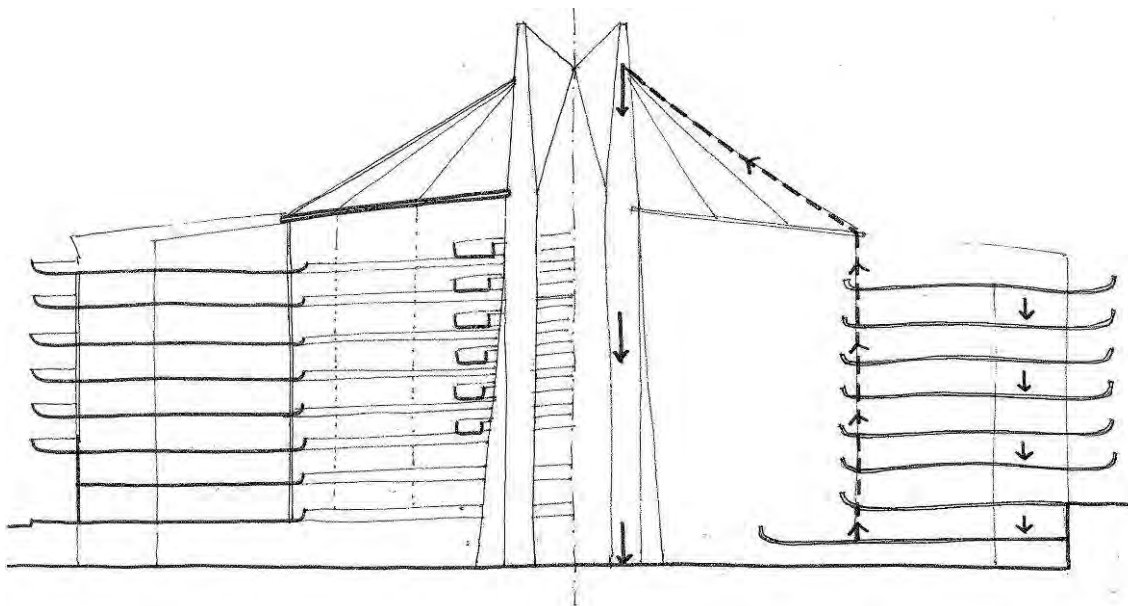


**Fig. 2.6.3** En el proyecto del Daylight Bank, a pesar de no haber una rampa en espiral, el esquema estructural para resolver el voladizo interior del altillo, apunta hacia soluciones utilizadas por Wright posteriormente. El momento del voladizo hacia el interior se compensa mediante el contrapeso formado por la jardinera hacia el exterior. La fragilidad de este equilibrio se consolida a través de la geometría circular de la planta del altillo, estable a los efectos globales del conjunto, ya que configura un anillo apoyado en el punto medio de su sección a lo largo de todo su desarrollo.





**Fig. 2.6.4** La estructura del Centro Cívico Point Park de Pittsburgh también se basa en el principio de equilibrio de la circunferencia. Los potentes contrafuertes soportan la impresionante catenaria de la que cuelgan la cubierta y todos los elementos centrales, generando una reacción en la cabeza de los mismos. Esta reacción puede descomponerse en un una fuerza vertical, asumida por el contrafuerte y otra horizontal de sentido hacia el interior de la circunferencia. De esta manera, los forjados que forman los diferentes niveles perimetrales, mediante un mecanismo de arco de descarga horizontal, compensan este empuje en el conjunto global de la estructura. Por otro lado, debido a la inclinación hacia el interior del contrafuerte, todas las cargas gravitatorias (incluyendo a la componente vertical de la catenaria) producen un momento de vuelco hacia el interior del contrafuerte que, si no fuese también por el efecto circunferencial de los forjados, difícilmente podría asumirse sin resultar un dimensionado desproporcionado.



**Fig. 2.6.5** En el proyecto del Garaje Kaufmann se introduce un elemento nuevo, los tirantes traccionados desde donde se cuelgan las diferentes plantas. Este tirante transmite la carga de los forjados hasta los cuatro mástiles ubicados en el centro de la circunferencia.

*Clasificación de obras ESPIRAL*

OBRA		ESTRUCTURA	COMENTARIOS
Automobile Objective and Planetarium for Gondon Strong. Sugarloaf, Maryland. 1924	Proyecto	HORMIGÓN	Edificio en forma de zigurat. Rampa espiral soportada sobre una gran cúpula de hormigón.
Solomon R. Guggenheim Museum. New York. 1943	Construido	HORMIGÓN	Desarrollado en la tercera parte del trabajo.
"The Daylight Bank". Valley National Bank, Tucson, Arizona. 1947	Proyecto	HORMIGÓN	Edificio de planta circular con un patio central. Accesos a la planta superior mediante rampas en espiral. Se asemeja (bastante simplificado) al Guggenheim.
Pittsburgh Point Park Civic Center. Pittsburgh, Pennsylvania. 1947	Proyecto	HORMIGÓN	Complejo lúdico de enormes proporciones. Estructura general en forma de espiral soportada por unas costillas inclinadas hacia el interior en disposición radial. También hay una gran cúpula que cubre un auditorio. Accesos exteriores mediante rampas en espiral. Los forjados de la rampa están en voladizo a partir de las costillas radiales. En planta baja aparecen columnas dendriformes.
Gift Shop for V.C. Morris. San Francisco, California. 1947	Construido	ACERO	El exterior del edificio es un prisma de fábrica con una puerta que evoca a la Casa Dana. El interior se organiza mediante una rampa en espiral autoportante, siguiendo el concepto del Guggenheim.
Self-Service Garage for Edgar J. Kaufmann. Pittsburgh, Pennsylvania. 1949	Proyecto	HORMIGÓN	Edificio en espiral de grandes dimensiones. La rampa está soportada únicamente en cuatro puntos y se ayuda por unos cables suspendidos de un mástil central.
"How to live in the South-West" Executed for David Wright. Phoenix, Arizona. 1950	Proyecto	HORMIGÓN	Vivienda unifamiliar organizada mediante una rampa en espiral.
Monument to Harún al-Rashid. Bagdad, Irak. 1957	Proyecto	HORMIGÓN	La base del monumento es un zigurat en espiral.

OBRA	ESTRUCTURA	COMENTARIOS
------	------------	-------------

Todd A-O Universal  
Theatre, Scheme A. 1958

Proyecto ACERO

Aunque la planta no se organiza en espiral, la cubierta de la sala se asemeja a la del patio del Guggenheim, aunque a mayor escala.

## 2.7 De la utilización del hormigón al tejido usoniano

El hormigón en sí no representa una tipología estructural propia, sino que en función de la aplicación que se le dé puede estar incluido en muchas de las variantes y posibilidades estructurales tal como se ha visto hasta el momento. Sin embargo, vale la pena hacer una reflexión sobre su repercusión en todas estas tipologías y en el conjunto de la obra de Wright, dentro de la cual ha jugado un papel importante que queda reflejado en su arquitectura.

Sin entrar en un análisis histórico general sobre el uso del material, Wright propuso su utilización por primera vez en el edificio del Monolithic Concrete Bank. Aunque no se llegó a construir, Wright intuyó en este momento temprano de su obra las grandes posibilidades arquitectónicas del nuevo material. En concreto, dentro de sus principios arquitectónicos, la principal virtud del hormigón radicaba en su capacidad integradora de los diferentes aspectos de la arquitectura, estructura, cerramiento y ornamento. Desde un comienzo, muy lejos de las estructuras de hormigón más sofisticadas desarrolladas durante la madurez profesional, Wright insinuó su integración a través de la formalización de los muros de fachada, que eran soporte, lenguaje y definición del espacio. Esto resulta contrario a los planteamientos de la Escuela de Chicago y a los del posterior Movimiento Moderno, ya que, en lugar de separar la estructura del resto de funciones, se realizaba un esfuerzo para no perder la integridad del conjunto. Este ejemplo, y otros posteriores que sí llegaron a construirse a comienzos del siglo XX, no aprovecharon todas las posibilidades estructurales y formales del material, aunque sin embargo sentaron las bases de propuestas posteriores, en las que hubiese resultado difícil entender una visión integral de su arquitectura sin el hormigón armado.

El primer edificio que Wright llegó a construir con este material fue la Iglesia Unitaria de Oak Park. El planteamiento volvió a ser el mismo que el caso anterior, con la diferencia de que en esta ocasión Wright comenzó a aprovecharse de las ventajas estructurales del material. Como se comentó al comienzo de esta segunda parte, el motivo inicial que llevó a Wright a utilizar este material fue el económico. En 1904 el hormigón era considerado un material de baja calidad por lo que resultaba más barato plantear la estructura del edificio de esta manera, a diferencia de los sistemas expuestos para las Casas de la Pradera. Por otro lado, si con el mismo material podían resolverse también cerramientos y ornamento, el ahorro resultaba entonces sustancial, siendo coherente con el principio de integración de la arquitectura orgánica. A Wright esto le pareció realmente interesante así que adoptó el sistema constructivo como una de las herramientas básicas de muchos de los edificios más significativos de su obra.

La Iglesia Unitaria respondía a un esquema estructural similar al de Hillside Home School, donde las fachadas se transformaron en pilastras que soportaban la cubierta. La cubierta de la sala principal, en forma de cruz griega, estaba formada por una retícula compuesta de seis vigas en cada dirección que se apoyaban en las seis pilastras de cada fachada y en los cuatro vértices interiores, dejando paso a una iluminación cenital entre la retícula de las vigas [Fig. 2.7.1].

Al acabar la construcción, Wright se dio cuenta de las posibilidades reales de este material, enfocadas principalmente a su producción industrializada, su economía y su buen comportamiento frente al fuego. Este interés se reflejó en la propuesta publicada en la revista *Ladies' Home Journal* donde propuso una casa de bajo coste, a prueba de incendio, para mujeres americanas [Fig. 2.7.2]. Wright concibió este tipo de casa como una producción estandarizada de viviendas, realizadas con un material nuevo y cumpliendo uno de los requerimientos que más preocupaba en los edificios con estructura de acero; la estabilidad frente al fuego. De este ejemplo quizás resulta más interesante el concepto de Wright de producción industrial asequible económicamente, destinada al americano medio, que la resolución constructiva en particular. Posteriormente, en 1906 planteó la resolución de la casa para Harry E. Brown, en Illinois, con un método constructivo un grado más elaborado. Esta casa, nuevamente a pesar de no haberse construido, resultó ser el inicio del sistema “*block*”, una construcción a base de piezas de hormigón prefabricado para la formación de muros y pilastras, en este caso revestidos por la cara interior con plafones de madera. Este procedimiento de construcción consistía en la industrialización de piezas de hormigón que, ensambladas, configuraban un tejido constructivo donde se engloban todos los elementos de la arquitectura. Por eso Wright lo llamó también “bloque textil” y fue la base y fundamento de toda la filosofía usoniana así como de la entrelazada unión entre los diferentes componentes estructurales, independientemente de los materiales. En su autobiografía Wright escribió: “¿El bloque de hormigón? Es la cosa más barata (y fea) del mundo de la construcción, pero con un sistema de ensamblaje sencillo se puede construir arquitectura moderna de una manera económica”<sup>95</sup>.

De esta manera se construyó en 1923 la Miniatura, una vivienda realizada íntegramente con un solo material: el bloque de hormigón, que se manifestó tanto en el exterior del edificio como en su acabado interior. Las casas que se construyeron posteriormente con el mismo sistema partían de módulos básicos de 16 x 16 pulgadas [40,6 x 40,6cm], separados entre sí una pulgada [2,54cm] que se completaban con hormigón “in situ” donde se albergaba la armadura de unión entre piezas. Puede el conjunto así resistir tanto esfuerzos de compresión como de tracción. Cada muro estaba formado por una doble hoja con una cámara de aire en su interior [Fig. 2.7.3].

El sistema resultó ser suficientemente versátil como para poder ser aplicado de diferentes maneras. Así pues, en la Miniatura los bloques sólo configuraron muros y pilastras, pero en otras casas posteriores, como es el caso de la Freeman House en Los Ángeles de 1924, el sistema sirvió también para formar vigas y jácenas [Fig. 2.7.4]. Los bloques de hormigón permitían la incorporación de la armadura necesaria para responder a los esfuerzos de flexión o cortante y el aspecto del conjunto resultó del todo integrado. Este es el verdadero ejemplo que corresponde con la definición de arquitectura orgánica, donde todas las partes están relacionadas entre sí formando un todo unitario.

Wright siguió utilizando su invento en muchos proyectos, principalmente del área de California, tanto para viviendas como para algunas intervenciones de mayor

---

<sup>95</sup> FRAMPTON, Kennet. “Modernization and Mediation. Frank Lloyd Wright and the impact of technology”, pág. 67, La Tectónica Textil

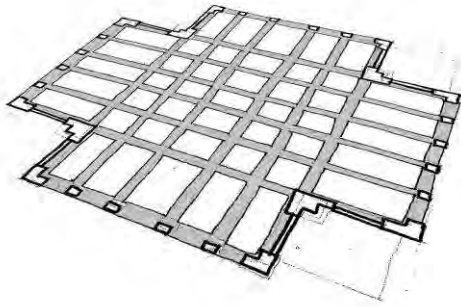
envergadura. Este fue el caso de los proyectos del Doheny Ranch Resort, también de 1923, o del Resort- Hotel San Marcos-in-the-Desert de 1928 manifestando así las posibilidades y ventajas del sistema en actuaciones de mayor tamaño. A comienzos de los años treinta Wright empezó a variar las proporciones de los bloques, más rectangulares, de manera que la apariencia de pasividad de los edificios se fue diluyendo al igual que el sistema constructivo en sí. A partir de este momento, Wright dejó paso a otros métodos constructivos que recuperaban materiales más tradicionales, como la madera. Esta transición pudo ser debida en parte a una posible monopolización de los fabricantes de bloque que, al igual que sucede hoy en día, subieron el precio del material haciendo que su coste fuese contradictorio con la filosofía inicial. La derivación natural del método desembocó en el sistema “Usonian Automatics”, desarrollado a partir de 1949. El método constructivo estaba basado en la misma idea que el sistema block, haciendo confluír todos los aspectos arquitectónicos en una sola pieza prefabricada de hormigón, cerramiento, estructura y ornamento. Las piezas, en lugar de ser cuadradas, como sus predecesoras de 1923, tenían forma rectangular de 24 x 12 x 4 pulgadas [60,96cm x 30,48cm y 10,16cm de espesor], configurando un muro de doble hoja en cuyo interior se disponía también la armadura. La idea consistía en desarrollar un sistema integrado que permitiese construir casas a precios asequibles, en la línea de la democratización de la arquitectura que Wright mantuvo durante toda su obra. Las primeras casas usonianas, en lugar de utilizar este bloque de hormigón, se construyeron con madera y ladrillo, pero el denominador común entre ambos sistemas fue la rigurosidad de la trama subyacente, base del diseño y del desarrollo de ambos sistemas constructivos. Para Wright, la modulación, bien fuese para un patrón de bloques de hormigón, un entramado de madera o una fábrica de ladrillo, era el fundamento sobre el que pretendía conseguir el objetivo de “racionalizar” la construcción, para conseguir un coste asequible. La trama no tenía por qué ser rectangular, sino que podría basarse en patrones hexagonales o radiales, como fue el caso de la casa para David Wright, Phoenix, Arizona, construida en 1950.

En la arquitectura del siglo XX, las láminas de hormigón han formado parte de edificios donde la estructura asume un papel principal dentro del conjunto. Ejemplos como las cubiertas del Auditorio Kresge o la de la Terminal de la TWA, de E. Saarinen<sup>96</sup>, son herederos de las cáscaras de hormigón de A. Perret, E. Torroja o R. Maillart. Wright en este sentido adoptó esta tipología estructural como la otra vertiente de aplicación del hormigón, llegando a su máximo exponente en el Guggenheim Museum. No tanto a través de su incorporación como material industrial, fácil de montar y económico, que también incorporase el ornamento, sino en la utilización de las posibilidades estructurales de las láminas de hormigón armado. En este caso, al contrario que en los bloques, la sofisticación del comportamiento estructural es de un grado mucho mayor ya que, en general, en estas situaciones se lleva al límite la capacidad resistente de la tipología y del material.

---

<sup>96</sup> Auditorio y Capilla de Kresge MIT Cambridge, Massachussets 1950-1955. Terminal en el Aeropuerto JFK de New York, 1956-1962

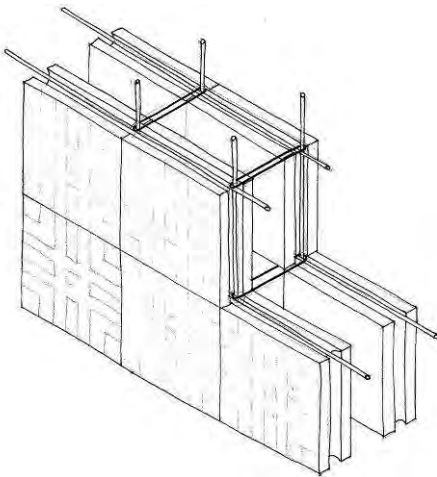
Los ejemplos que se engloban en este tipo de utilización parten del comportamiento laminar del hormigón. Este es el caso de la Casa de la Cascada, los pilares del edificio administrativo Johnson Wax y de su torre de investigaciones, las propuestas para el puente Butterfly Wings o el Guggenheim. En estos proyectos, a pesar de su gran intuición estructural, requirió la colaboración de los ingenieros de estructuras Mendel Glickman y William Wesley Peters, y de J. J. Polivka a partir de 1946. Este planteamiento fue la antítesis de los modelos tradicionales “post and beam” (retícula de pilares y vigas) y consiguió la integración del espacio con la arquitectura a través de la continuidad estructural y el entrelazado o transición entre elementos. El ejemplo más claro pudo ser el de las rampas del Guggenheim, que no presentaban discontinuidades, acompañando así todo el recorrido. Para ello Wright aprovechó los conocimientos de Polivka sobre el comportamiento laminar del hormigón y el análisis fotoelástico. En este sentido, el concepto arquitectónico de Polivka sobre la estructura conectó de nuevo con la idea orgánica de Wright.



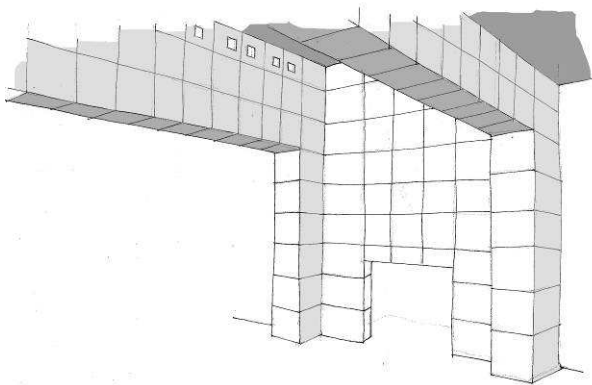
**Fig. 2.7.1** La cubierta de la Iglesia Unitaria está formada por un entramado de vigas de hormigón que se apoyan en los cuatro pilares principales interiores y en el sistema de columnas que definen el perímetro.



**Fig. 2.7.2** Wright propuso en 1901 para la construcción de unas viviendas económicas la utilización del hormigón como material fundamental. Paralelamente, el nuevo material suponía una garantía de resistencia al fuego inusual en las construcciones tradicionales con estructura de madera o de acero.



**Fig. 2.7.3** El sistema block es un método constructivo que engloba la estructura, cerramientos y acabado, basado en un módulo tipo de hormigón prefabricado. El muro o elemento estructural se forma a partir del relleno con hormigón en masa del espacio entre dos piezas. La forma acanalada del perímetro de las piezas permite la colocación de una armadura, tanto horizontal como vertical, que garantiza la unión entre piezas y configura un entramado “tejido” sobre el que Wright basó varios de sus edificios.



**Fig. 2.7.4** Wright no solo utilizó este sistema para formar muros. Las piezas que componen el método constructivo sirven también para generar otros tipos de elementos estructurales, como vigas o columnas. Este es el caso de la casa Freeman, donde el tejido de bloques establece la relación entre las diferentes partes.



**Clasificación de obras HORMIGÓN Y TEJIDO**

OBRA		ESTRUCTURA	COMENTARIOS
House for Harry E. Brown, scheme 2. Genesco, Illinois. 1906	Proyecto	HORMIGÓN	Primera casa proyectada con el sistema block. Prefabricación con piezas de hormigón que cumplen la función de estructura, cerramiento y ornamento.
American System Ready-Cut Houses. 1913	Proyecto	HORMIGÓN	Antecedente de las primeras propuestas de viviendas construidas con estructura de hormigón.
House for Aline Barnsdall (Hollyhock house). Los Angeles, California. 1916	Construido	HORMIGÓN	Una de las primeras casas construidas con hormigón, aunque el sistema block no parece haberse utilizado como elemento expresivo.
Study for Block House in Textile Block Construction. Los Angeles, California. 1921	Construido	HORMIGÓN	Estudio de una vivienda utilizando el sistema block. Todos los alzados y plantas están modulados en relación a la pieza tipo.
La "Miniatura" House for Alice Millard. Pasadena, California. 1923	Construido	HORMIGÓN	Primer edificio construido con el sistema block. Prefabricado de una pieza tipo de hormigón que hace la función estructural, de cerramiento y ornamento.
House for Charles Ennis. Los Angeles, California. 1923	Construido	HORMIGÓN	Sistema block.
House for Samuel Freeman. Los Angeles, California. 1923	Construido	HORMIGÓN	Sistema block utilizado también para formar vigas y pilares.
Doheny Ranch Resort. Los Angeles, California. 1923	Proyecto	HORMIGÓN	Aplicación del sistema block en un proyecto de mayor envergadura.
Block System. 1926	Proyecto	HORMIGÓN	Especificaciones constructivas del sistema block.
Arizona Biltmore Hotel. Phoenix, Arizona. 1926	Construido	HORMIGÓN	Sistema block.
San Marcos-in-the-Desert, Resort Hotel for Dr. Alexander Chandler. Chandler, Arizona. 1928	Proyecto	HORMIGÓN	Aplicación del sistema block en un proyecto de mayor envergadura.
House for Richard Lloyd Jones n°2. Tulsa, Oklahoma. 1929	Construido	HORMIGÓN	Sistema block ya evolucionado.

OBRA		ESTRUCTURA	COMENTARIOS
House for Herbert Jacobs n°1. Madison, Wisconsin. 1937	Construido	MADERA	Sistema constructivo industrializado, siguiendo la filosofía de las casas Usonianas.
House for Herbert Jacobs n°2. Middleton, Wisconsin. 1943	Construido	MADERA	Sistema constructivo industrializado, siguiendo la filosofía de las casas Usonianas.
Usonian Automatics. 1949	Proyecto	HORMIGÓN	Detalles de piezas prefabricadas de hormigón para las Casas Usonianas.
Tonken House. Cincinnati, Ohio 1954	Construido	HORMIGÓN	Es uno de los ejemplos construidos con el sistema Usonian Automatic, una evolución del sistema block.
William Tracy House. Normandy Park, Washington. 1954	Construido	HORMIGÓN	Aplicación de los bloques Usonian Automatics.



## 2.8 La utilización del acero y el entramado

La utilización del acero como material principal de la estructura se remonta en la obra de Wright a sus primeras construcciones. Como se ha visto hasta ahora, algunos elementos del molino Romeo and Juliet o los voladizos de las Casas de la Pradera se resolvieron gracias a la incorporación de anclajes o vigas de acero respectivamente. La estructura principal del edificio Larkin y las propuestas para el proyecto del Abraham Lincoln Center o el rascacielos de Chicago en 1913 también se resolvieron con el acero como material principal. En todos estos casos, no había una intención espacial concreta para la estructura y su aplicación venía condicionada por los requerimientos resistentes impuestos al edificio, bien por su altura, envergadura o dimensión de los voladizos. Como se ha expuesto anteriormente, Wright intentaba escapar de este tipo de soluciones ya que coartaban en cierto modo las posibilidades espaciales o, por lo menos, no aportaban la integración requerida entre los materiales y el espacio definido. Aun así, se ha podido ver que Wright utilizó en estos proyectos ciertos recursos en la resolución de los detalles que le permitieron mejorar la calidad espacial del entramado, como por ejemplo en la relación entre los pilares y forjados que delimitaban el patio central del edificio Larkin.

El uso del acero como material estructural no sólo representa un hecho en sí mismo sino que es importante también debido a las tipologías que se desarrollaron habitualmente con este material, tales como entramados o sistemas de pórticos. Estas tipologías, en ocasiones, se adoptaron también a través de otro tipo de materiales. La sala de dibujo de Taliesin en Spring Green, resuelta mediante pórticos de madera, fue deudora de estas tipologías. Visto desde una perspectiva más amplia, las retículas estructurales de Mies o Le Corbusier eran una manera de evadirse de esta situación, donde Wright aprovechó la estructura para crear una sensación acogedora próxima a las personas a través de la densificación y organización de los elementos estructurales de madera. La utilización de formas geométricas primitivas a pequeña escala y el propio material estructural produjeron en conjunto un espacio cálido y envolvente [Fig. 2.8.4]. En el caso de Taliesin West, la geometría de los pórticos, también de madera, fue más sencilla y quedaban íntimamente vinculadas a su integración en el desierto de Arizona. [Fig. 2.8.5] Anteriormente a este ejemplo ya evolucionado, la estructura de los edificios Larkin o Lincoln Center se basa en el desarrollo de la misma tipología, mediante pórticos de acero. Al ser obras iniciales, el material como tal no se manifestó directamente, pero sí mediante el ritmo de los pilares que delimitan los patios interiores.

Durante el final de los años treinta parece que Wright recuperó el interés por la estructura de acero. El proyecto de All Steel Houses y la construcción de la Rose Pauson House fueron viviendas con voladizos resueltos mediante vigas de acero ancladas a potentes estribos de cimentación. Parece lógico este retorno a las soluciones con vigas ocultas de acero de la primera época, después de la experiencia de la Casa de la Cascada, por dos motivos: La predilección de Wright hacia un sistema industrializado para desarrollar viviendas asequibles, según la mentalidad usoniana y, posiblemente, debido a la aparición de las graves patologías en la

estructura de hormigón de la casa Kaufmann al poco tiempo de haberse terminado su construcción.

En una entrevista realizada a Frank Lloyd Wright<sup>97</sup>, éste definió la arquitectura orgánica con capacidad resistente a tracción como la verdadera arquitectura moderna. A este principio lo llamó “tenuity” y lo ilustró mediante el entrelazado de los dedos de las manos [Fig 1.4.1], que simbolizaban una unión sutil, flexible, pero a la vez fuerte entre elementos, asociando esta imagen a la de un puente de ferrocarril sobre caballetes [Fig 2.8.1]. El sistema estructural de vigas y pilares, sin embargo, apilaba los elementos unos sobre otros, como un puño sobre otro puño, sin unidad ni resistencia a la tracción.

Para Wright este concepto resultó ser fundamental y se reflejó claramente en todas las tipologías estructurales en general y en la utilización del hormigón en particular, tal como se ha podido ver hasta el momento. En todos estos casos, el acero embebido en la masa de hormigón es el responsable de asumir las tracciones del hormigón y permitir la transición entre elementos estructurales. No obstante hay un pequeño grupo de proyectos donde la presencia del acero como material estructural se expresó directamente sin la presencia del hormigón. La intención formal en estos casos era la de asociar la ligereza de la estructura con la atmósfera interior. Wright sugirió que si los griegos hubiesen tenido al alcance el acero como material estructural habrían hecho arquitectura moderna en lugar de clásica. En cualquier caso, parece interesante destacar este grupo de proyectos que, sin diferir sustancialmente del resto de su obra (en cuanto a los principios de la arquitectura orgánica se refiere), sin embargo se materializaron a través del acero, un material estructural menos habitual en sus edificios, posiblemente por las connotaciones o relación inicial con los esquemas de las retículas estructurales canónicas de finales del siglo XIX.

Lejos de asimilarse a una cuadrícula, la estructura de estos edificios aprovechó las características resistentes y de ligereza del material, bien a través de un entramado de barras rígidas o mediante catenarias y cables tensados. Este aprovechamiento de la capacidad a tracción del acero permitió a Wright diseñar estructuras muy ligeras, acordes con la intención principal del edificio. “*En el último momento, con los planos prácticamente acabados, encontré una manera sencilla de ingeniar nuestra estructura, desechando los planos y prácticamente volviendo a empezar de nuevo sobre una línea que, ahora sé, es mucho mejor y más económica...*”<sup>98</sup> refiriéndose aquí al papel de la estructura de acero de la gran pirámide que cubre la sala principal en la Beth Solomon Synagogue, construida en Pennsylvania en 1954.

Los croquis para la Catedral de Acero y Vidrio de 1926 no definían demasiado la configuración de su estructura. No obstante, en las notas al margen de estos esquemas puede leerse una declaración de intenciones al respecto: “*The spider web (Steel in tension)*”<sup>99</sup>. La disposición en planta a partir de un triángulo equilátero,

---

<sup>97</sup> Entrevista realizada a Frank Lloyd Wright en su suite del Hotel Plaza de New York, en 1953.

<sup>98</sup> Obras completas Frank Lloyd Wright. Volumen 1951-1959, Pág152

<sup>99</sup> “La tela de araña. (Acero en tracción)”

figura estable de por sí tanto geoméricamente como por sus connotaciones simbólicas, sirvió como referencia para el edificio de la sinagoga, donde la estructura del edificio se apoyaba sobre tres potentes pilares de forma rómbica [Fig 2.8.2]. Los tres soportes, a su vez, configuraban un gran trípode sobre el que se desarrollaron el resto de elementos estructurales. A pesar de la intención de Wright de utilizar el acero “en tracción”, la estructura no deja de ser un entramado de barras en celosía con forma piramidal.

En el proyecto de Point Parc Civic Center de 1948, que a priori iba a ser resuelto íntegramente con hormigón, Wright incorporó dos puentes gemelos siguiendo la tipología de puente atirantado, por lo que introdujo, al igual que en la catedral de acero elementos metálicos. En este caso se trataba de tirantes de directriz recta, trabajando exclusivamente a tracción, cuya función estructural quedaba acorde con su expresión formal del conjunto [Fig. 2.8.6].

Un poco más allá, en la propuesta para el Belmont Racetrack Pavillion, proyectado en 1956 y realizado en colaboración con Polivka, aprovechó de nuevo las características del acero (capacidad de asumir tracciones) con un fin claramente formal. Este edificio consistía en una gran cubierta de 450.000 pies cuadrados [41.800m<sup>2</sup>] sin ningún apoyo interior que albergaba la grada de un circuito de carreras de coches. La cubierta ligera, para la que se proponían paneles plásticos, se soportaba mediante un sistema de catenarias de acero entretejidas. La catenaria principal, en el borde de la marquesina, cubría una luz de unos 500m, fuera de los límites razonables de otras tipologías de estructura, anclándose a potentes macizos de hormigón cuya geometría insinuaba su comportamiento resistente [Fig 2.8.3]. En sentido transversal, un sistema de catenarias formando rombos resolvieron la estructura secundaria. Este es el concepto de arquitectura orgánica al que se refiere Wright con el término de “*tenuity*”<sup>100</sup>.

Polivka en este sentido pudo aportar sus conocimientos sobre los materiales plásticos, así como su experiencia como proyectista de puentes de grandes luces. El 6 de febrero de 1957 Wright escribe a Polivka esta carta:

*Mi querido Polivka:*

*Estoy diseñando un pabellón para carreras en Belmont, New York, para Harry Guggenheim, con un coste de quince millones de dólares. No habrá honorarios a menos que se construya.*

*Harry Guggenheim y sus amigos están entusiasmados con ello, pero no pueden hacer nada más hasta que les dé algunas imágenes de algún conocido ingeniero y un coste aproximado de la construcción. ¿Estaría usted interesado en proporcionar estas valoraciones? ¿Cuáles serían sus honorarios si seguimos adelante? Venga por aquí y quédese unos días a mi costa.*

*Sinceramente suyo*

*Frank Lloyd Wright*<sup>101</sup>

---

<sup>100</sup> El concepto “Tenuity” es de difícil traducción literal. Se ha comentado su significado conceptual en el apartado 1.1.4

<sup>101</sup> Polivka Papers. Folder 1.10\_16. Carta de Wright a Polivka 6 de febrero de 1957

La respuesta no se hizo demorar y el 10 de marzo de 1957, Polivka ya trabajaba al respecto:

*Elaboré aquí una alternativa estructural al diseño de su edificio, realmente bonito y sin precedentes, por supuesto absolutamente de acuerdo con su concepción original, la cual parece más económica y estructuralmente funcional. Tuve en consideración la forma más práctica de las hojas de plástico, como están dispuestas en la actualidad (después de recopilar algunos datos) y le enviaré los cálculos y detalles estructurales en uno o dos días, acompañados por la estimación revisada.<sup>102</sup>*

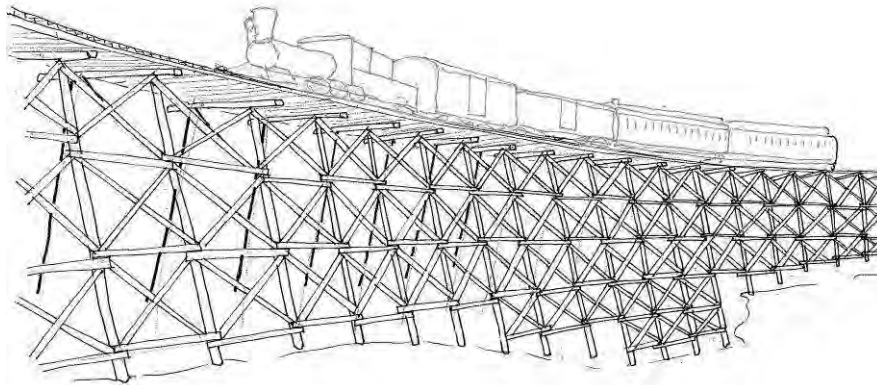
El pabellón anejo al Marin Country Civic Centre, diseñado también en 1957, pareció seguir también un esquema de catenarias, en este caso para cubrir toda un área de exposición. Las catenarias se dispusieron como pórticos entre dos soportes de forma triangular. Estos soportes a su vez trasladaban el anclaje de la catenaria hasta la base. La imagen que Wright presentó del interior de la exposición intentaba simular un único gran espacio bajo el que se desarrolla toda la actividad, sin soportes intermedios que interfirieran la visión, cubierto por una estructura que podría haber sido la cubierta del propio universo de Wright.

La tendencia de estas últimas obras induce a pensar que, si Wright hubiese vivido unas cuantas décadas más, su interés hacia este tipo de estructuras tensadas seguramente hubiese ido creciendo. No hay que olvidar que el atirantado y zunchado con barras de acero del viejo molino Romeo and Juliet reforzó en cierto modo este interés por parte de Wright respecto a las propiedades del acero (ligereza en relación a la resistencia a tracción). A una escala mucho mayor, en la Torre de la Milla, en la que también Polivka trabajó, para poder reducir la frecuencia de vibración se reforzaba su estructura mediante haces de cables tensados en los planos de las fachadas, recordando de manera muy directa a las barras de anclaje contra la roca de contrapeso del molino.

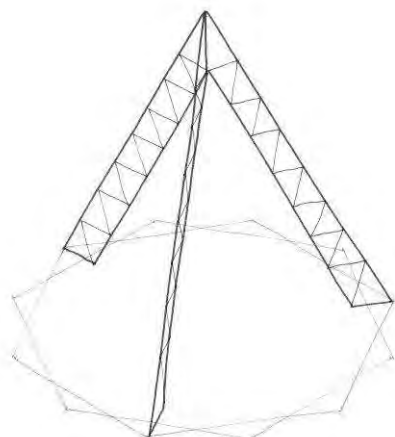
Aunque el hormigón ha estado presente en la obra de Wright de manera muy evidente, el acero como material y como las tipologías donde se manifiesta, también ha ido evolucionando desde las primeras obras. Como se expondrá en la tercera parte, en el proyecto del Guggenheim Museum se puso en crisis la utilización del hormigón, apuntándose hacia una sustitución por un entramado de acero. Esto pone de manifiesto la importancia en la elección del material de la estructura en relación al edificio. Quizás la historia de la arquitectura del siglo XX habría dado un giro si esta propuesta se hubiese llegado a desarrollar. Una decisión a nivel estructural puede condicionar de manera irrevocable el resultado de la arquitectura a la que sirve y la cuestión es que, como es sabido, finalmente el Guggenheim Museum se construyó con una estructura formada por láminas de hormigón, pero esto forma ya parte del siguiente apartado de esta tesis.

---

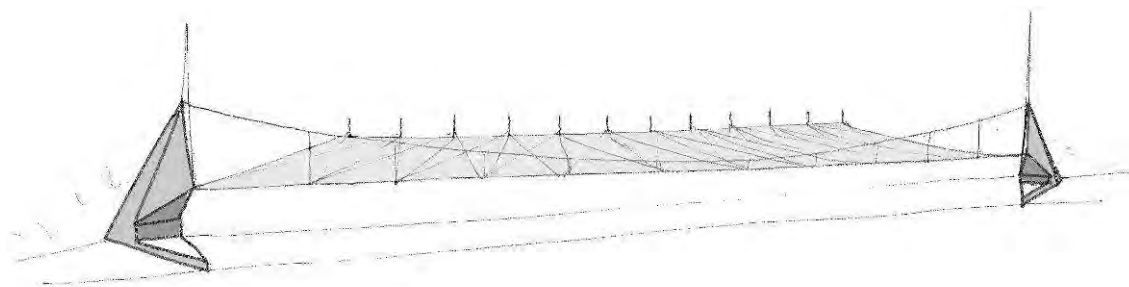
<sup>102</sup> Polivka Papers. Folder 1.05\_49. Carta de Polivka a Wright 10 de marzo de 1957



**Fig. 2.8.1** Los antiguos puentes de ferrocarril sobre caballetes (*railway trestle bridge*) ilustran el concepto de “Tenuity” explicado por Wright, donde la unión entre las partes es flexible, pero a la vez firme, extendiéndose como un medio continuo hasta configurar el total de la arquitectura. En contraposición, el sistema de pilares y vigas (*post and beam*) apila los elementos unos encima de otros, sin resistencia a la tracción ni unidad del conjunto.

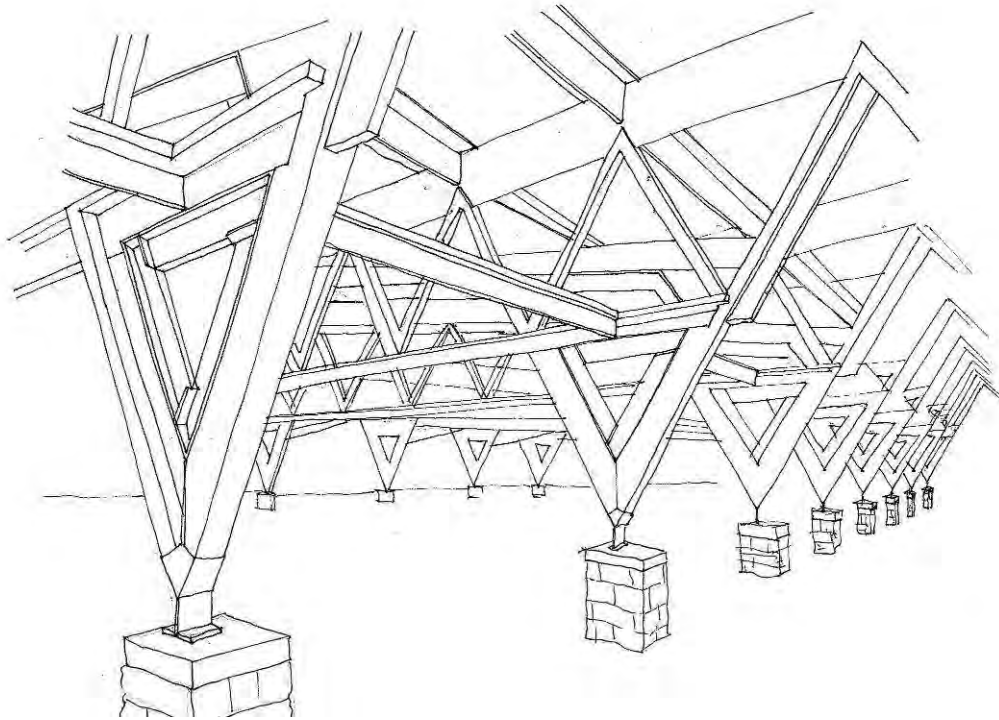


**Fig. 2.8.2** El esquema estructural de la Catedral de acero y vidrio se basa en la estabilidad del triángulo. La estructura principal se dispone a modo de tripode, a partir de la cual se genera la gran cubierta de vidrio del edificio.

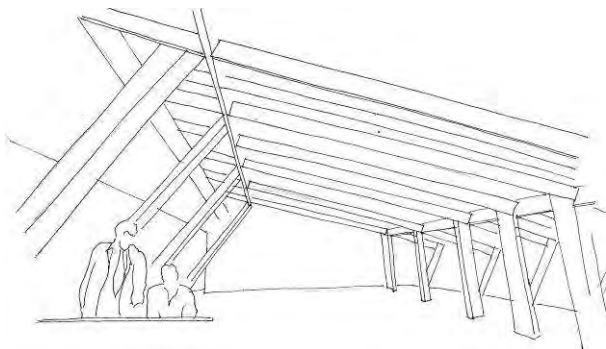


**Fig. 2.8.3** La estructura del Pabellón de Belmont se basa en la capacidad a tracción del acero. Unos potentes estribos situados en los extremos del graderío soportan la catenaria longitudinal desde la que nacen catenarias transversales hacia la parte posterior de la grada.

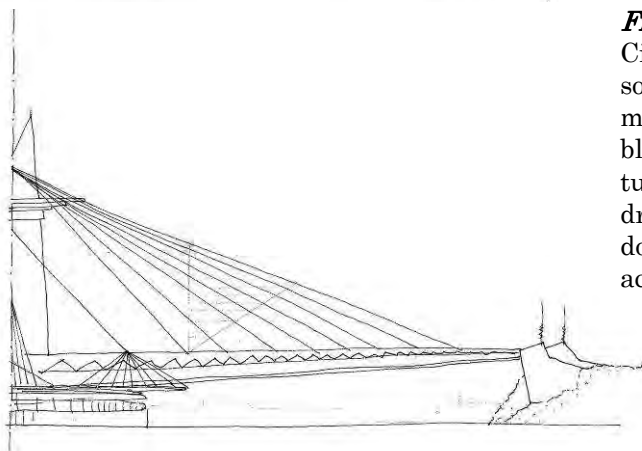




**Fig. 2.8.4** La estructura de la sala de trabajo en Taliesin, Spring Green, está formada por una sucesión de cerchas de madera trianguladas. Los apoyos de las cerchas se configuran mediante una prolongación de sus barras, formando también un triángulo de orden mayor.



**Fig. 2.8.5** En Taliesin West, la estructura de la sala de dibujo se resuelve también mediante una estructura porticada de vigas y tornapuntas de madera. En el exterior, las vigas retornan hacia el interior mediante dos giros de 90°



**Fig. 2.8.6** Los dos puentes del Point Parc Civic Center se plantean mediante una solución atirantada desde un mastil común central. La sección variable del tablero insinúa su funcionamiento estructural, de manera que los puentes se podrían entender en voladizo, resolviéndose gracias al conjunto de cables de acero que los atirantan.

***Clasificación de obras ACERO Y ENTRAMADOS***

<b>OBRA</b>		<b>ESTRUCTURA</b>	<b>COMENTARIOS</b>
Steel Cathedral for William Norman Guthrie. New York. 1926	Proyecto	ACERO	Gran estructura metálica en forma de trípode.
Taliesin Fellowship. Spring Green, Wisconsin. 1932-39	Construido	MADERA	Pórticos de madera que Wright denominó "El bosque abstracto".
Taliesin West. Scottsdale, Arizona. 1937	Construido	MADERA	Pórticos de madera.
Beth Sholom Synagogue. Elkins Park, Pennsylvania. 1954	Construido	ACERO	Organización parecida a la "Steel Cathedral" 1926. Pirámide gigante de vidrio con estructura de acero soportada en tres puntos (trípode).
Exhibition Hall for Marin County Civic Centre. San Rafael, California. 1957	Proyecto	ACERO	Cubierta realizada mediante un sistema de cables (o catenarias).
Trinity Chapel. Norman, Oklahoma. 1958	Proyecto		Esquema basado en la disposición triangular de la planta.



## 2.9 Colaboraciones con Jaroslav Joseph Polivka

Jaroslav J. Polivka conoció a Wright a través de las publicaciones europeas de sus obras, anteriores a 1930, como la monografía “*Aus dem Lebenswerke eines Architekten*”<sup>103</sup> o “*Frank Lloyd Wright ausgeführt bauten*”<sup>104</sup>. Estos textos tuvieron gran trascendencia a la hora de difundir la obra temprana de Wright en Europa y la admiración de Polivka por los proyectos de Wright se contextualizó en el ambiente universitario donde desarrollaba sus investigaciones. Su compañero de universidad Antolin Raymond, arquitecto checo que desarrolló también parte de su carrera en Estados Unidos, trabajó para Wright en la redacción del proyecto del Hotel Imperial en Tokio.

Cuando Polivka emigró a Estados Unidos y retomó el contacto con antiguos compañeros europeos, seguramente recuperó también el entusiasmo por poder llegar a conocer a Wright personalmente. A raíz de las declaraciones realizadas por Wright en *Architectural Forum* de 1946 a propósito de los ingenieros, Polivka se animó a contestarle personalmente mediante una carta.<sup>105</sup> En el momento en que se conocieron, Polivka era ya una autoridad en diseño estructural, especializado en estructuras laminares, puentes y estructuras industrializadas, así como en la aplicación de nuevos materiales. Pero lo más importante fue su intuición en cuestiones estructurales y su innovación en el análisis de modelos foto-elásticos. Puede ser que la colaboración se iniciase no por destacar ambos en sus respectivas disciplinas, sino por la frustración de Wright al ver dificultada la materialización de la imponente rampa en espiral del Museo.

Las primeras propuestas que los ingenieros hicieron a Wright para la estructura (hacia 1943) no le satisfacían. Wright pensaba que los éstos colocaban demasiados pilares y eso iba en contra de la concepción espacial del edificio. En el primer contacto con Polivka, éste corroboró esa misma impresión por lo que Wright le propuso resolver este problema mediante una estructura en espiral, consiguiendo la estabilidad del conjunto sin apoyos interiores. Para ello era necesario utilizar complejos sistemas matemáticos así como el análisis foto-elástico del comportamiento de la lámina en las uniones con los pilares<sup>106</sup>. Lo que verdaderamente les unió fue que ambos creían que la auténtica belleza proviene de la honradez estructural y de la naturalidad del comportamiento de los materiales, denominador común de la arquitectura orgánica. En este sentido el interés mutuo

---

<sup>103</sup> “*Desde el trabajo de la vida de un arquitecto*” publicado en 1926 en Alemania por H. de Fried.

<sup>104</sup> “*Frank Lloyd Wright construido*” publicado en 1910-11, también en Alemania.

<sup>105</sup> Polivka Papers, Folder 1.02\_01. Primera carta de Polivka a Wright, febrero de 1946.

<sup>106</sup> Estos puntos de la estructura son especialmente delicados a la hora de analizar el conjunto, ya que la variación de tensiones es muy rápida en un espacio reducido. Actualmente se denominan “regiones D” o regiones de discontinuidad y se abordan o bien aplicando la teoría de bielas y tirantes o a partir de un análisis mediante elementos finitos.

por este aspecto convergía en la relación de amistad mutua con Eduardo Torroja, con quien compartieron el interés hacia la lógica estructural de los materiales.<sup>107</sup> A partir de estos primeros intercambios de impresiones, Polivka se desplazó a Taliesin y comenzó a trabajar en el desarrollo de la estructura de la Modern Gallery, proyecto en el que Wright llevaba trabajando ya tres años. Debido a que este proyecto se dilató en el tiempo hasta la muerte de Wright y prácticamente también hasta la de Polivka, se produjeron paralelamente otras colaboraciones, siempre en situaciones comprometidas donde las soluciones estructurales ya establecidas no resultaban válidas. De esta manera y cronológicamente, los siete proyectos donde colaboraron juntos son:

1. The Modern Gallery (The Guggenheim Museum) New York, 1943. Wright propuso para el arte no convencional un edificio también poco convencional, desarrollado a través de una rampa en forma de espiral logarítmica. Polivka le proporcionó sus conocimientos sobre comportamiento laminar y un análisis estructural mediante modelos foto-elásticos, para justificar ante las *New York Building authorities* que el edificio era seguro. El trabajo de Polivka permitió a Wright eliminar soportes en el interior de la rampa.
2. The Johnson Wax Tower, Racine, Wisconsin, 1946. En 1936 Wright había proyectado el edificio administrativo de la misma compañía con su famosa malla de columnas dendriformes. Para la ampliación diseñó una torre de laboratorios en la que, desde un potente soporte central los forjados surgía en voladizo “como las ramas de un árbol”. Polivka se encargó del análisis y diseño de la estructura, incluyendo el sistema único de raíz pivotante, “*tap-root*”, utilizado también en la Torre Price.
3. The Rogers Lacy Hotel, Dallas Texas, 1946. Con sus cincuenta y cinco plantas, pretendía ser el edificio más alto al oeste del Mississippi. Wright proponía cerrarlo con espectaculares paneles de vidrio en forma de diamante, para lo que Polivka también le asesoró gracias a sus conocimientos sobre las propiedades de este material.
4. The V.C. Morris House, San Francisco, California, 1949. Vivienda al borde del acantilado desarrollada mediante círculos concéntricos de hormigón armado, algunos en voladizo. Polivka investigó una compleja cimentación debida a la situación de la casa, así como la posibilidad de utilizar unos paneles aislantes gunitados, para aligerar la estructura y mejorar su comportamiento térmico.
5. The Butterfly Bridge, San Francisco, California 1949. El arco de hormigón armado para cruzar la bahía de San Francisco fue claramente una idea de Polivka y es el elemento más significativo del proyecto de Wright. Incorporación de los “arcos de mariposa”, utilizados como recurso formal en muchos otros proyectos de Wright. La propuesta ofrece considerables ventajas económicas y de mantenimiento así como su respuesta frente a los terremotos.

---

<sup>107</sup> Eduardo Torroja estuvo en Taliesin con Wright y Polivka en 1950 y a partir de ese encuentro, se fraguaron las bases del texto de Torroja, “*Razón y Ser de los Tipos estructurales*”, cuya primera edición se pretendía que fuese en Estados Unidos bajo el título “*Philosophy of Structures*”

El proyecto del Butterfly Bridge representó una perfecta simbiosis entre arquitectura e ingeniería, siendo el cenit de su trabajo juntos.

6. The Belmont Racetrack Pavilion, Long Island, New York, 1956. Estructura de cables de acero con forma de catenaria de la que se suspendía una enorme cubierta de paneles plásticos. Polivka estudió y analizó detalles, materiales y costes para los aproximadamente 41.800m<sup>2</sup> del edificio.
7. The Mile High Illinois Building, Chicago, Illinois 1956. El proyecto del rascacielos incorporaba varios de los elementos propuestos en el Rogers Lacy Hotel y en la Johnson Tower research, pero a la escala de 528 plantas de altura. En este proyecto, Polivka analizó las oscilaciones de otras estructuras en altura, empezando por la torre Eiffel. A partir de sus resultados, investigó la manera de eliminar las vibraciones en esta torre que hicieron posible su construcción

De toda esta relación, únicamente los dos primeros proyectos llegaron a construirse, pero su análisis demuestra la importancia del papel que Polivka jugó en estas obras, no sólo como ingeniero estructural, cuya experiencia es innegable, sino también por su sensibilidad arquitectónica a la hora de entender los límites y potencial del hormigón armado. El papel de Polivka durante los últimos años de la vida de Wright fue realmente importante, tanto por la participación del Guggenheim como por su extraordinaria habilidad en el campo del hormigón armado, que posibilitó a Wright algunos de sus proyectos más creativos.

Lo que llama la atención es que, ante tal evidencia, su talento no haya sido reconocido de la misma manera como ha sucedido en otros casos. Posiblemente su rol de ingeniero de estructuras (a pesar de su formación arquitectónica) quedó subordinado al del arquitecto, cuyo carácter, en este caso, enfatizó las diferencias.

En este sentido, Polivka intentó recuperar durante los últimos años de su vida un reconocimiento merecido, ofreciendo a varias revistas de arquitectura e ingeniería, como *Architectural Forum* o *Consulting Engineer*, aportar detalles respecto a su trabajo en colaboración con Wright. Este intento se materializó en varios artículos aunque debido a la muerte de Polivka en 1960 no llegaron a tener demasiada difusión.

*El Sr. Wright, con carácter excepcional, me pidió que pusiera mi nombre y posición en los dibujos y también en los informes y cálculos. Ciertamente estoy muy orgulloso de obtener el reconocimiento de este gran arquitecto. En su último libro – The Testament – me firmó con unas palabras halagadoras: Al buen doctor Polivka con estima y agradecimiento – Frank Lloyd Wright, 1958.<sup>108</sup>*

---

<sup>108</sup> Polivka Papers. Folder 1.8\_15, 29 de abril de 1959. Carta dirigida al arquitecto Aaron G. Green, antiguo colaborador de Wright.





*... quiero llamar la atención de ingenieros y arquitectos sobre la importancia de elegir cuidadosamente el tipo de estructura a adoptar antes de comenzar a dimensionar...<sup>1</sup>*



## **El Guggenheim Museum a través de su estructura**

---



---

109 Polivka Papers, Folder 1.7. Carta de Eduardo Torroja a J.J. Polivka el 28 de julio de 1950, explicándole cual era su intención respecto al contenido del texto que estaba preparando - *Razón y ser de los tipos estructurales*.

Interior del Guggenheim. Imagen del autor.

### 3.1 Contexto histórico

En la década de los años treinta, previamente a recibir el encargo del Guggenheim, Wright había trabajado en varios proyectos que, en cierto modo, apuntaban hacia algunas opciones del proyecto del museo. Superada ya la época donde la utilización del hormigón se habría limitado a la construcción mediante el sistema “block”, los proyectos del Capitol Journal de 1931, de la Casa de la Cascada de 1935 o del edificio Administrativo Johnson Wax, demostraron una clara apuesta por el hormigón como material estructural con una predominante componente arquitectónica. Este material moldeable permitía resolver una de las premisas de origen del Guggenheim Museum y de la arquitectura orgánica de Wright en general: mantener la unidad del conjunto a través de las propiedades monolíticas del material. El hormigón armado también le permitía aproximarse a las soluciones arquitectónicas, por lo que edificios tan variados como los citados o la propuesta de rascacielos en Chicago de 1931, surgieron de un planteamiento estructural a partir esta técnica. El otro tema recurrente durante esa década era el del voladizo. Toda la serie de casas en torno a la Fallingwatter, bien resueltas mediante entramado de acero, madera u hormigón, pretendían expandirse hacia el entorno natural a través de esta tipología estructural. De la misma manera, los proyectos urbanos de este período, como Crystal Heights en 1929 o todas las torres herederas de la propuesta de Sant Mark’s Towers, se configuraron a partir de la superposición de voladizos, en estos casos resueltos siempre mediante el hormigón como material estructural. Como veremos, el planteamiento del edificio del museo, desde el inicio, estuvo claramente influenciado por estos esquemas de voladizos superpuestos, por lo que, parece lógico que Wright tuviese inicialmente en mente el hormigón como la opción principal para conseguir sus objetivos.

No obstante, la perspectiva que hay que tomar debe ampliarse a obras anteriores. Por un lado, la aproximación al edificio con un atrio central enlazaba con la intención de elevar a categorías superiores la atmósfera interior del mismo, como fue el caso del Edificio Larkin de 1903 o el Templo Unitario de 1904. Paralelamente, la continuidad de circulación a través del edificio, sin ningún tipo de interrupciones, se puede remontar a la propuesta del Observatorio y Planetario Gordon Strong, de 1924, primer proyecto en forma de espiral ascendente. Es significativo que desde ese momento y hasta el encargo del Guggenheim, Wright no volvió a utilizar este esquema. En 1943, después de las primeras propuestas del museo, retomó la temática de la rampa en espiral y surgieron propuestas como el Centro Cívico Point Park y la tienda Morris en 1947 o el garaje Kaufmann en 1949, de una envergadura mucho mayor que el Guggenheim. Parece ser que Wright, una vez comenzado el proyecto del museo, vio más asequible resolver las dificultades estructurales necesarias para materializar este tipo de edificios.

Hay que señalar que los encargos de la torre de investigaciones de la Johnson y la Modern Gallery fueron de desarrollo paralelo. El proyecto de la torre lo comenzó un año más tarde, en 1944, aunque se acabó de construir en 1951. Los dos edificios, a pesar de ser diferentes, poseían una particular concepción estructural y un denominador común: la participación de J.J. Polivka. Las circunstancias de cada una de las colaboraciones de Polivka con Wright fueron diferentes, aunque en los

dos casos la estructura enfatizaba la percepción espacial. En cuanto al Guggenheim, la estructura se concibió como una envolvente continua. Respecto a la torre, ésta resulta ser el negativo de la fachada envolvente de tubo de pirex, solución utilizada ya en los lucernarios del edificio administrativo. Curiosamente y como se verá más adelante, el método de cálculo utilizado por Polivka en ambos casos fue el mismo.

En junio de 1943 Wright recibió el encargo para proyectar un museo de pintura “no-objetiva”. Solomon R. Guggenheim y la Baronesa Hilla Rebay, directora de la Fundación del mismo nombre, a tenor de los movimientos de los grandes museos de la ciudad de New York en relación al Arte Moderno, tomó la iniciativa de construir un edificio específico para albergar su conjunto de pintura “no objetiva”. La colección de este tipo de arte adquirida por la fundación había tomado cierta envergadura durante los años treinta y sus gestores consideraban que era el momento de albergarla de una manera acorde con las peculiaridades espaciales de la propia pintura.

Hilla Rebay consideraba a Wright uno de los maestros de la arquitectura contemporánea, especialmente por su particular percepción del espacio interior, siempre matizado a través de la luz natural. En ese momento, Wright había finalizado ya uno de sus edificios más innovadores en ese sentido, el edificio administrativo de la Johnson Wax and Co. donde se utilizaba el tubo de pirex como cerramiento en fachadas y cubierta para suavizar las entradas de luz entre los elementos estructurales del edificio. En ese caso, Wright había conseguido una prueba de su gran nivel de creatividad espacial, resaltando las cualidades espaciales del edificio a través de su concepción estructural. De la misma manera que Wright había elevado a la categoría “espiritual” los edificios para el trabajo<sup>110</sup>, la intención de Rebay era la de conseguir el mismo objetivo en cuanto al museo que pretendían construir: un templo al espíritu que permitiese una aproximación del público a la pintura “no-objetiva” en un ambiente adecuado. *“Necesito un luchador, un amante del espacio, un creador, un pionero y un hombre sabio”*.<sup>111</sup>

El contrato incluía la búsqueda de un emplazamiento para el edificio por lo que Wright comenzó proponiendo una ubicación donde la integración del edificio con la naturaleza estuviese acorde con sus planteamientos habituales. Su intención era desarrollar un edificio en planta baja, entrelazado con el entorno de la misma manera que cualquiera de las dos implantaciones de Taliesin. Pero la idea de los promotores del museo, al contrario, era un enclave predominantemente urbano, por lo que el edificio, a causa de la repercusión del coste del suelo, debía desarrollarse en vertical. En los primeros planteamientos expuestos a finales de 1943 todavía no se había formalizado la compra de ningún solar, aunque ya se había descartado la posibilidad de una ubicación periurbana fuera de Manhattan.

---

<sup>110</sup> Desde el Edificio Larkin de 1903, hasta el edificio administrativo de la Johnson Wax en 1936, donde llega al summun de este concepto.

<sup>111</sup> CASTRO CHICOT, José Ramón. *Frank Lloyd Wright y el Guggenheim Museum* ETSAB. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona 2000. Pág. 186

Aparte del emplazamiento, otra de las premisas de partida era la ausencia de escaleras; el edificio debía desarrollarse de manera continua para permitir una mayor proximidad del público a las obras de arte. Una galería principal rodeada de los servicios habituales de un pequeño museo se complementaba con un edificio satélite. Este esquema ha perdurado desde los primeros esquemas hasta la solución definitiva.

Pero independientemente del programa y de las particularidades de éste, el objetivo principal de los promotores era el de crear un edificio con presencia monumental, un todo indivisible que potenciase la percepción de las obras de arte en un entorno casi sobrenatural. El monolitismo del conjunto, difícilmente alcanzable mediante una construcción convencional, fue también una de las particularidades perdurables hasta su construcción. Como se verá más adelante, esta premisa sirvió para reconducir el proyecto en los momentos de crisis durante el desarrollo, apoyándose Wright en argumentos de orden técnico para respaldar la opción arquitectónica. De otro modo, si las variantes de la estructura hubiesen trascendido por otras soluciones constructivas, el monolitismo del conjunto y, por tanto la contundencia final, se hubiesen visto claramente afectados.

La disposición característica del museo mediante una rampa descendente se concretó al poco tiempo de comenzar. De unos primeros esquemas de forma hexagonal, la primera forma en espiral se basaba en la circulación ascendente<sup>112</sup> de la rampa. No obstante, Wright decidió invertir la disposición de la misma al poco tiempo y, a mediados de 1944, con el solar ya definitivo, las bases del edificio quedaron preestablecidas. Desde marzo de 1944 hasta 1946 el desarrollo del proyecto para el museo de pintura no objetiva, la Modern Gallery, discurrió bajo las directrices de Solomon Guggenheim y su asesora Hilla Rebay, llegándose a presentar en enero de 1946 una maqueta de una versión completamente definida para ser construida. Sin embargo los problemas para Wright acababan de comenzar. Por un lado recibió críticas sobre la disposición de los cuadros y por otro lado sus ingenieros no encontraban la manera de resolver la estructura sin la utilización de pilares interiores. En la maqueta que presentó se podían observar estos pequeños pilares que, en cualquier caso, resultaban indispensables para que el modelo pudiera abrirse por la mitad sin desmoronarse.

En febrero de 1946 comenzó la colaboración con Polivka. Los asesores habituales de Wright opinaban que la espiral propuesta por Wright sobrepasaba los límites estructurales del hormigón así como una deformación admisible. Polivka abordó el problema desde una visión global de la estructura, realizando en paralelo una aproximación numérica y empírica, mediante maquetas generales donde pudiese verificar las deformaciones y, de detalle, para analizar mediante fotoelasticidad el comportamiento específico de los nudos. Todos sus estudios se tradujeron en un extenso informe de 97 páginas que demostraba la viabilidad de la estructura según el planteamiento inicial. Wright respondió a este profundo estudio mediante una

---

<sup>112</sup> En las primeras propuestas el sentido de circulación de la exposición era ascendente. El público comenzaba el recorrido en la planta baja e iba subiendo por la rampa hasta el nivel superior, desde donde se descendía a través del núcleo. En el momento que Wright dio la vuelta a la espiral, el recorrido de la exposición pasó a ser el inverso; el público ascendía por el núcleo hasta el nivel superior y a partir de ahí se descendía progresivamente, de manera continua, según avanzaba la exposición hasta la planta baja.

breve carta a Polivka, confesando su incapacidad por comprender los cálculos, pero muy satisfecho al poder comprobar que éstos corroboraban su intuición.

Una vez concretada la estructura de hormigón, Wright descartó utilizar cualquier tipo de revestimiento con placas de mármol en las fachadas, al considerarlo ordinario, como tantas otras obras de New York. La intención de crear un edificio monolítico y sin juntas, se materializó a través de la continuidad del material y la estructura. A finales de 1946 ya se habían redactado planos para poder llevar a cabo la construcción del edificio, pero la crisis económica mundial de posguerra y posteriormente la muerte de Solomon en 1949, bloquearon de nuevo la construcción del edificio.

Sin entrar en el detalle de los pormenores respecto a la relación entre Wright y los nuevos gestores de la fundación, las premisas principales se transformaron para conseguir un edificio económicamente viable. El presupuesto inicial de 1M\$ se había rebasado con creces y, a pesar de que Solomon Guggenheim había dejado en su testamento 2M\$ destinados a la materialización del museo, la construcción se hacía inabordable. La parcela se había ido ampliando mediante la compra de solares anexos para conseguir una mayor holgura en el desarrollo del programa y evitar así un desarrollo en vertical del edificio demasiado acusado que Wright no deseaba. Con la intención de reducir el coste de la construcción, la planta noble se trasladó de la primera planta a la planta baja, por lo que la rampa arrancaba desde el nivel de la calle, quedando con seis niveles completos.

Con el mismo fin, la estructura también sufrió transformaciones formalizándose una pauta de soportes apantallados cada 30° que simplificaban enormemente el funcionamiento estructural. En un cierto momento se llegó a plantear el sustituir la estructura de hormigón por un entramado de acero recubierto de paneles, una solución socialmente aceptada en New York, pero de características arquitectónicas muy diferentes a la de la lámina de hormigón. Se descartó también la posibilidad de considerar un pretensado, debido a su elevado coste y, otras opciones, como la de utilizar una armadura *deployé*, también se descartaron debido a que las normativas de edificación en New York en ese momento no lo permitían.

Finalmente, a finales de 1952, unos nuevos planos estaban listos para la construcción del edificio mediante una estructura de hormigón armado de comportamiento más sencillo, pero sin perder en absoluto la apariencia interior de continuidad así como el resto de características espaciales planteadas desde el origen. La pauta tan marcada de estas costillas transformó el espacio interior de un “resorte enroscado” a la estructura del “caparazón del nautilo”, consiguiendo una estructura más ajustada a las premisas presupuestarias.

Los técnicos de la Building Comision de New York, liderados por Harris H. Murdock, denegaron el permiso de obras alegando numerosas objeciones, a pesar de que Polivka argumentó y justificó el correcto comportamiento de la estructura exponiendo los pormenores de los sistemas de cálculo utilizados. Varias de esas objeciones hacían referencia a cuestiones de seguridad frente a incendios del edificio y su particular utilización del tubo de pirex. Wright no tuvo reparos en adaptar el proyecto de manera que se resolviesen estas cuestiones, aunque para él, la mejor argumentación eran sus ya más de 500 edificios construidos basados principalmente en su intuición estructural.

Es importante entender que en 1956, año en el que se comenzó la construcción, los antecedentes en cuanto a estructuras laminares de hormigón, a pesar de ser numerosos y en algunos casos de envergadura, se circunscribían a las formas geométricas canónicas. El Guggenheim, tanto en sus versiones iniciales de planteamiento en forma de resorte como en la definitiva, con forma de nautilo, a pesar de ser de menor dimensión que otros ejemplos construidos, geoméricamente resultaba de una complejidad mucho mayor y, por tanto, su análisis resultaba difícil de abordar mediante métodos habituales.

Hay una cierta analogía entre las primeras versiones del museo y las dos rampas entrelazadas de la Penguin Pool del Zoo de Londres<sup>113</sup>. A una escala menor, su estructura se basaba en la disposición en “tijera” del arranque y la llegada de la rampa [Fig. 3.1.11]. En general, cualquier estructura de tipo laminar se fundamenta en la geometría de la misma, permitiendo la optimización de espesores en función de los esfuerzos solicitantes en cada punto. Esta norma es la que hace posible que este tipo de estructuras sean viables, sin que el peso propio anule la validez de la solución. Para ello es preciso conocer el comportamiento tensional de la estructura y de su forma geométrica, cuestión que analíticamente sólo resultaba posible para formas geométricas canónicas tales como cúpulas, bóvedas, paraboloides hiperbólicos o cualquier superficie fácilmente parametrizable. La rampa definitiva del Guggenheim, como se verá posteriormente, está formada por una superficie generada entre dos directrices curvas. Éstas son espirales cónicas de seis niveles, la curva interior está contenida en la superficie de un cono invertido y la exterior sobre un cono con el vértice en la parte superior. Las diferentes versiones de geometría de esta rampa, desde el año 1943 hasta la finalmente construida, se basaron en diferentes trazados de las curvas helicoidales, siendo éstas ocasionalmente paralelas o inversas, con apoyos intermedios o con un solo apoyo para cada nivel. Como puede apreciarse, la complejidad geométrica del problema sobrepasaba con creces a los modelos conocidos y construidos hasta el momento, donde la geometría se había ceñido a diferentes trazados mucho más sencillos. Esta situación suponía un obstáculo para Wright, que debía demostrar a las autoridades de New York que su intuición era correcta, por lo que el papel de J.J. Polivka resultó clave para el progreso del proyecto.

Las experiencias con hormigón armado se localizaban tanto en Europa como en la arquitectura industrial construida a lo largo de Norteamérica y Sudamérica. Geográficamente a Wright le resultaban próximos los silos de hormigón que entusiasmaron a Mendelsohn o Le Corbusier. En Europa Robert Maillart desarrolló su trabajo especialmente en el campo de los puentes, aunque introduciendo el nuevo material del siglo XX, el hormigón armado. El material requería un conocimiento del comportamiento tensional a la hora de disponer las armaduras y en las primeras obras realizadas con hormigón, la cuestión de la forma resultaba indispensable. De esta manera, en las estructuras diseñadas por R. Maillart puede identificarse el flujo de tensiones en el interior de las secciones, o lo que es lo mismo, una importante contribución de la geometría al comportamiento resistente. En 1924 había proyectado y construido los almacenes Chiasso, a medio camino entre un comportamiento laminar y de barras. En este caso, las cerchas de

---

<sup>113</sup> Berthold Lubetkin 1934

hormigón sustituían los cordones comprimidos por una lámina, también de hormigón, que formaba la cubierta. No era una estructura laminar canónica, pero apuntaba hacia soluciones posteriores, basadas fundamentalmente en la forma de la cáscara. Este es el caso del pabellón de la Exposición Nacional de Zurich en 1939, donde la propia estructura del pabellón manifestaba las posibilidades del material. [Fig. 3.1.13]. Es destacable que este ejercicio pionero fue posterior a las primeras aplicaciones estructurales del hormigón en la obra de Wright y sólo cuatro años anterior al comienzo del desarrollo del proyecto del museo.

Anteriores a la década de los años cuarenta, además de R. Maillart, August Perret, Eugene Freyssinet, Bernard Laffaille o Eduardo Torroja<sup>114</sup>, en España, se habían desarrollado ya estructuras basadas en esta aplicación del comportamiento laminar de superficies curvadas de hormigón. Pero en todos estos casos la geometría de la cáscara se limitaba a trazados de bóvedas (cilíndricas, parabólicas o conoides) o paraboloides hiperbólicos.

La propuesta inicial de Wright rebasaba ampliamente los límites de conocimiento en la aplicación del material de manera que resultaba imprescindible el apoyo de un conocedor de los dos aspectos fundamentales: el análisis de estructuras laminares atípicas y un profundo conocimiento del hormigón como material estructural. Después de los primeros intentos de Mendel Glikman y William Wesley Peters por resolver el problema y, seguramente, debido a los problemas ya manifestados en la estructura de la Casa de la Cascada, la aparición de Polivka en el panorama de ese momento resultó para Wright del todo oportuna. Polivka no sólo era un gran conocedor del hormigón, heredero de la tradición europea de este material, sino también un pionero en el análisis de estructuras mediante métodos novedosos, acordes con las posibilidades del mismo. A su llegada a Berkeley en 1939, lideró junto a Victor di Surevo<sup>115</sup> la instalación del laboratorio de fotoelasticidad de esta Universidad. Este nuevo sistema permitía analizar de una manera visual el comportamiento laminar de un material (tensiones planas), siendo un método precursor del método de elementos finitos. Su aplicación podía resultar de gran ayuda para complementar un análisis estrictamente numérico y Polivka así lo plasmó en un libro titulado *“Analysis of Gravity Load Stresses by Photoelastic Methods”*<sup>116</sup> como método alternativo para el análisis de láminas

---

<sup>114</sup> Polivka era conocedor y admirador de la obra de Eduardo Torroja en España. En 1950 organizó un encuentro en Taliesin entre el ingeniero español y Wright, donde surgió la idea de publicar un libro en el que Torroja desarrollase sus ideas sobre el planteamiento estructural a partir del conocimiento de las propias leyes del material, acorde con los planteamientos orgánicos de Wright. La intención de Polivka era que el libro se publicase en inglés en Estados Unidos, pero finalmente se editó en España bajo el título “Razón y ser de los tipos estructurales”, que Polivka y su hijo Milos tradujeron al Inglés en la versión “Philosophy of structures”. Wright siempre tuvo en buena consideración el trabajo de E. Torroja y, al final de su vida, incluyó su nombre en la lista de los ingenieros de estructuras de mayor prestigio (presentes y pasados), para que interviniesen en la propuesta de la Torre de la Milla.

<sup>115</sup> Profesor que colaboró con Polivka en la instalación del laboratorio de foto-elasticidad en la Universidad de Berkeley.

<sup>116</sup> Polivka, Jaroslav J. Illinois Institute of Technology 1942. El texto se cita como bibliografía en la versión americana del libro de Eduardo Torroja *“Philosophy of structures”*

sometidas a esfuerzos contenidos en el plano. Hay que señalar que la fotoelasticidad normalmente ha servido de apoyo a los problemas abordados numéricamente ya que este método resulta muy útil para visualizar el flujo de tensiones. Sin embargo, por si sólo carece de precisión a la hora de cuantificar valores con exactitud.

A nivel teórico, como veremos, Timoshenko había desarrollado en 1930 una teoría básica de placas expuesta en el Tomo II de su tratado de Resistencia de Materiales<sup>117</sup> que más tarde evolucionó en un nuevo texto sobre Teoría de Placas y Láminas, publicado en 1940. Respecto al hormigón armado, Fritz Leonhardt desarrolló una teoría acorde con el diseño de sus propias propuestas y que ha servido como base a varias generaciones a partir de 1960. También han colaborado al desarrollo de las técnicas del hormigón Fred N. Severud, Noruega 1899-1990, Zürcher Lagerhaus-Gesellschaft, Suiza 1910- , Heinz Isler, Suiza 1926-2009 o Heinz Hossdorf, Alemania 1925-2006 entre otros.

---

<sup>117</sup> TIMOSHENKO, Stephen P. *Resistencia de Materiales Tomo II*. Espasa-Calpe, Madrid 1967. Capítulo III, Placas y envolventes delgadas, págs. 121 a 188. En concreto, en el apartado 29, “Deformación de una placa circular que tiene un agujero en su centro y está cargada simétricamente”, pág. 154, se establecen las bases teóricas del problema de la rampa del museo.





**Fig. 3.1.1-2** Escaleras helicoidales de piedra en el Monasterio de San Pedro de Cardena, Burgos, y en el Convento del Cristo de Tomar, Portugal, ambas construidas en el siglo XVI.



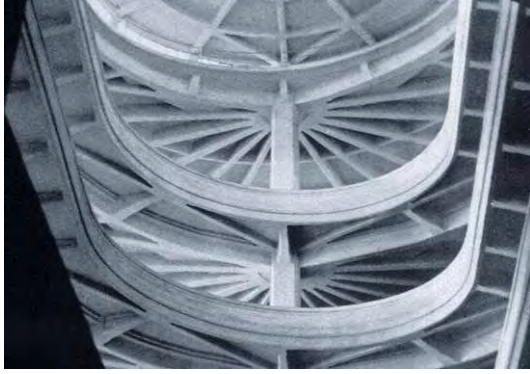
**Fig. 3.1.3** Escalera barroca del Convento de Sto. Domingo Bonaval, Santiago de Compostela, siglo XVII. El ojo de la espiral así como su anchura son de mayores dimensiones que en los casos anteriores.



**Fig. 3.1.4** Escalera de los Museos Vaticanos, construidas en 1932. Con unas dimensiones ya considerables, Giuseppe Momo aborda este problema estructural en un edificio monumental desde el conocimiento de las técnicas del siglo XX. El gran lucernario del espacio circular tiene una curiosa relación con la cubierta vidriada del Guggenheim, cuestión que se analizará más adelante [Fig. 3.8.6].



**Fig. 3.1.5** La torre de los siete jorobados (Edgar Neville, 1944). Película española de terror-ficción donde, a través de la escalera espiral de una enigmática torre, se accede a un submundo. La espiral helicoidal es un elemento con una fuerte carga simbólica, utilizado desde la edad media hasta la actualidad en diferentes ámbitos de expresión artística.



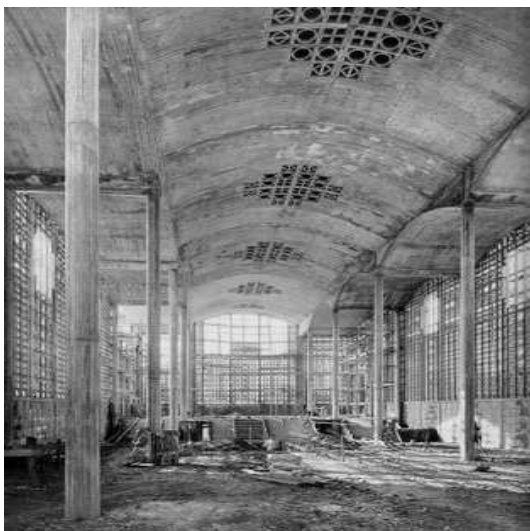
**Fig. 3.1.6** Edificio Fiat-Lingotto, Turín 1916-1923. Giacomo Mattè-Trucco, ingeniero italiano con una profunda conciencia sobre los aspectos arquitectónicos de la ingeniería. El edificio, de formato longitudinal, se desarrolla a través de una rampa que permite el acceso de los vehículos a la cubierta. Toda la estructura se resuelve mediante losas nervadas de hormigón armado.



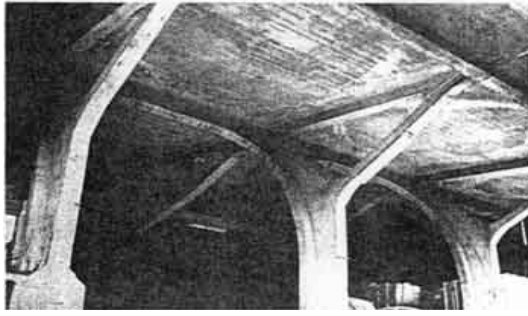
**Fig. 3.1.7** Torre Einstein, Postdam 1917-1921. Erich Mendelsohn. La imagen, procede del libro "Fantastic Architecture" de W.Vostell y D.Higgins, en cuya portada figura el Guggenheim Museum. El denominador común de muchos de los proyectos expuestos es la capacidad plástica del hormigón armado. Mendelsohn, a partir de su viaje por los Estados Unidos, al igual que Le Corbusier, quedó fascinado por la presencia formal de los grandes silos de grano americanos, construidos con este material



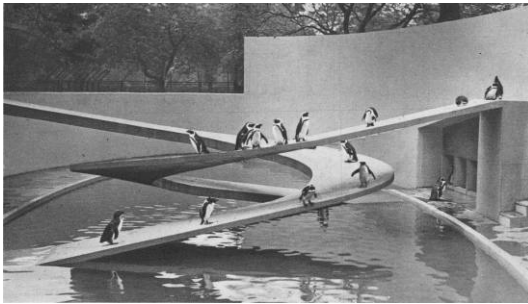
**Fig. 3.1.8** Los Hangares para dirigibles en Orly se construyeron entre 1921 y 1923 en base al proyecto de Eugene Freyssinet. Para poder resolver sus grandes dimensiones (92m de luz y 52 de altura), se utilizó una lámina de hormigón armado. A través de su forma parabólica se eliminaba la presencia de flexiones en la lámina debidas al peso propio, siendo el viento la acción asimétrica principal.



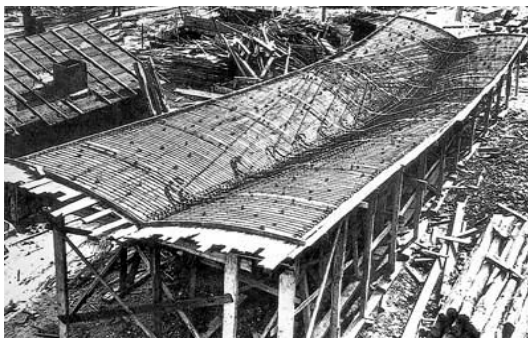
**Fig. 3.1.9** Iglesia de Notre Dame de Raincy, 1922-1923. August Perret otorga a la lámina de hormigón armado una expresión por sí misma, sin añadirle ningún tipo de ornamentación, que dignifica así el material y la estructura, reivindicando su función formal.



**Fig. 3.1.10** Almacenes Chiaso, Robert Maillart 1924, cuya cubierta se resuelve mediante una combinación entre lámina de hormigón y entramado en celosía también de hormigón.



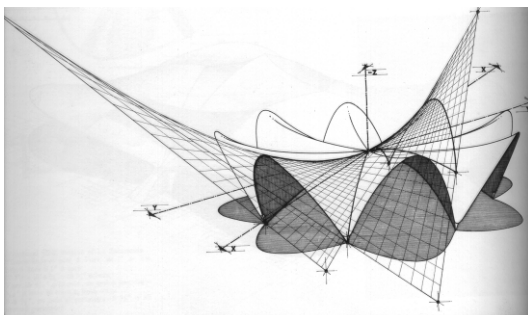
**Fig. 3.1.11** Las rampas de la Penguin Pool del Zoo de Londres, B. Lubetkin 1934, están formadas por dos tramos entrelazados, cada uno independiente del otro y que se basan en el esquema de biela comprimida-traccionada para resolver el voladizo.



**Fig. 3.1.12** Hipódromo de la Zarzuela, Madrid 1935. Eduardo Torroja. A pesar de la mayor complejidad de la forma respecto a los ejemplos anteriores, la geometría de la lámina busca la canalización de las tensiones hacia un mejor comportamiento resistente. La disposición de armadura responde a las direcciones principales de las tracciones.



**Fig. 3.1.13** Pabellón del hormigón, Exposición Nacional de Zurich 1939, donde la intención de Robert Maillart es la de expresar las posibilidades expresivas de este material, más allá de los entramados de pilares y vigas. La distancia entre soportes es de 12m y la altura de la parábola de 16m, lo que resuelve con una lámina de hormigón de 6cm de espesor.



**Fig. 3.1.4** Esquema de los paraboloides hiperbólicos del Restaurante los Manantiales, de Félix Candela, Xochimilco 1951. La búsqueda de la geometría de la estructura nace del entendimiento de su comportamiento resistente.

### 3.2 Evolución de la estructura del museo

Desde las primeras propuestas del proyecto presentadas por Wright en 1943, la evolución de su configuración no sólo estuvo condicionada por aspectos sociales, y económicos como los expuestos brevemente en el apartado anterior, sino que el edificio también fue tomando forma poco a poco en base a cuestiones estrictamente constructivas y estructurales durante los dieciséis años de gestación. Las posibilidades y limitaciones de la estructura y sus materiales condicionaron y modelaron el resultado final, tanto debido a cuestiones técnicas como económicas o normativas.

Como se ha podido ir comprobando hasta este momento, la arquitectura de Frank Lloyd Wright está formada por un conjunto indivisible de diferentes aspectos, relacionados entre sí, tanto espaciales o formales como técnicos. En el caso concreto del Guggenheim, en la estructura del edificio confluyen muchas de sus ideas fundamentales en este sentido. La utilización del hormigón como material moldeable, monolítico y continuo fue uno de los elementos clave en el desarrollo de la estructura. Como veremos, durante el proceso se puso en crisis su utilización y por tanto la repercusión general sobre el resultado final. La arquitectura de Wright en particular resultaba especialmente sensible a los cambios tipológicos en su estructura ya que cualquier modificación en este sentido, repercutía de manera significativa en el resultado final. No es posible imaginar la estructura del edificio administrativo de la Johnson Wax con otro tipo de estructura o material; la atmósfera conseguida por Wright en el interior de esta sala se apoya fundamentalmente en la definición de la geometría de la estructura y sus materiales. De este modo, cada uno de los pasos en relación a la estructura, seguidos durante los años de desarrollo del museo, influyeron de manera relevante en el resultado final.

La estructura del edificio se empezó a plantear a mediados de 1945, conjuntamente con los problemas de climatización y acústica. En inicio Wright tenía en mente utilizar un sistema estructural mediante un entramado de acero, a modo de una cesta de mimbre entrelazada, recubierta y rigidizada mediante una proyección de hormigón gunitado, de manera que se consiguiese una estructura monolítica de una sola pieza. Wright avaló la idoneidad del sistema únicamente a través de su intuición, argumentando su semejanza con la de una concha de mar con nervaduras, para conseguir una pieza única (indivisible) y sin soportes de pilares.

Así, en cada una de las propuestas puede observarse la relación entre el esquema estructural y la propuesta arquitectónica, tal como sigue.

### ***Primer esquema preliminar: diciembre de 1943***

La primera propuesta para la Modern Gallery se concretó mediante una planta hexagonal con un patio interior también hexagonal, pero girado 30° respecto al perimetral. En uno de los lados del hexágono se maclaba el núcleo de comunicaciones, formado por un cilindro abierto hacia el interior. Esta primera propuesta fue la única donde las plantas no se comunicaban entre ellas formando una rampa. La rampa sólo aparecía en el interior del núcleo, alrededor de los ascensores y como sustitución de una escalera, por lo que su pendiente resultaba ser bastante pronunciada.

Este primer encaje todavía no se emplazaba en un solar concreto, por lo que los límites del conjunto quedaban relativamente desdibujados en la planta baja y la planta noble. No obstante, podían identificarse de manera clara los tres elementos principales que albergaban todo el programa: la galería de exposición, el edificio de servicios y el zócalo del conjunto. En el caso de la zona de exposición, podía encajarse una estructura relativamente convencional para resolver estas plantas, aprovechando las divisiones entre salas como soportes continuos, coincidentes con los radios y apotemas del hexágono. Para el edificio satélite y anexos se plantearon cuatro soportes, tipo pantalla, ubicados estratégicamente, que definían el acceso y la volumetría exterior de estos anexos.

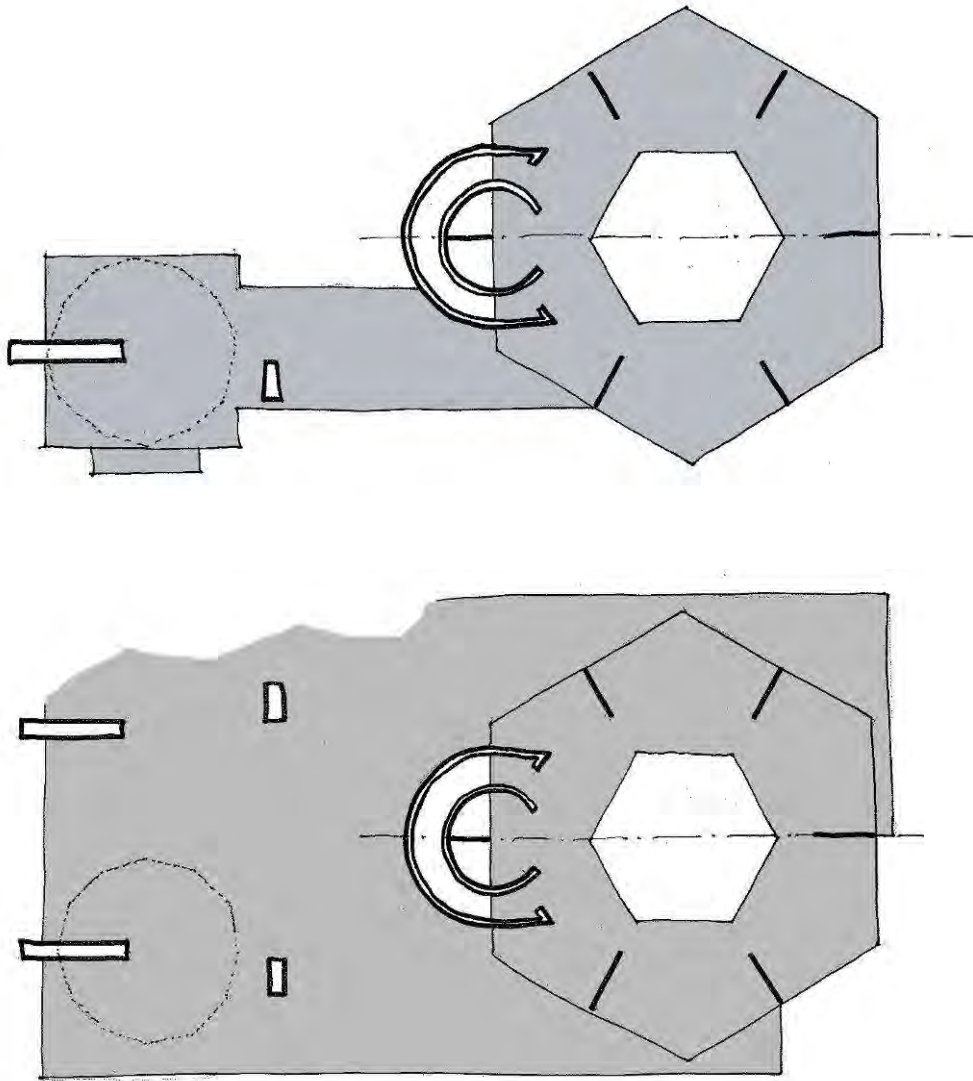
Estos esquemas rápidamente fueron superados con la formalización de la espiral, pero no obstante, resultan de especial interés ya que se apuntaba tímidamente la solución final de mamparas de soporte cada 30°, aspecto que no vuelve a aparecer hasta 1952. En este caso, las dimensiones de los soportes principales en planta baja, la disposición del núcleo principal en uno de los lados del hexágono, así como el insinuar algunos de los vértices del mismo en voladizo<sup>118</sup>, sugiere la utilización de una estructura convencional de hormigón armado, mediante muros soporte y losas.

También es significativa la posición de las mamparas de división de la galería principal. Éstas se apoyaban en el perímetro exterior, pero no llegaban a invadir el borde interior del hexágono que forma el patio, solución relacionada, en cierto modo, con la versión construida. La premisa de conseguir una atmósfera interior especial, Wright la apoyaba en la aparente continuidad del vacío interior, cuestión por la cual era crucial no mostrar soportes en este borde interior. Todas las circulaciones se concentraban en el perímetro interior y, por tanto, su interrupción visual mediante la disposición de soportes estaba totalmente en contra de esta opción.

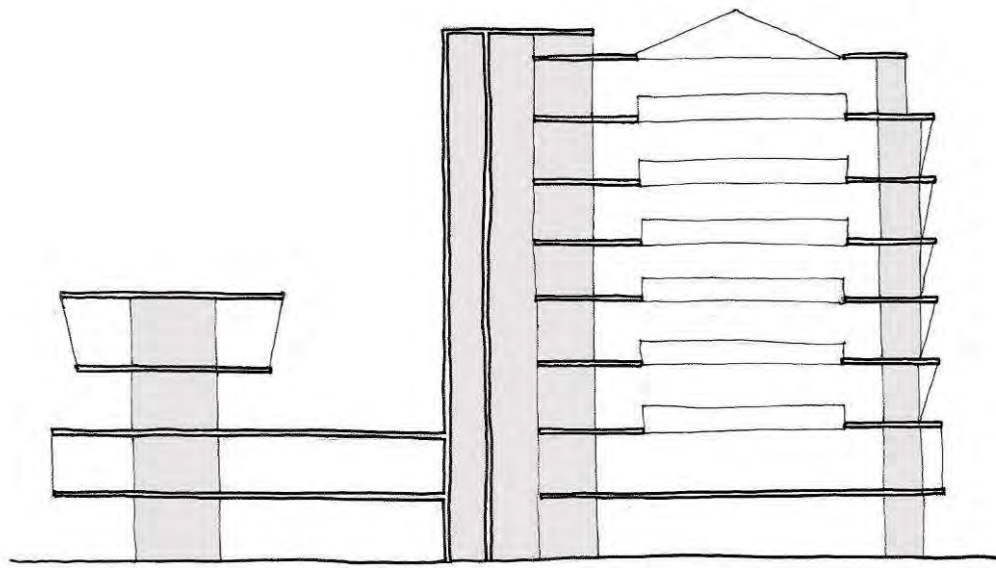
Desde el punto de vista de la estructura, es evidente que cada una de las plantas era completamente independiente, quedando relacionadas únicamente a través de los soportes. Al núcleo no se le atribuyó una función resistente principal ya que la rigidez del conjunto de pantallas resultaba suficiente para garantizar la estabilidad horizontal del conjunto.

---

<sup>118</sup> La estrategia de situar los soportes mayoritariamente en la posición de las apotemas pretende resaltar el efecto de voladizo en los vértices. Wright utilizó este recurso en propuestas como la Iglesia Ortodoxa o el Garaje Kaufmann



**Fig. 3.2.1** Esquema de la estructura de las plantas baja y tipo de la propuesta de diciembre de 1943. En planta baja, los límites de la parcela aparecen indefinidos debido a que el emplazamiento del edificio todavía no se había decidido. En las plantas tipo la sala principal, de siete niveles, se diferencia del edificio anexo de menor altura



**Fig. 3.2.2** La sección de la estructura es una superposición de planos (forjados) soportados mediante pantallas o mamparas con una doble función de soporte y de subdivisión de los espacios. Puede observarse que cada una de las plantas se proyecta en voladizo hacia el espacio central, dejando la pantalla de apoyo próxima a la fachada. Esta disposición tiene una relación conceptual muy próxima con la solución de pantallas radiales del edificio finalmente construido.

### *Segundo esquema preliminar: enero de 1944*

Las plantas independientes, de forma hexagonal, de la versión anterior redondearon sus aristas con el fin de mejorar la fluidez visual y se unieron entre ellas para formar una rampa continua que, en su envolvente externa, se iba cerrando en sentido ascendente, en forma de zigurat. Con esto, Wright mejoraba la continuidad espacial potenciando una de las características principales del edificio. La geometría de la espiral correspondía con una hélice cónica, cuya proyección horizontal resulta ser una espiral de Arquímedes [Fig.3.4.2]

La disposición de las diferentes partes del conjunto dentro de la parcela, era la misma que en la primera versión, incluso la forma cilíndrica del núcleo o los soportes del edificio satélite y planta baja. Del mismo modo, en este momento no existía todavía un emplazamiento definitivo para el edificio, por lo que la formalización del perímetro de la planta baja seguía adquiriendo diferentes configuraciones. La referencia al observatorio Gordon Strong de 1924 es directa, aunque el interior o la estructura de los edificios no tenían demasiada relación.

En los niveles inferiores, planta baja y principal, la estructura se basaba en un sistema de muros de soporte dispuestos en direcciones perpendiculares, de manera que permitían la visión del exterior entre las franjas de soportes. Las zonas de servicios se resolvían con muros, generalmente acompañando la geometría de la planta. La principal diferencia a nivel estructural respecto a la propuesta del mes anterior se concentró en las plantas superiores de la sala principal ya que desaparecían todo tipo de soportes a excepción del núcleo y los pilares frente a éste. El resto de la planta surgía como un anillo en voladizo desde el núcleo en donde los dos pilares frente al mismo reforzaban el grado de empotramiento del anillo de cada una de las plantas. Más adelante, a partir de 1946, Polivka hizo una mención especial a la función estructural de estos dos elementos que dan significado al acceso a cada planta.

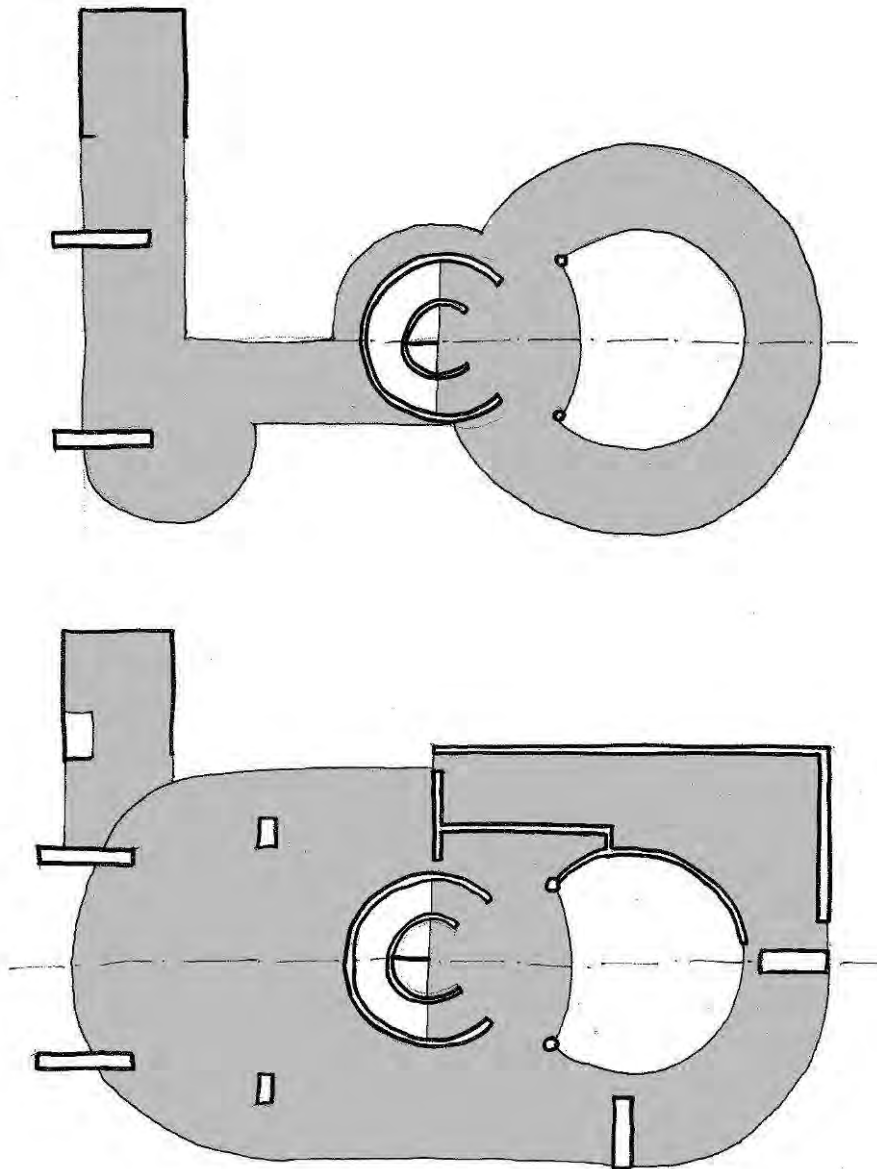
Para conseguir este gran voladizo en cada una de las plantas, la propuesta sugería el pliegue de los bordes de la rampa, formalizándose así la barandilla interior y la fachada al mismo tiempo que se conseguía una sección en “U” de mayor rigidez. Al igual que las rampas de la piscina de pingüinos de Lubetkin, el efecto “tijera” podía colaborar en este esquema, aunque en este caso con unas dimensiones mucho mayores. Para que este aspecto cobrase importancia, resultaba necesario otorgar a la sección una rigidez mayor a torsión, característica que no poseía la sección en forma de “U”.

Es necesario resaltar que este esquema estructural corresponde a la interpretación de los planos de ese momento. Sin embargo, no parece una opción que pudiese llegar a ser viable, como se verá más adelante.

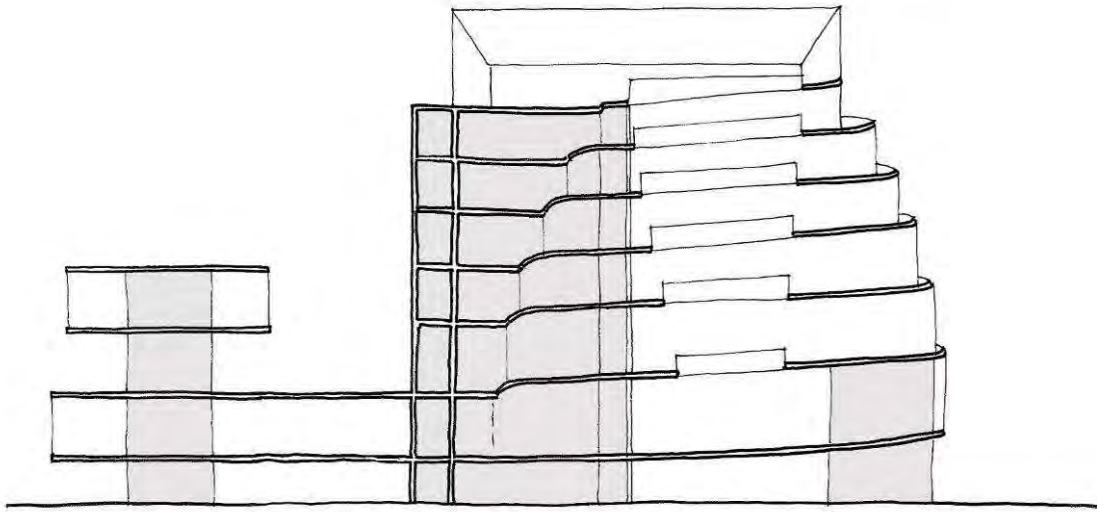
A partir de este esquema es cuando comenzó a vislumbrarse la intención de Wright de concebir un único espacio continuo y no la superposición de plantas, manifestándose mediante la continuidad de la rampa. En la sección es difícil identificar cual era el sistema estructural previsto por Wright para evitar los soportes a lo largo de la rampa. Probablemente pensaba en un sistema de láminas de hormigón cuya rigidez se debiese a la rigidez por la curvatura de las mismas, aunque la realidad del dibujo de la sección quedaba aún lejos de un esquema



estructuralmente eficaz. En este caso, el núcleo, con la misma disposición y dimensiones que en el primer esquema, pasó a tener una función estructural principal ya que se convirtió en el único elemento de soporte tanto para acciones verticales como horizontales.



**Fig. 3.2.3** Esquema de la estructura de las plantas baja y tipo de la propuesta de enero de 1944. En las plantas tipo también se diferencia la sala principal y el edificio anexo de servicios. Este mismo esquema en planta puede servir también para ilustrar la versión de febrero de 1944, ya que sólo difiere el sentido de apertura de la rampa.



**Fig. 3.2.4** En este esquema preliminar, la definición de la sección resulta ser muy básica y no se puede deducir fácilmente cual era la intención de Wright de cara al planteamiento de la estructura. No obstante, en este croquis se ha puesto de manifiesto un posible esquema deducido de la interpretación de las plantas, basado en el empotramiento de los niveles superiores de la rampa en el núcleo, proyectándose en voladizo como un disco empotrado en un punto de su perímetro.

### ***Tercer esquema preliminar: febrero de 1944***

Al poco tiempo se presentó la misma opción en planta, pero con la gran diferencia de que la espiral, en lugar de irse cerrando en sentido ascendente se iba abriendo. La versión anterior preveía que los visitantes subiesen por la rampa, progresando hacia la parte superior según avanzaban a lo largo de la exposición. Una vez en la última planta, descendían por los ascensores. Por el contrario, en este nuevo esquema, que Wright denominó “tarugiz” (zigurat al revés), se invirtió el sentido de la exposición de manera que los usuarios ascendían hasta la planta superior por los ascensores, siguiendo después la exposición que se desarrollaba por la rampa en sentido descendente. Wright argumentó este cambio desde su particular visión del mundo, como un símbolo de democrático optimismo.

*“La democracia demanda este tipo de edificios. Lo que ya no puedes obtener en una iglesia deberías conseguirlo aquí: la salud, vitalidad y belleza de la imaginación humana. Yo derivé esta idea básica de los templos piramidales sirios con rampas exteriores ascendiendo en espiral. Finalmente decidí que tales “zigurats” son pesimistas porque eran piramidales, por lo que di la vuelta a mi edificio para expresar puro optimismo”<sup>119</sup>*

En el resto de cuestiones la propuesta no difería de la anterior, ni a nivel formal o de distribución de las plantas ni a nivel estructural, aunque seguramente Wright era consciente que la situación en este sentido era cada vez más sofisticada. Las plantas en voladizo de mayor dimensión pasaron a estar en la parte superior del edificio por lo que no se podía contar con la ayuda de los muros de apoyo de la planta baja, como en la versión anterior.

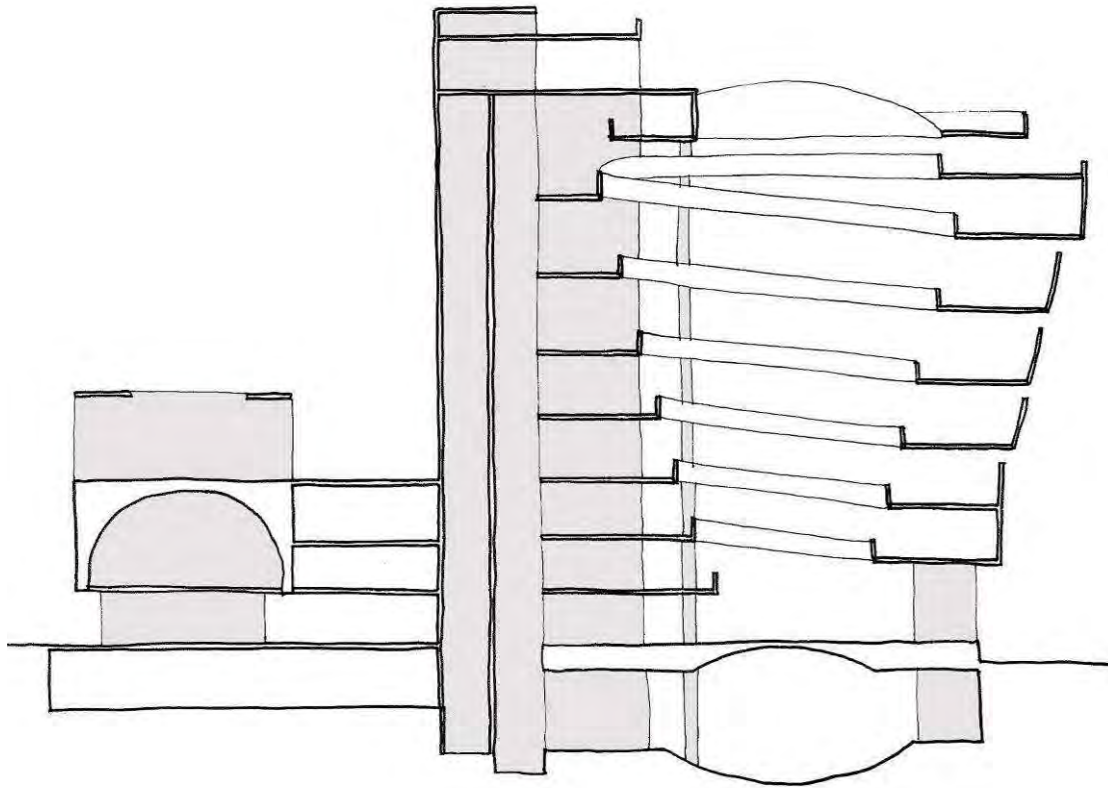
La sección de esta propuesta muestra la superposición de los siete niveles de la rampa de ancho constante, por lo que las dimensiones del atrio interior también crecían con la altura del edificio. Esto provocaba que las dos espirales fuesen paralelas y, en particular, el cono que contenía la espiral interior tuviese su vértice en el centro de la sala de conferencias del sótano. Es reseñable que tanto en este esquema como en el anterior, la forma de “U” generada por la unión de la rampa, la barandilla interior y la fachada formaban un ángulo casi ortogonal, en arista, de manera que esta solución no resultaba tan refinada como en versiones posteriores.

A pesar de que el cambio conceptual respecto al esquema anterior fue fundamental, a nivel de estructura el sistema seguía pareciendo el mismo. En el caso de las plantas superiores, el voladizo del tramo de espiral era mayor que en las plantas inferiores, pero, a pesar de ello, esto no se reflejaba en la sección mediante la disposición de algún elemento estructural que identificase este hecho. Hay que reconocer que a pesar de demostrarse ciertas lagunas sobre cuestiones principales en cuanto a la estabilidad estructural, estas versiones no dejaban de ser esquemas previos, donde el principal objetivo era la búsqueda de una idea global que permitiese a Wright fusionar la concepción espacial del edificio con los requerimientos de uso. A este nivel, las cuestiones constructivas o estructurales, aunque se insinuaba un posible sistema laminar, quedaban lejos de una resolución efectiva de su estructura. El ancho de la rampa era el mismo en todas las plantas,

---

<sup>119</sup> Polivka Papers. Folder 1.7 *“What is like to work with Wright”*

por lo que tanto la espiral envolvente exterior como la interior resultaban ser de forma cónica.



*Fig. 3.2.5* En el momento en el que Wright invierte la forma del zigurat, se concreta esta primera sección. Al igual que en el caso anterior, la estructura parece estar basada en el empotramiento de cada planta en el núcleo de comunicaciones. Los pilares frente al núcleo refuerzan este efecto de empotramiento reduciendo la dimensión del voladizo. La sección de la rampa adopta una sección con una cierta lógica resistente, con la intención de conseguir una mayor inercia para resolver el voladizo.

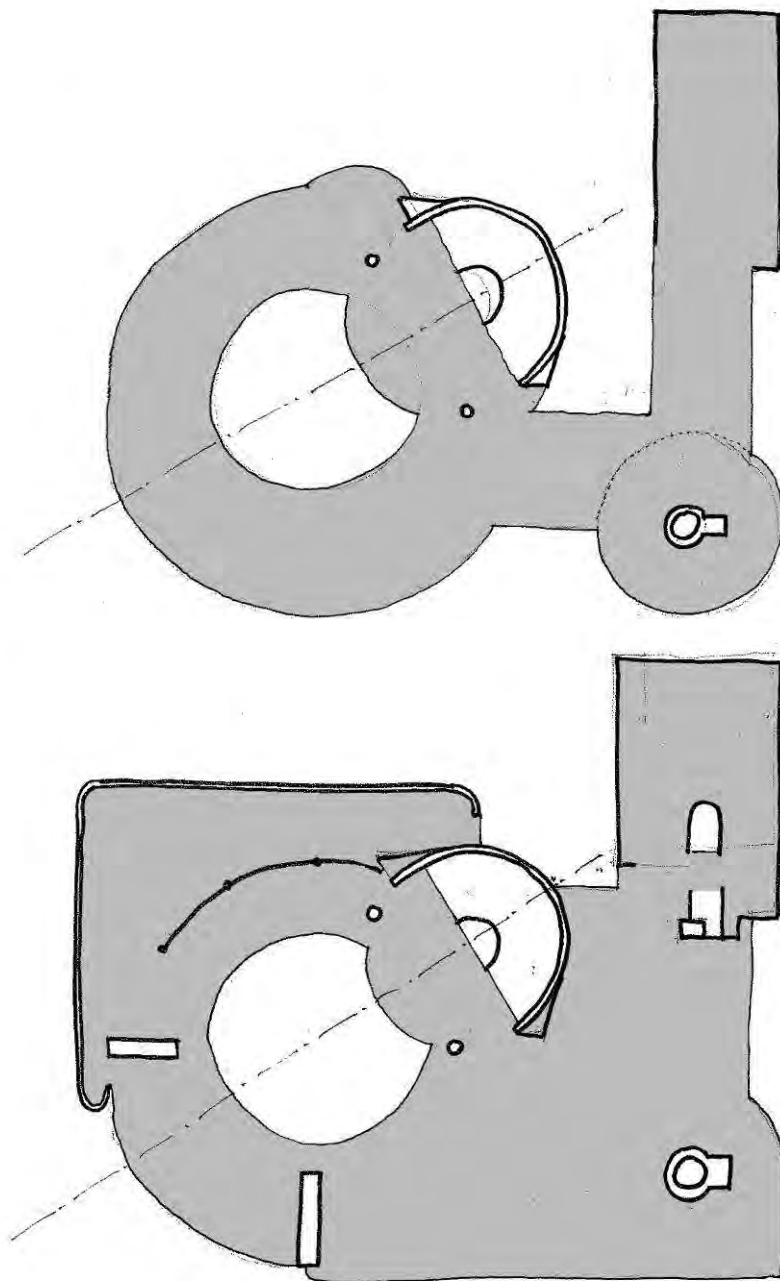
#### ***Cuarta propuesta: 1945-1946. La Modern Gallery***

A finales de 1945 se precipitó la redacción del proyecto para poder construir el edificio. Parecía que los condicionantes para iniciar la construcción se cumplían, por lo que Wright necesitaba concretar los aspectos particulares de la estructura del edificio. Glikman y Peters trabajaban en ello. Pero, como es conocido, no encontraban la manera de materializar las intuiciones de Wright y resolver de manera efectiva la estructura laminar de hormigón. Las dimensiones del voladizo y del edificio en general eran considerablemente mayores que en otras ocasiones, donde la intuición había resultado suficiente para justificar el correcto funcionamiento de la estructura. Las tensiones solicitantes de las secciones de hormigón sobrepasaban las posibilidades del material y las deformaciones del voladizo no eran asumibles. Los ingenieros colaboradores de Wright no veían otra posibilidad que la de disponer pilares en el borde interior de la rampa, como aparecen en la maqueta presentada para la ocasión. Pero Wright no podía asumirlos ya que iban directamente en contra del principio de continuidad del espacio interior. Para el edificio satélite apareció una propuesta de estructura más clara que en las versiones anteriores, formada por un único soporte central y plantas de forma circular en voladizo a partir de este núcleo, cuestión que, debido a las dimensiones más reducidas de esta parte de la estructura, podía ser factible.

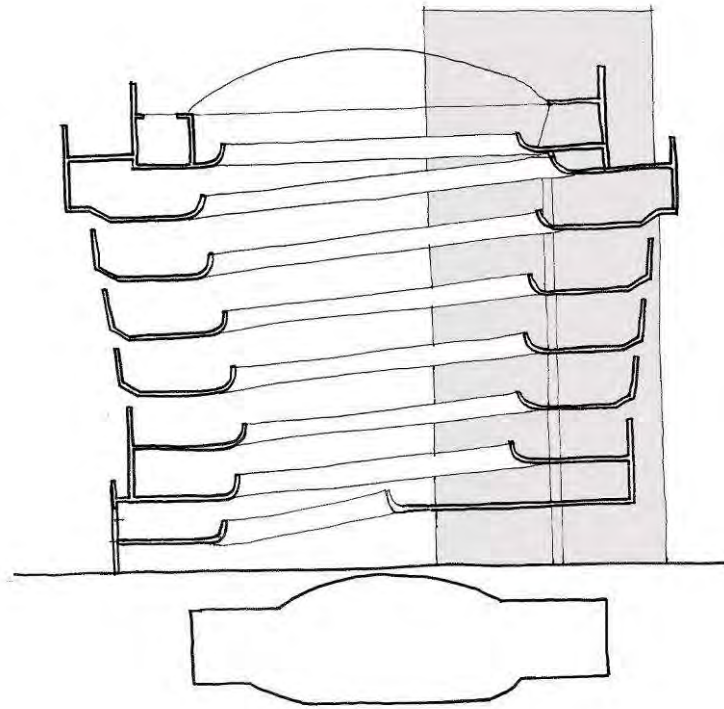
No obstante, la intuición de Wright seguía su propio camino y el conjunto de la sección de la rampa, barandilla y fachada, se había desarrollado en un grado superior de refinamiento. Para ello, la intersección entre elementos ya no se producía en arista sino que se realizaba mediante una curva que suavizaba la unión formando tangencias. Esta opción estaba de acuerdo con el concepto de transición suave entre espacios y elementos, avanzando así en la dirección correcta, contraria a la colocación de los pilares. A pesar de ello, la estructura seguía sin poder resolverse.

Entre febrero y marzo de 1946 se incorporó al proyecto de la Modern Gallery J.J. Polivka, fundamentalmente debido al conflicto entre Wright y sus ingenieros respecto a la posibilidad de eliminar los pilares del borde interior de la rampa. El artículo publicado por Wright en la revista *Architectural Forum* de enero de 1946, animó a Polivka a proponerle una colaboración, a la que Wright respondió con una cordial invitación para ir a Taliesin West en Arizona y exponer sus ideas. Polivka se veía capaz de resolver y demostrar que la intuición de Wright no estaba desencaminada, avanzando sus recomendaciones resumidas en tres puntos: 1. La curva tangencial de la rampa le otorgaba mayor rigidez. 2. La curvatura del borde interior para unirse a la barandilla también aumentaba la rigidez. 3. Los dos pilares frente al núcleo reforzaban el empotramiento en el núcleo y reducían la longitud del voladizo. En cualquier caso, estas argumentaciones de Polivka no llegaron a materializarse en la propuesta presentada por Wright en enero de 1946.

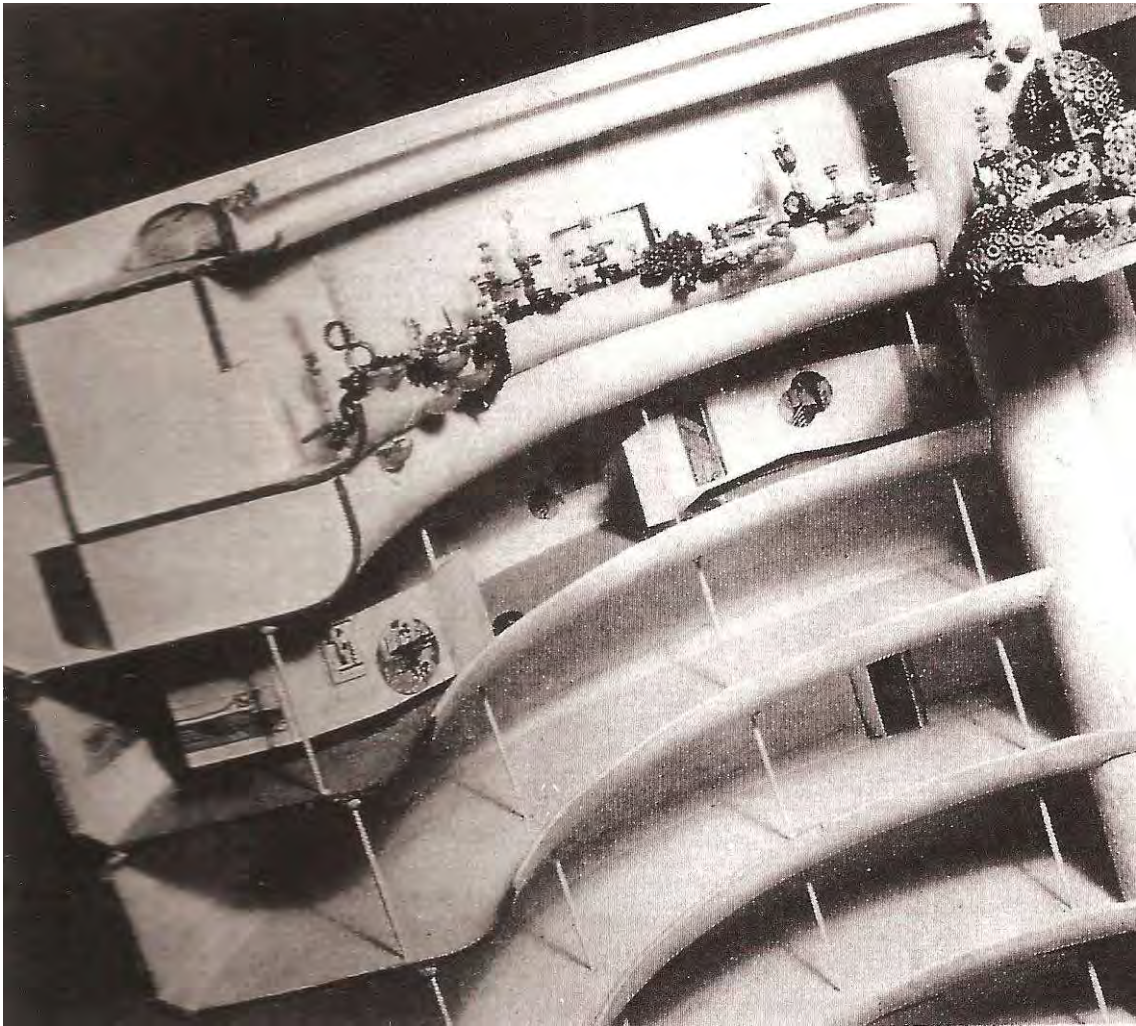
Posteriormente a la incorporación de Polivka al proyecto, la estructura se concretó como láminas de hormigón armado y postensado en algún punto, motivo por el cual Wright desechó cualquier opción de aplacado de mármol (blanco, rosa, etc...), presente en las versiones anteriores. La propia naturaleza continua del material de la estructura era precisamente lo que Wright estaba buscando, por lo que su decisión fue la de eliminar cualquier tipo de revestimiento exterior.



**Fig. 3.2.6** Esquema de la estructura de las plantas baja y tipo de la Modern Gallery de 1945-46. El solar, ahora ya en una ubicación real, es más reducido que en las versiones anteriores, de manera que el volumen de la sala queda a la izquierda del conjunto, desde la Quinta Avenida. Aparte de los ajustes de disposición del edificio satélite y toda la planta baja, la forma de la sala principal no difiere demasiado de las propuestas anteriores. El eje de la sala, que pasa por el núcleo, se ha girado unos 30° respecto a la fachada principal y se desarrolla según la diagonal de derecha a izquierda.



**Fig. 3.2.7** La posición del núcleo se invierte respecto a las versiones anteriores, pero la estructura planteada sigue basándose en el mismo esquema de empotramiento de cada una de las plantas en el mismo. La sección de la rampa se va depurando con una doble intención, resistente y formal, intentando un mejor flujo de tensiones al suavizar las intersecciones mediante tangencias.



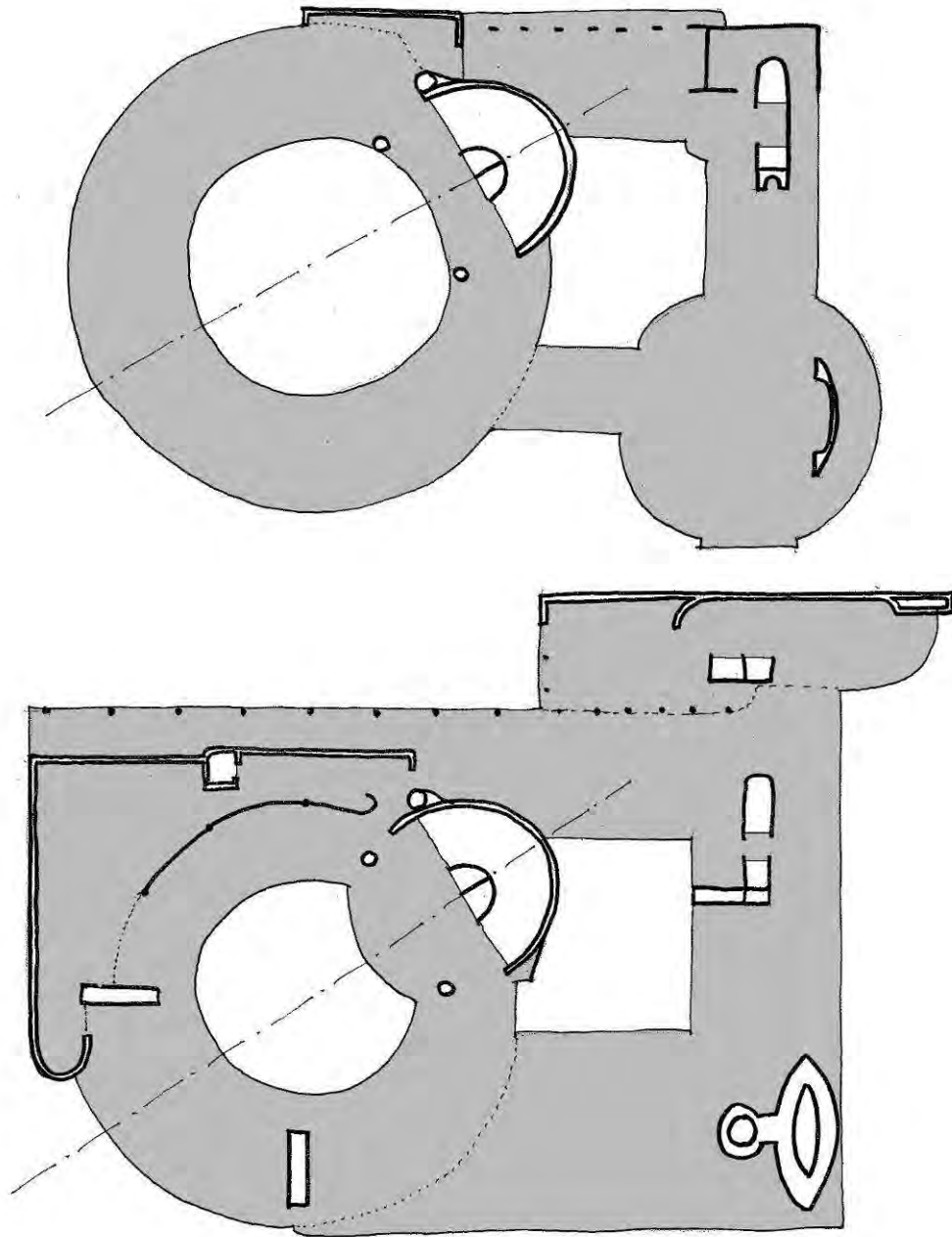
**Fig. 3.2.8** En la maqueta presentada en Architectural Forum en enero de 1946, antes de que Polivka entrase en escena, se tuvieron que colocar unos “pilares” en el borde interior de la rampa que permitiesen el soporte de la misma. Hay que decir que se trataba de una maqueta desmontable para permitir la visión del interior, lo cual eliminaba cualquier efecto tridimensional en el comportamiento de la rampa. A pesar de ello, esta situación puso de manifiesto de forma clara el verdadero problema estructural de la propuesta de Wright y que, en la fecha de esta imagen, estaba todavía sin resolver.



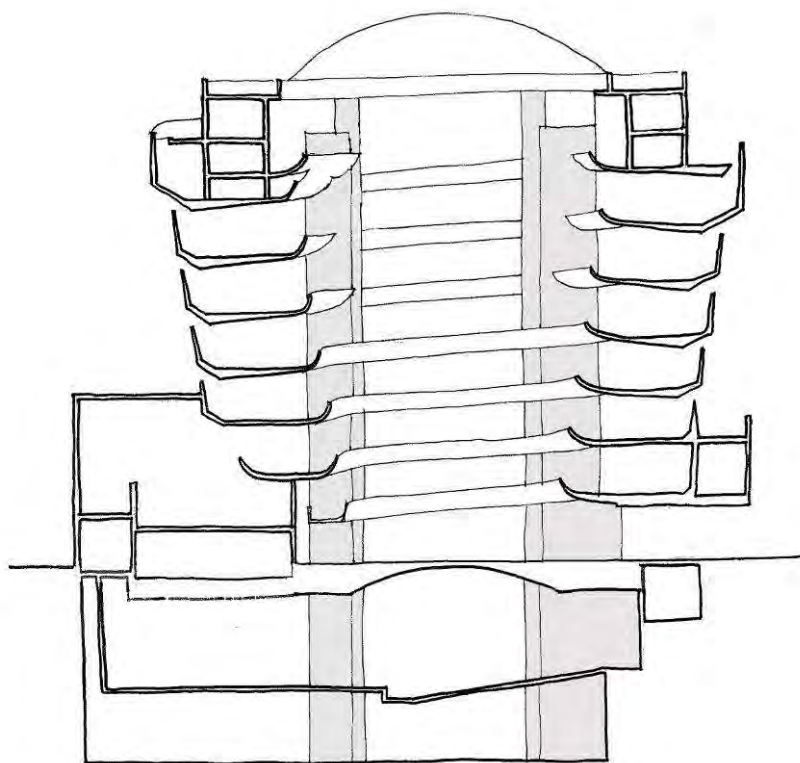
***Quinta propuesta:* 1947-1948. Hacia el Guggenheim Museum.**

A finales de 1946 ya había planos de una versión definitiva listos para construir el edificio (aunque sin estar claro cuál era el sistema estructural efectivo que resolviese el problema de la rampa). Pero la coyuntura económica después de la Segunda Guerra Mundial demoró el inicio de las obras. De este modo, tanto los patronos como Wright reconsideraron el proyecto desde aspectos funcionales y cuestiones formales que afectaban fundamentalmente a las zonas de servicios y al edificio satélite, con la intención de reducir el coste de construcción. Las dimensiones del solar eran mayores ya que se había ido adquiriendo parcelas colindantes que permitiesen a Wright esponjar un poco el programa, ensanchando el conjunto 9m sobre la Quinta Avenida. Definitivamente el edificio se situó entre las calles 88 y 89 frente a Central Park y esto permitió que se generara una mayor permeabilidad de la planta baja, apareciendo un patio interior entre la galería y el edificio monitor.

En cuanto a la galería principal se produjeron modificaciones significativas en relación a la estructura. El planteamiento basado en disponer dos muros formando un ángulo recto que permitiese abrir las visuales en planta baja se mantenía. En las plantas superiores, estos muros desaparecían por lo que el sistema de la estructura se basaba, aparentemente, en el voladizo de cada una de los niveles de la espiral, como en la versión anterior. Como se verá más adelante, a pesar del patente entendimiento entre Wright y Polivka, éste estuvo trabajando desde 1946 en un sistema estructural que el arquitecto no incorporó en sus dibujos hasta 1952. La sección del edificio había evolucionado hacia una forma estructuralmente mejor, incluso reconociendo un cierto comportamiento en voladizo de la sección transversal de la rampa, empotrada en el perímetro. Sin embargo, Wright no ubicaba en la planta los soportes necesarios que materializasen este comportamiento.



**Fig. 3.2.9** El núcleo central del edificio satélite evoluciona, desdoblándose en un soporte de forma lenticular y otro circular, conectados entre ellos.



**Fig. 3.2.10** A pesar de que la sección de la rampa adopta una forma apropiada para trabajar en voladizo en sentido radial, empotrada en el perímetro, en la planta no aparecen las necesarias pantallas radiales que materialicen este empotramiento. Wright no había incorporado las aproximaciones realizadas por Polivka en la planta, aunque sí en la sección.

### ***Sexta propuesta: 1952. El Solomon Memorial Museum.***

Durante la espera por el comienzo de la construcción, en 1949, murió Solomon Guggenheim que había sido uno de los principales defensores del controvertido museo. Esto complicó de nuevo la situación ya que los nuevos gestores concebían la construcción del edificio de una manera diferente. Por este motivo el programa volvió a reconsiderarse provocando modificaciones sustanciales, tanto a nivel de disposición de los volúmenes dentro de la parcela (ya que se invirtió la posición de la galería y el edificio monitor, volviendo a la situación de los esquemas preliminares), como a nivel estructural. Wright trabajó en este nuevo planteamiento desde 1951 y, en marzo de 1952, se finalizó el proyecto para solicitar el permiso de obras.

La rampa en espiral en lugar de arrancar de la planta primera, lo hacía de la planta baja (realizando un giro de 180° al llegar a este nivel). El helicoide se redujo en una vuelta quedando en seis giros completos, pero aumentando su diámetro para mantener la misma longitud de desarrollo. El patio interior también tomó una mayor dimensión y en lugar de tener forma de cono invertido pasó a tener forma cilíndrica de manera que la rampa se iba ensanchando según progresaba en altura. Esta nueva situación, con la intención de ganar mayor superficie de exposición, pudo ser una de las causas por las que la estructura acabó adoptando el esquema propuesto por Polivka. El otro motivo fundamental fue el de la búsqueda de una opción más económica ya que este resultaba ser un condicionante fundamental. En este sentido se barajó la posibilidad de retomar la idea del entramado de acero ya explorada en el inicio<sup>120</sup> con el fin de reducir el coste de la estructura, aunque con evidentes consecuencias formales.

Los cambios repercutieron en gran manera en el resultado arquitectónico final. La solución de hormigón postensado resultaba demasiado cara y la propuesta de armado mediante malla de acero *deployé* (como en los voladizos de la torre de investigaciones del edificio Johnson) se descartó al no estar aprobada su utilización en la ciudad de New York. Finalmente, la solución que resultó ser más económica fue la que, la rampa en espiral de las plantas superiores, se sustentó en nueve pantallas verticales que adoptaron una forma trapezoidal en alzado, aumentando su anchura según crecía la altura del edificio. Estas pantallas nacían del cilindro de la planta baja. La pauta tan marcada cada 30° de estas costillas transformó el espacio interior, de un “resorte enroscado” a la estructura del “caparazón del nautilo”, siendo así coherente con el esquema que Polivka desarrollaba desde el principio.

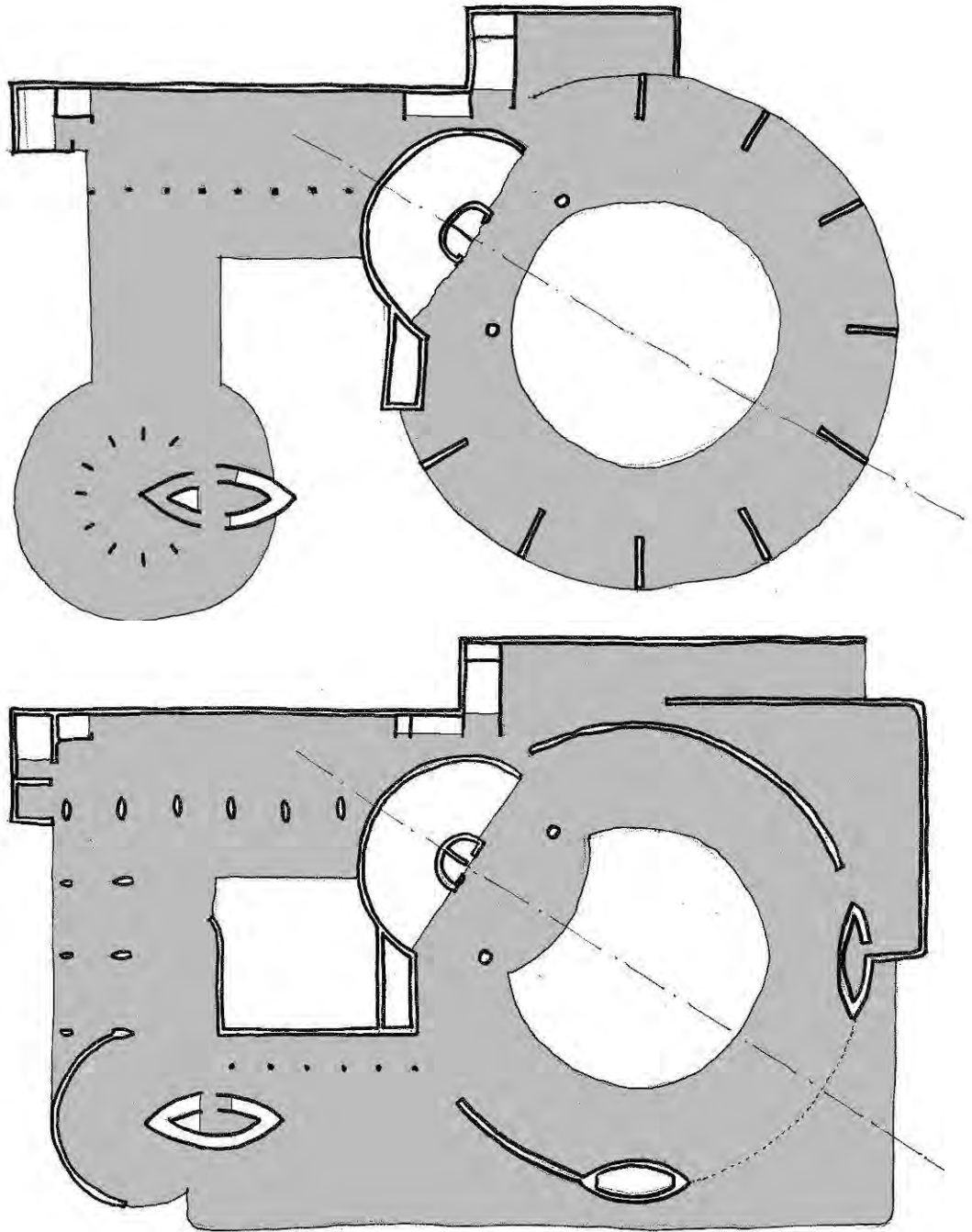
*“La disposición de las aletas radiales en el perímetro permitió que los conceptos estructurales de la vasija espacial se arraigaran en el principio del voladizo y la plasticidad del material, en contraposición a la caduca y clásica fórmula de poste y dintel”<sup>121</sup>*

---

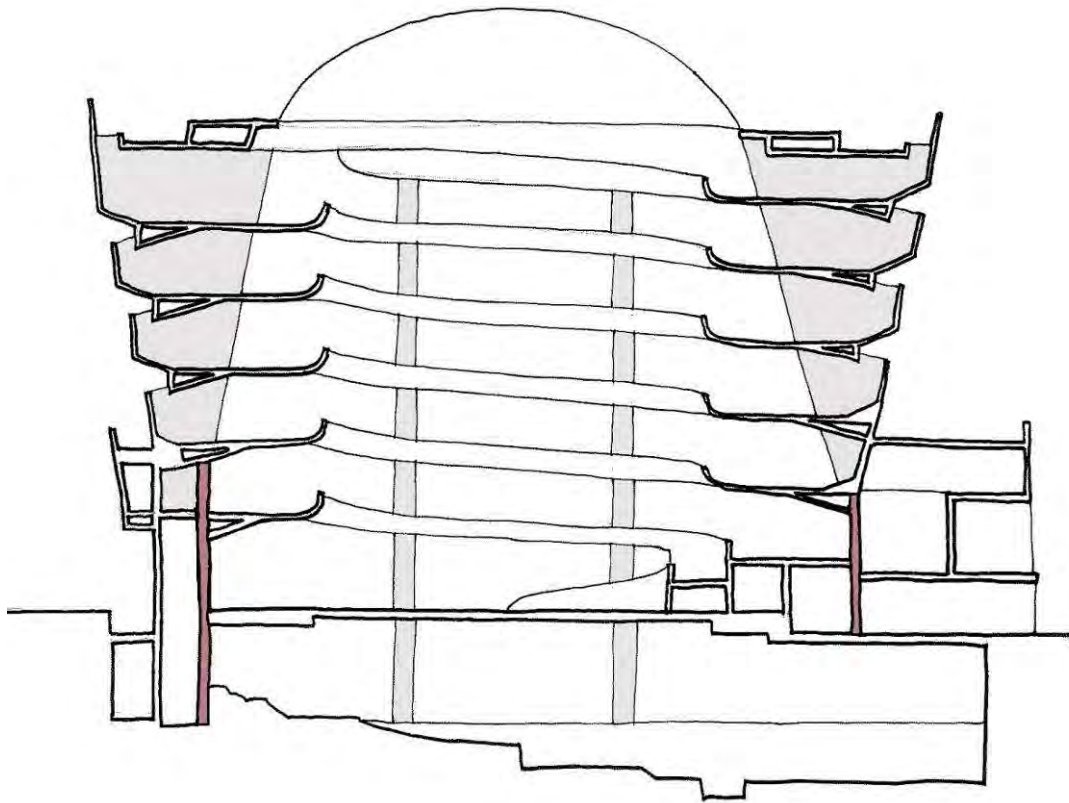
<sup>120</sup> Ver correspondencia entre Polivka y Wright, entre octubre de 1946 y diciembre del mismo año.

<sup>121</sup> CASTRO CHICOT, José Ramón. *Frank Lloyd Wright y el Guggenheim Museum*. Tesis doctoral. ETSAB. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona 2000. Pág. 225

La formalización del proyecto en 1952 era la de una solución más tangible y real, más económica que la versión de la Modern Gallery y que se ajustaba al presupuesto establecido.



**Fig. 3.2.11** En planta baja, las mamparas perpendiculares colocadas en los cuadrantes de la circunferencia han evolucionado hacia unas formas lenticulares que rigidizan el núcleo y flanquean una gran abertura hacia la diagonal de la parcela. El resto de la circunferencia se define mediante un muro que forma un gran cilindro, desde los soportes lenticulares hasta el núcleo. Para el edificio satélite, la propuesta de la estructura es análoga a la del edificio principal. En planta baja, un cilindro perimetral sirve de soporte para las nueve mamparas (cubriendo 270°). Estas mamparas soportan en las plantas superiores las losas de forma circular con voladizos en todo el perímetro. En conjunto también tiene un núcleo, en este caso de forma lenticular, que sirve como soporte para los 90° restantes de la circunferencia.



**Fig. 3.2.12** La sección de 1952 recoge, de manera clara y por primera vez, el planteamiento de Polivka, donde cada una de los niveles de la rampa se empotra en todo el perímetro surgiendo en voladizo hacia el espacio central. En el encuentro de la rampa con las pantallas se reconoce, mediante una forma de cajón triangular, que el momento flector debido al voladizo se transforma en una torsión constante soportada por las pantallas.

La forma trapezoidal de cada una de las pantallas dispuestas cada  $30^\circ$  no tiene un razonamiento resistente, sino formal. En las plantas superiores el ancho libre de la rampa (y el vuelo) es menor. Todas las pantallas arrancan del cilindro base en la planta segunda y quedan estabilizadas por la cubierta al compensarse los posibles desequilibrios por asimetrías de carga o empuje del viento.

Este esquema de estabilidad es similar al de las columnas dendriformes del edificio administrativo Johnson [Fig. 2.4.3], pero con una disposición radial en lugar de ortogonal. Al igual que en el Centro Cívico Point Park de Pittsburg [Fig. 2.6.4] la forma circular del edificio es la que estabiliza la descompensación de esfuerzos horizontales.

### ***Séptima propuesta: 1956-1959. The Solomon R. Guggenheim Museum.***

El permiso de obras solicitado en 1952 fue denegado por la *Building Comision of the New York City* al incumplirse numerosas cuestiones normativas. Estas puntualizaciones se concentraban fundamentalmente en aspectos referentes a la seguridad contra incendios y en relación a la estructura.

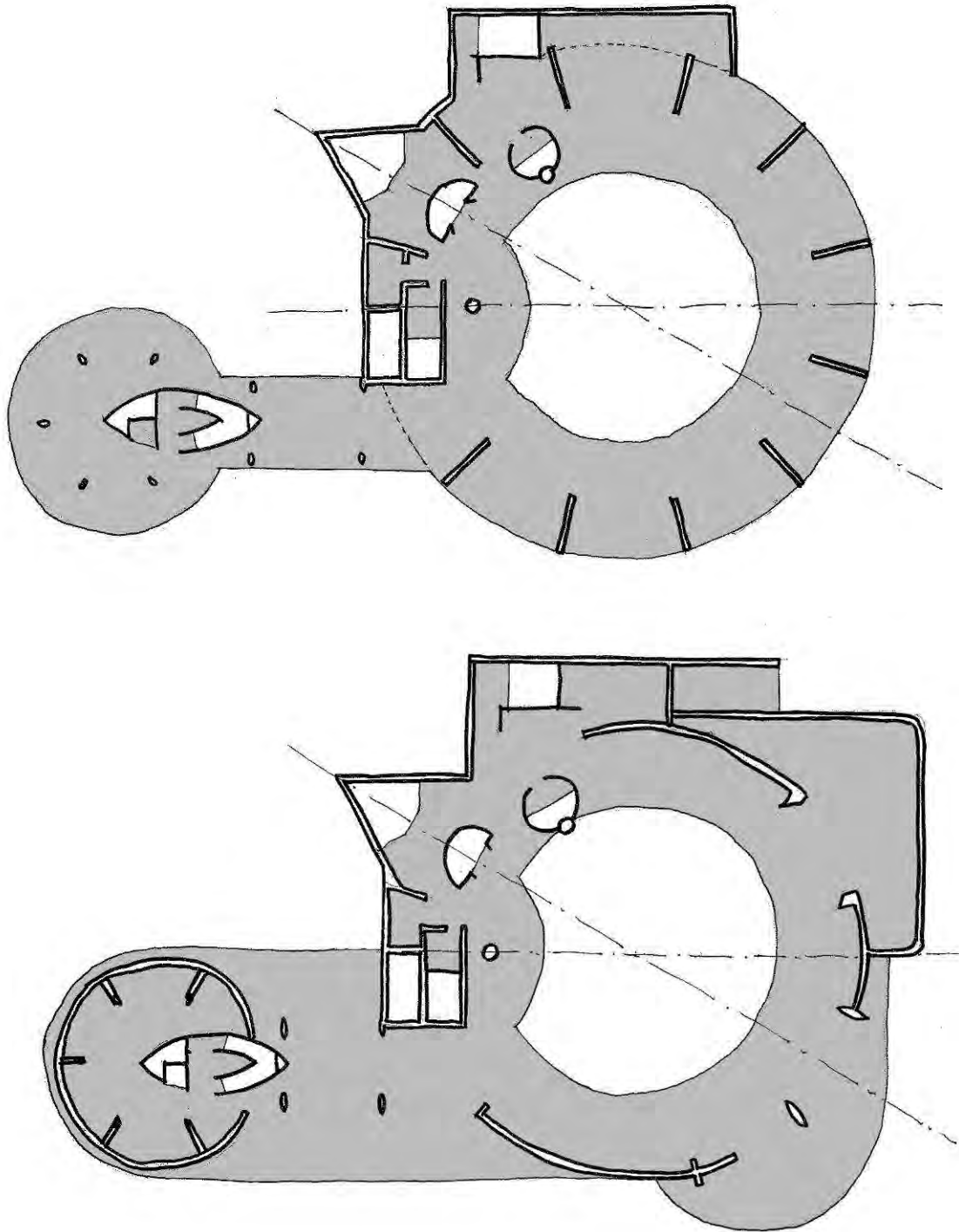
Wright no se mostró especialmente inquieto por las objeciones expuestas por la comisión y el edificio evolucionó para adaptarse a ellas. En materia de prevención de incendios, la torre de comunicaciones verticales se compactó y los elementos como ascensores y escaleras perdieron su carácter trasparente al no poder quedar envueltos en tubo de pìrex. Por este motivo la geometría semicircular del núcleo con clara manifestación exterior se integró en el volumen principal de la rampa. La sección de la galería recuperó la forma de las propuestas iniciales, descartándose cualquier función estructural de la barandilla interior debido a la imposibilidad de utilizar en New York una chapa *deployé* como armadura con función resistente principal. El voladizo se mantuvo constante en cada nivel, por lo que la forma del patio interior sufrió una nueva transformación, volviendo de nuevo al patrón de un cono invertido para poder compensar correctamente el voladizo hacia el exterior.

La estructura fue sometida a un riguroso estudio por parte de las autoridades y tanto Polivka como Wes Peters trabajaron para resolver y justificar la larga lista de puntos conflictivos. Para Wright resultaba contradictorio que una normativa no permitiese la construcción de uno de sus proyectos ya que, para él, su experiencia estaba avalada por la construcción del resto de edificios. La intuición de Wright demostraba que hay conceptos difíciles de demostrar mediante la aplicación de métodos analíticos y menos de un código. Ninguna normativa podía adelantarse a los avances de esta estructura y, finalmente, recibió la aprobación del comité.

El edificio construido sólo difirió de esta propuesta en alguna de sus dimensiones. El contrato de licitación fue de 2,6M\$ y la construcción final alcanzó los 3,7M\$, sin contar los casi 0,5M\$ de coste del solar. La espiral helicoides de seis giros tiene 30,5m de diámetro en la parte inferior y 39m en la superior. El desplome es de 4,25m y el desarrollo total de la rampa es de 650m con una pendiente constante del 3%.<sup>122</sup>

---

<sup>122</sup> CASTRO CHICOT, José Ramón. *Frank Lloyd Wright y el Guggenheim Museum*. Tesis doctoral. ETSAB. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona 2000. pág. 233

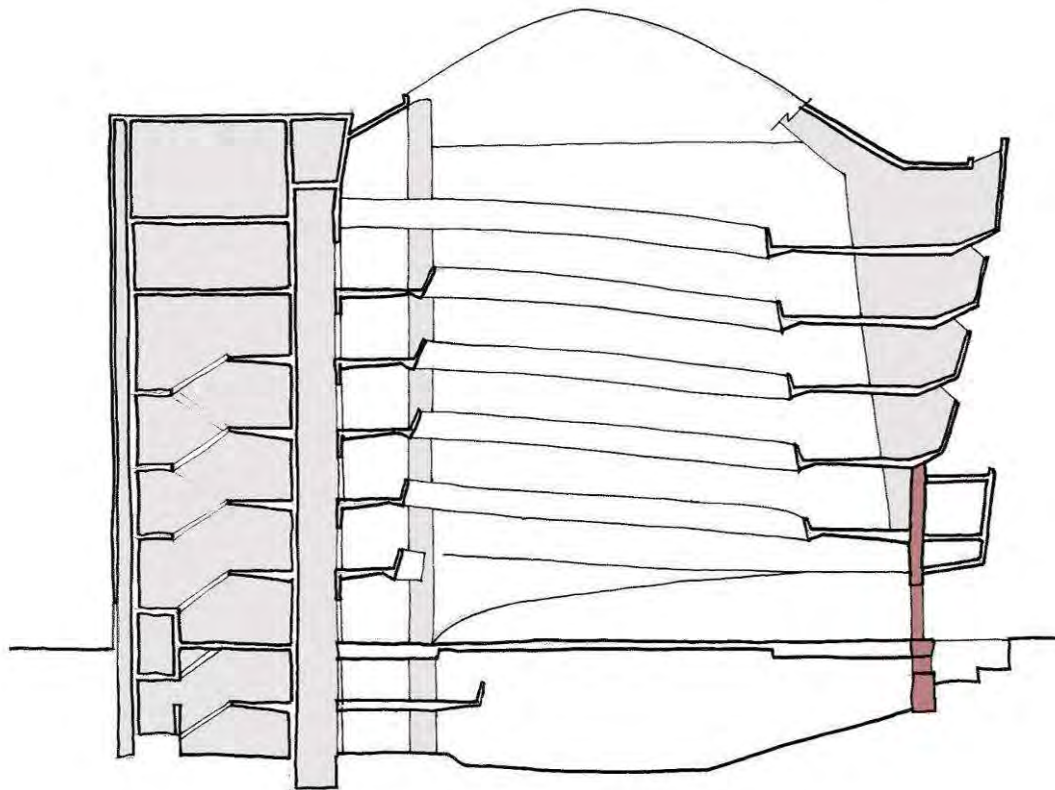


**Fig. 3.2.13** En esta última versión, que excepto pequeñas diferencias en los ajustes dimensionales o el lucernario que cubre el espacio central, ya no varía respecto del edificio construido. La disposición de los volúmenes en la parcela es muy similar a la propuesta anterior y las únicas diferencias radican en la formalización particular de los diferentes elementos.

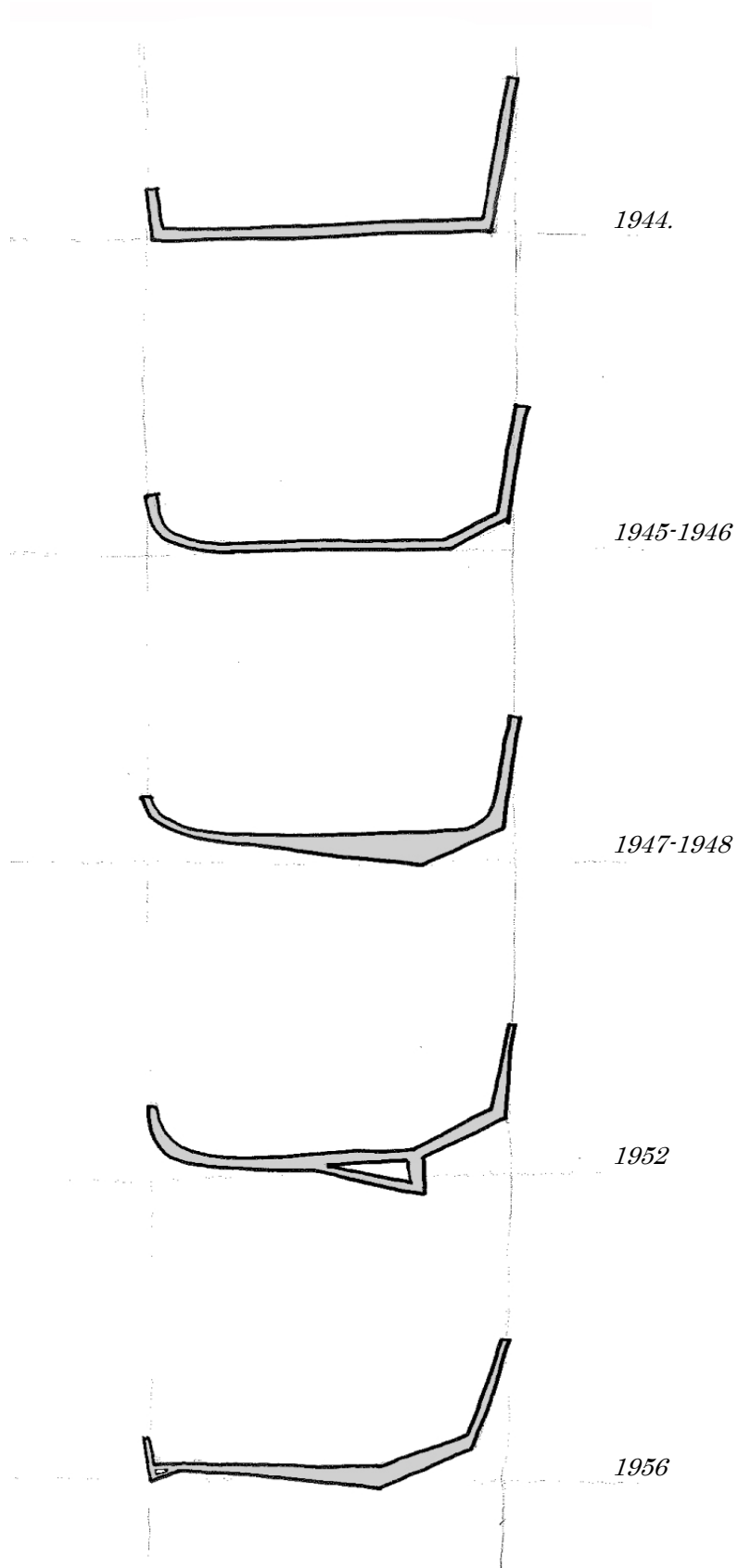
El núcleo de la sala principal se desdobra y cambia de forma circular a rectangular y triangular. Los soportes lenticulares de la planta baja, dispuestos tangencialmente, se reducen de tamaño para colocarse radialmente definiendo el hueco de la diagonal de la planta baja. En los niveles superiores de la rampa, se consolida la solución de mamparas radiales cada 30°, cuya dimensión va creciendo con la altura del edificio.

En el edificio satélite la estructura de la propuesta anterior se simplifica, sustituyendo los soportes cada 30° por pilares lenticulares cada 60°.





**Fig. 3.2.14** La disposición del edificio dentro de la parcela vuelve a girarse respecto a la versión anterior. No obstante, el sistema estructural sigue siendo el mismo: Nueve pantallas radiales, cada  $30^\circ$ , que arrancan del segundo nivel. En el punto de apoyo se produce la macla de cada pantalla con el cilindro de las dos plantas inferiores. El sistema de soporte se completa mediante el núcleo y los dos pilares frente al mismo, aunque en uno de los casos la función de soporte es de dudosa eficacia.



**Fig. 3.2.15** En la evolución de la sección de la rampa desde la versión de 1944 hasta la finalmente construida, puede apreciarse como la forma de la misma se va transformando y depurando hacia la opción final del voladizo, hacia el interior del edificio.

Desde el punto de vista de la estructura, durante esta evolución a lo largo del tiempo existe un denominador común que se fue concretando y clarificando a medida que avanzaba el desarrollo del proyecto. Desde el primer planteamiento de plantas hexagonales independientes, el camino recorrido por Wright evolucionó hacia un sistema estructural cada vez más sofisticado con la intención fundamental de hacer confluir el concepto de espacio y de recorrido del edificio con la forma de la estructura. El resultado queda lejos de cualquier sistema tradicional de pilares y vigas, incluso va mucho más allá que el simple deslizamiento de unas plantas sobre otras como sucede en la Casa de la Cascada. Al margen de la evolución en la disposición de los volúmenes debida a los cambios de dimensiones o programáticos del solar, el camino recorrido fue de ida y vuelta, necesario para llegar al resultado final que hoy conocemos.

Toda esta transformación a lo largo del tiempo permitió a Wright confirmar su idea principal de continuidad y transición entre los espacios, sin cambios bruscos, formalizada en la rampa espiral ascendente. Sin embargo, el esquema al que se llega, tiene mucho que ver también con la primera propuesta de plantas hexagonales. No se trataba de un sistema estructural de pilares y vigas, ya superado por Wright desde hacia tiempo, pero tampoco proponía ninguna solución novedosa que le permitiese avanzar en sus principios sobre la concepción espacial. El sistema de mamparas que dividían las salas, aparte de tener una función arquitectónica, servía como soporte de la estructura de forjados. Mediante un pequeño voladizo hacia el atrio interior y liberando las esquinas del hexágono perimetral exterior, desaparecía la sensación de “caja” de manera que la propuesta encajaba bien, a priori, con todos los planteamientos arquitectónicos de Wright expuestos hasta el momento.

Durante los dos meses posteriores, en enero y febrero de 1944, Wright vislumbró el verdadero objetivo de su edificio: la rampa continua sin soportes interiores. En primera instancia, las plantas se unían entre sí formando una espiral, que tanto tenía que ver con la concatenación suave de la atmósfera interior, en forma de zigurat. Pero un mes más tarde, Wright dio la vuelta a la forma del edificio, pasando a ser un zigurat invertido o “tarugiz”. Su intención inicial fue que la rampa continua, abriéndose hacia la parte superior del edificio, pudiese resolverse sin más apoyos que el propio núcleo de comunicaciones, formalizado en inicio mediante un cilindro.

En la propuesta de enero de 1946, justo antes de la incorporación de J.J. Polivka al proyecto, la posición del núcleo en relación a la espiral se había invertido respecto al planteamiento inicial. Además, el eje principal del edificio quedaba girado 30° en relación al borde de la parcela. En esta presentación del proyecto, Wright realizó una maqueta desmontable, para poder apreciar la atmósfera del atrio interior, donde se observaba una serie de columnas dispuestas radialmente cerca del borde interior de la rampa. Sin embargo, en los planos de esa propuesta no figuran estos pilares. En ese momento, Wright había publicado en la revista *Architectural Forum*<sup>123</sup> el artículo en el que manifestaba su descontento hacia los ingenieros de estructuras al no querer ir más allá de los sistemas típicos de entramado y considerar la estructura también como una unidad global continua, no como una

---

<sup>123</sup> *Architectural Forum*. Enero de 1946, pág. 82

superposición de plantas apoyadas sobre pilares o muros. Hay que señalar que los pilares de la maqueta demostraban la complejidad del sistema que Wright intentaba llevar a cabo, sin resolverse en aquel momento.

Polivka proporcionó a Wright las herramientas necesarias para realizar esta idea, pero cuando el proyecto estaba listo para construir esta arriesgada solución, la coyuntura económica no lo permitió. La muerte de Solomon Guggenheim ralentizó la situación más aún y provocó incertidumbres debido a las desavenencias entre Wright y los nuevos gestores de la fundación. Finalmente, en 1952 se concretó una nueva solución que intentaba recoger todas las variaciones acumuladas hasta el momento (ampliaciones del solar y modificaciones del programa) y, sobre todo, buscando una solución más económica a su construcción. Para ello resultó fundamental variar el esquema estructural con el consecuente cambio en la concepción del edificio. De una superposición de voladizos formando una espiral en suspensión, se pasó al apoyo múltiple de la rampa, “rigidizando” el volumen como si se tratase de una cáscara.

El edificio, finalizado en 1959, mantuvo este planteamiento y resolvió todas las objeciones planteadas por la comisión de control de la edificación de New York.

Polivka, de entrada, no descartó la opción del “resorte” propuesta por Wright, aunque su trabajo pronto se decantó hacia la versión del “nautilo” (costillas en el perímetro exterior) resultando fundamental a la hora de defender esta solución frente a las autoridades. Su presencia en el proyecto supuso también un papel importante a la hora de defender la opción de estructura de hormigón frente a la alternativa de un entramado de acero que, a pesar de la opinión más favorable de Wright, hubiese ido en detrimento del resultado final.



### 3.3 La participación de Jaroslav J. Polivka

Como se ha podido apreciar, la arquitectura de Wright tiene una componente estructural fuertemente intuitiva por lo que, desde las obras iniciales, ha explorado las diferentes posibilidades tanto de los materiales y sistemas constructivos como de las tipologías estructurales. Cuando la envergadura de la estructura ha sido menor, la intuición resultaba suficiente para la resolución del problema. Pero posteriormente, conforme el grado de integración de la estructura con el edificio fue adquiriendo importancia, Wright incorporó a su equipo de colaboradores especialistas en esta materia como Paul Mueller, antiguo colaborador de Adler y Sullivan para el edificio Larkin y más tarde a Mendel Gleckman y William Wesley Peters, que desarrollaron estructuras como las columnas dendriformes del edificio Johnson o los voladizos de la Casa de la Cascada. La inquietud de Wright por avanzar más terreno en este sentido estaba al límite de los conocimientos de la época y en ese oportuno momento Polivka estableció contacto con él. Polivka proponía soluciones estructurales fuera del alcance de la mayor parte de ingenieros del momento, tanto respecto al hormigón como material estructural como de los métodos de análisis de sistemas complejos.

La primera toma de contacto fue motivada a partir de las críticas lanzadas por Wright hacia los ingenieros, ya que no veía que las soluciones estructurales habituales fuesen en sintonía con sus inquietudes arquitectónicas.

*15 de febrero de 1946*

*Mr. Frank Lloyd Wright*

*Taliesin, Ws*

*Estimado Sr. Wright:*

*Le escribo como admirador suyo y de su trabajo desde hace tiempo, lo cual no significará mucho para Ud. porque estoy seguro que Ud. recibirá cartas similares a millares, y probablemente esta carta pasará desapercibida.*

*Le admiro a Ud. como ingeniero, a pesar de que, conforme a una cita suya en la última edición de Forum, estos ingenieros sean unos completos malditos estúpidos.*

*Puede que Ud. tenga razón porque los ingenieros, en sus concepciones estructurales, en muy raras ocasiones se guían por las eternas leyes de la naturaleza. Tome por ejemplo las telas de araña, que deberían ser estudiadas por los ingenieros cuya especialidad sea la construcción de puentes colgantes y redes estructurales bi- o tridimensionales.*

*El ingeniero medio sólo sabe de losas, vigas, vigas metálicas, columnas, etc. y cualquier desviación de esas herramientas cotidianas se considera algo inusual, loco o peligroso.*

*Durante muchos años he estado luchando contra este prejuicio. Su trabajo confirma y fortalece mis ideas y por ello le estoy muy agradecido.*

*Muy atentamente,*

*J.J. Polivka*<sup>124</sup>

Wright contestó cordialmente, de manera muy breve, como solía ser habitual en sus respuestas.

*13 de abril de 1946*

*Estimado Dr. Polivka: ¿Por qué no se acerca por aquí a vernos?  
Estaremos aquí hasta finales de mayo y Ud. será bienvenido en cualquier momento. Me gustaría hablar con Ud.*

*Atentamente,*

*Frank Lloyd Wright*

*Taliesin West, Scottsdale, Arizona*<sup>125</sup>

Polivka acudió con su mujer a Taliesin en Arizona, incorporándose durante unos días a la actividad del taller. A Wright le gustaba que sus colaboradores se integrasen en las actividades de Taliesin, conviviendo durante las épocas de trabajo. Polivka quedó gratamente sorprendido por el ambiente que encontró, volviendo a su estudio de Berkeley con el encargo de estudiar y analizar las posibilidades de la estructura del museo.

*4 de mayo de 1946*

*Mi mujer y yo estamos altamente impresionados por el maravilloso sitio, bonita y confortable arquitectura, pacífico e inspirador ambiente. Por encima de todo disfrutamos de la acogedora atmósfera creada por su carismática personalidad y la detallista Mrs. Wright y su familia. Le enviaré regularmente informes en relación al progreso del trabajo de la Modern Gallery en New York al que estoy dedicado...*

*J.J. Polivka*<sup>126</sup>

Uno de los aspectos fundamentales que preocupaban a Polivka, al margen del análisis, era la puesta en obra de la estructura. Para ello, se puso en contacto con la empresa que él consideraba de referencia, con experiencia en la construcción de grandes estructuras de hormigón armado y pretensado. La compañía Corbetta Construction Company, mostró una buena disposición a la hora de exponer su visión desde el punto de vista estrictamente constructivo.

*Corbetta Construction Company, Inc.*

*220 East 12th Street, Nueva York, 17, N.Y.*

*Murray Hill 2-8215*

*7 de mayo de 1946*

---

<sup>124</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_01

<sup>125</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_05

<sup>126</sup> Polivka Papers. Folder 1.07 "What is like to work with Wright"

*Dr. J. J. Polivka  
1150 Arch Street  
Berkeley 8, California*

*Estimado Doctor:*

*Muchas gracias por su carta del 4 de mayo de 1946.*

*Sí, estaríamos muy interesados en el trabajo de Nueva York que según Ud. tendría alrededor de 50.000ft<sup>2</sup> [4.645m<sup>2</sup>] de estructura de láminas de hormigón armado.*

*El tema del coste de este tipo de trabajo, como el de cualquier otro tipo de construcción hoy en día, resultará muy probablemente engañoso, particularmente cuando no se dispone de planos, las especificaciones o la localización de la obra. De hecho, es más probable que el propietario obtenga mayor ahorro mediante la práctica cada vez más usual de conceder un contrato sobre una base coste+tarifa fija, que acudiendo a una adjudicación por concurso.*

*Por razones de necesidad, los contratistas deben incluir hoy en día amplias cláusulas condicionales que les permitan afrontar los siempre presentes riesgos del incremento del coste de los materiales, la falta de eficiencia de la mano de obra y las incertidumbres sobre la entrega de los materiales.*

*Sin embargo, nos gustaría saber más sobre el proyecto que Ud. tiene en mente y tenga la seguridad de que le prestaremos nuestra mejor atención. Hemos realizado más construcciones de este tipo que cualquier otro contratista en el país.*

*La copia que nos adjuntó del Architectural Record de 1939 sobre el "Glass-Crete"<sup>127</sup> es muy especial y novedosa para nosotros.*

*Cuéntenos más sobre su sistema de construcción para las casas de veteranos, donde se usan unidades de hormigón prefabricado con las que, según Ud., se puede erigir una casa en un día.*

*Atentamente,*

*Presidente Corbetta Construction Co, Inc.<sup>128</sup>*

Polivka transmitía a Wright rápidamente cualquier avance de la investigación, tanto sobre las cuestiones analíticas como en las gestiones que realizaba con tal de afianzar la solución en voladizo tan controvertida. En estos avances le adelantó un predimensionado de los espesores de losa que se podían manejar para conseguir la rigidez necesaria del conjunto, sin penalizar demasiado el peso propio de la estructura. Para Polivka, dada la complejidad del problema, era necesario avanzar la investigación de varias maneras diferentes en paralelo. Por un lado, como hemos visto, contactando con la colaboración de ejecutores del hormigón armado con cierta

---

<sup>127</sup> Posiblemente se refieren a los bloques de vidrio, como los propuestos en el Hotel de Dallas.

<sup>128</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_10



reputación y experiencia en la construcción de superficies singulares con este material. Por otro lado, afrontando el problema desde el punto de vista teórico, a través del planteamiento de las ecuaciones propias para el análisis de láminas<sup>129</sup>. Pero como hemos dicho, la complejidad geométrica de la estructura suponía realizar grandes simplificaciones del problema original, de manera que el análisis exclusivamente teórico resultaba ciertamente arriesgado al no haber precedentes geométricos al respecto. Por este motivo, Polivka consideraba necesario complementar el análisis mediante la verificación de las deformaciones tomadas en maquetas realizadas en el laboratorio de la Universidad de Berkeley. Las maquetas por sí solas no aportaban la precisión requerida, pero servían para establecer un criterio que permitiese confirmar el acierto del planteamiento numérico.

*5 de junio de 1946*

*Mr. Frank Lloyd Wright*

*Taliesin, Spring Green, Wisconsin*

*Estimado Sr. Wright:*

*Le remito los resultados de las investigaciones preliminares sobre la parte principal de la estructura de la Modern Gallery en New York. Después de algunas reflexiones decidí abordar el problema primero teóricamente y posteriormente verificar los resultados obtenidos con ensayos en maquetas. Ni los ensayos ni el análisis por sí solos proporcionarían bases fiables para el diseño.*

*Una lámina de seis pulgadas [15,24cm] asumiría todas las fuerzas internas (radial, tangencial, momentos de torsión y cortantes). Sin embargo, una losa de espesor tan reducido es extremadamente flexible y aunque las deformaciones considerables no afecten a la seguridad de la estructura, pueden crear vibraciones alarmantes.*

*Estamos preparando las maquetas para el ensayo y las pruebas mostrarán en qué medida el análisis teórico puede aplicarse a la estructura sometida a estados de carga más complejos y bajo la consideración de las dimensiones reales.*

*El método de análisis que se utilizará será parecido al método tratado en mi artículo titulado "Análisis experimental de tensión de puertas hidráulicas en los astilleros Kaiser, Richmond, California"<sup>130</sup>, que será presentado en el congreso anual de la Sociedad para el Análisis Experimental de Tensiones en Buffalo, el 24 de junio de 1946 por la mañana.*

*Lamento no haber sido capaz de quitarle esto de encima antes, pero como usted sabe, este ha sido un hueso duro de roer.*

---

<sup>129</sup> Ver apartado 3.4 [Fig. 3.4.7-8]

<sup>130</sup> *Experimental Strees Analysis of Caisson Gates in the Kaiser Shipyards, Richmond, California*. Society for Experimental Strees Analysis in Buffalo, 1946

*Durante este mes podré investigar la cimentación para la Tower Building of S.C. Johnson & Son, Inc. Racine, Wisconsin. Para tal fin, necesitaré los planos generales de este edificio con indicación de las sobrecargas que hay que considerar y otros detalles necesarios para el análisis.*

*Con mis mejores saludos para ud. y su familia,*

*Atentamente,  
J.J. Polivka<sup>131</sup>*

La verificación del planteamiento inicial de Wright seguía su curso y Polivka no sólo se limitaba a predimensionar los espesores de las láminas de hormigón o estrictamente a verificar su funcionamiento, sino que también sugería la introducción de modificaciones en la estructura que repercutían en el resultado arquitectónico final, como la geometría de la propia rampa, la posible función estructural de la barandilla y la fachada o la importancia de las dos columnas frente al núcleo anteriormente comentadas.

*17 de junio de 1946*

*D. Frank Lloyd Wright*

*Taliesin, Spring Green, Wisconsin.*

*Asunto: La Modern Gallery, New York*

*Estimado Sr. Wright:*

*Adjunto le envío 12 páginas del informe respecto a los ensayos realizados en maquetas, representando la típica rampa espiral del edificio de exposiciones.*

*Los resultados presentados en esos modelos demuestran que su concepción de la rampa alabeada en espiral con el borde interior cóncavo es segura (como yo había previsto y así manifesté a su yerno Wes Peters), como se demuestra por lo siguiente:*

*(1) La rampa alabeada en espiral tiene substancialmente mayor rigidez y, su máxima deformación se reduce un 40% aproximadamente. La curvatura tangencial de la rampa proporciona a la placa<sup>132</sup> el valor característico de una lámina<sup>133</sup>, reduciendo así la intensidad de los momentos flectores y consecuentemente las deformaciones.*

*(2) El borde interior cóncavo de la rampa es el otro factor que aumenta la rigidez y la capacidad portante de la losa.*

*(3) Los apoyos creados por las dos columnas circulares huecas funcionan como refuerzo añadido de la rampa, especialmente en la proximidad de dichas columnas.*

---

<sup>131</sup> Polivka Papers. Folder 1.2\_68

<sup>132</sup> Plate, lamina plana

<sup>133</sup> Shell, lámina curvada

*Adjunto fotos que muestran el resultado de los ensayos a las que seguirán fotos a mayor escala. Se están preparando los datos para el diseño final.*

*Esperaba poder haber asistido a la reunión en Buffalo, N.Y. pero decidí no ir ya que quería terminar con este trabajo cuanto antes.*

*Ahora ya estoy preparando los datos para el diseño final.*

*Con mis mejores saludos personales,*

*Atentamente,*

*J.J. Polivka<sup>134</sup>*

A diferencia de las prácticas habituales actuales, donde casi todo está regulado por algún tipo de código normativo, en el momento de la redacción del proyecto de la Modern Gallery, ciertas cuestiones podían quedar sujetas al criterio del proyectista. En este caso, la aplicación de la sobrecarga de uso resultaba de especial importancia ya que una cuantificación demasiado conservadora podría dificultar la situación hasta el punto de transformarla en inviable. Por otro lado, aspectos del análisis en detalle resultaban de crucial importancia. La mayor concentración de esfuerzos en la rampa se focalizaba alrededor de la intersección con los soportes, debido a que este era el punto de máximo momento negativo. En estas zonas la variación de esfuerzos en un área pequeña era considerable y tanto un análisis numérico simplificado como la elaboración de maquetas generales podían pasar por alto gradientes tensionales que resultasen cruciales para el conjunto. Esta cuestión, conocida también como análisis de regiones de discontinuidad, Polivka planteaba abordarla mediante la elaboración de maquetas en detalle analizadas mediante foto-elasticidad.

*25 de junio de 1946*

*Mr Frank Lloyd Wright*

*Taliesin, Spring Green, Wisconsin*

*Querido Mr Wright:*

*Desde que le escribí enviándole el informe sobre el modelo de tensiones me he dado cuenta de que no he analizado la seguridad de los soportes de la rampa espiral. Este elemento estructural, en mi opinión, es la clave de todo el diseño y creo que podría añadir al informe cómo se puede resolver este problema.*

*Esta explicación retrasará un poco el envío del informe.*

*He especificado en las páginas 31 y 32 el espesor variable de la losa, el cual me parece satisfactorio. El resultado de máxima deformación se calculó bajo la asunción de una sobrecarga de uso de 100PSI<sup>135</sup> [488,24Kg/m<sup>2</sup>] cubriendo la totalidad de la superficie, incluso el borde cóncavo y sin tener en cuenta el factor de reducción por la acción del voladizo a partir del límite de la losa más, allá de los soportes de la estructura. La situación es bastante extrema y exagerada, ya que no es muy probable que unas 3.500 personas puedan*

---

<sup>134</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_70

<sup>135</sup> Pounds per Square Inch, Libra por pulgada cuadrada

*concentrarse en una de las plantas al mismo tiempo. En vista de estos factores, la deformación actual de la parte más desfavorable de la rampa (frente a los ejes) se espera que sea del orden de 1 ½ pulgadas [3,80cm] lo cual puede considerarse dentro de los límites razonables y aceptables.*

*Estoy preparando una maqueta de detalle del encuentro para ensayarla mediante foto-elasticidad, ya que el método habitual de diseño no se puede aplicar en este tipo de elementos estructurales.*

*También le enviaré fotografías de la maqueta n°4 dentro de poco tiempo.*

*Pd. En una carpeta independiente le envió las páginas 18 a 32 y 1 a 17 ya revisadas.<sup>136</sup>*

Wright no dudaba de las bondades del análisis de Polivka e iba incorporando las sugerencias que este le proponía a excepción de los soportes radiales en el exterior de la rampa. El motivo de esta fácil adaptación de los comentarios a las diferentes propuestas radicaba en el entendimiento de la naturaleza del material por parte de ambos. En el caso de Wright, la búsqueda de la unidad y continuidad se concretaba gracias a las sugerencias de Polivka. Por otro lado, Polivka era plenamente consciente de las inquietudes de Wright y de que cualquier decisión respecto a la definición de la estructura repercutiría en el resultado final del edificio.

*Dr. J.J. Polivka  
1150 Arch Street Berkely 8  
27 de Junio de 1946*

*Mí querido Dr. Polivka: Hemos estado esperando las páginas del informe y éstas acaban de llegar. La tesis ha sido interesante y puede ser posible incorporar sus sugerencias.*

*Sinceramente suyo,  
Frank Lloyd Wright<sup>137</sup>*

*Dr. J.J. Polivka  
1150 Arch St. Berkely Calif.  
11 de Julio de 1946*

*La cuestión que me ha enviado es muy interesante y probablemente muy válida para nosotros. Tan pronto como tenga tiempo me introduciré en el problema cuidadosamente, tendrá noticias mías directamente. Frank Lloyd Wright<sup>138</sup>*

Aunque las respuestas de Wright eran breves, Polivka sentía que su trabajo servía de gran ayuda en el desarrollo del proyecto del museo y esto, junto a la admiración

---

<sup>136</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_71

<sup>137</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_75

<sup>138</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_74

que sentía por Wright, hacía crecer su entusiasmo por el encargo. Una de las preocupaciones de Polivka fue parametrizar el problema de manera que no tuviese que comenzar un nuevo análisis cada vez que fuese necesario variar la geometría de la rampa debido a cuestiones formales o programáticas. El funcionamiento estructural del edificio podía dividirse en cada uno de los niveles de la rampa, en cuyos casos las anchuras de la rampa y los diámetros interiores y exteriores fueron variando a lo largo del proceso. Por este motivo, y con tal de facilitar futuras adaptaciones, Polivka estableció un criterio general de dimensionado de la rampa en voladizo a partir de unos parámetros básicos como el radio interior y el exterior. Tanto las maquetas generales como los ensayos de foto-elasticidad se referían a un nivel tipo, una de las roscas de la espiral, y, a través de la extrapolación hacia las diferentes situaciones dimensionales, era posible analizar el resto del edificio.

*27 de julio de 1946*

*Mr. Frank Lloyd Wright*

*Taliesin, Spring Green, Wisc.*

*Querido Mr. Wright:*

*Gracias por su telegrama del 11 de Julio. Estaba esperando recibir noticias tuyas.*

*En la carpeta aparte, le envió hoy mismo la propuesta para simplificar el método de análisis de la rampa espiral alabeada, el cual puede aplicarse a las diferentes variaciones de anchura y diámetro exterior. Este método de análisis tiene un rendimiento de obtención de resultados muy similar al de los ensayos de maquetas.*

*Como le mencioné en mi carta del 25 de junio, estoy preparando ensayos de foto-elasticidad de los encuentros de los pilares soporte con la rampa, siendo estos los puntos más importantes de la estructura del edificio.*

*Sin tener aun noticias tuyas, me gustaría saber si en este momento está usted interesado en completar estas investigaciones o si prefiere posponer la investigación hasta una fecha posterior.*

*Esperando tener noticias tuyas próximamente y con especiales saludos personales,*

*Sinceramente suyo*

*J.J. Polivka<sup>139</sup>*

A mediados de agosto de 1946, poco más de tres meses después del comienzo de la colaboración, Polivka había avanzado considerablemente en la investigación, sugiriendo mejoras estructurales que fueron incorporadas y estableciendo unos criterios generales de dimensionado para este edificio que permitían realizar ajustes dimensionales sin necesidad de comenzar un análisis desde el inicio. Para Wright este trabajo resultó de gran utilidad, pero llegado a este punto y, ante la incertidumbre sobre la ejecución de las obras, no deseaba seguir costeadando las horas de trabajo de Polivka.

---

<sup>139</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_79

*9 de agosto de 1946*

*Estimado Polivka: por ahora no quiero incurrir en más gastos de los que usted ya ha cargado en mi cuenta. Indudablemente lo que usted ha hecho (y hará) me será de gran ayuda cuando el nuevo Museo sea construido. Nosotros estamos esperando la oportunidad de construirlo. Pero si usted por ahora se inclina por continuar adelante con el trabajo, no dude que será útil más adelante y la correspondiente compensación será convenida. Sinceramente suyo.*

*Frank Lloyd Wright<sup>140</sup>.*

En ese momento, la situación económica mundial y, en concreto la de los Estados Unidos no era muy favorable, por lo que Polivka, a pesar de su especial interés por continuar su dedicación, también requería de las correspondientes compensaciones económicas, como es normal. Aún así, siguió trabajando y enviando información a Wright, acompañando sus comentarios particulares del análisis con elogios hacia el edificio y la figura del arquitecto.

*16 de agosto de 1946*

*Mr. Frank Lloyd Wright*

*Taliesin, Spring Green, Wisc.*

*Querido Mr. Wright:*

*Le agradezco su amable carta del 9 de agosto. Encuentro gran satisfacción en sus palabras sobre que el trabajo que he realizado y que haré para la Modern Gallery en New York, será de gran ayuda para usted. Espero y confío en que este hermoso edificio sea construido en un futuro muy cercano, no sólo como un eterno monumento hacia su ingenio, sino también como un testimonio histórico de que el liderazgo de la ciencia y técnica norteamericanas se han extendido también al Arte y la Arquitectura.*

*América no tiene necesidad de tomar prestados o imitar los principios europeos de la arquitectura moderna, tal como mucha gente quiere creer. Estuve siguiendo esas corrientes en Europa durante las pasadas cuatro décadas y encontré, por el contrario, que las lógicas, sólidas y progresistas características de la arquitectura moderna europea están ampliamente influenciadas y fecundadas por sus vigorosas e indisolubles ideas.*

*Por supuesto yo no sólo estoy “inclinado” (como usted dice) a continuar el trabajo, sino deseoso y orgulloso de realizarlo....*

*Fue usted muy considerado al decir que me enviará un cheque pronto. Ciertamente lo apreciaría, ya que podría hacer buen uso de él, justamente ahora (nuestra hija vino recientemente de Europa y vive con nosotros, y hace un mes Helen, la mujer de nuestro hijo mayor Jan, que estudia Ingeniería Civil en Columbia y espera graduarse el año próximo tras estar cinco años en la armada de U.S. tuvo gemelos).*

---

<sup>140</sup> Polivka Papers. Folder 1.07 “What is like to work with Wright”

*He pensado que podría enviarme un cheque pronto. Aprendería recibirlo, ya que haría buen uso de ello en este momento.*

*En unos días le enviaré un completo estudio de la cimentación de la Johnson's Research Tower Building, y también una discusión y verificación más a fondo respecto de la rampa alabeada en espiral del Museo de Arte de New York. Me parece que todas estas cuidadosas investigaciones son y serán necesarias para convencer a los ingenieros del Departamento de Construcción de que la estructura es sólida y segura.*

*Espero que haya recibido la información e informe acerca del vidrio Thermolux que le envié el 30 de julio. Quedo a la expectativa de sus palabras.*

*Sinceramente suyo*

*J.J. Polivka<sup>141</sup>*

A pesar de la situación, Polivka tenía especial empeño en concluir el estudio que confirmase la viabilidad de la solución sin soportes en el borde interior de la rampa. El informe iba también encaminado a la justificación de la estructura frente a las autoridades de New York, cuestión que resultaba necesaria en las situaciones en las que la estructura no se ajustaba a los patrones conocidos y regulados en la construcción habitual: entramados de acero formados por pilares y vigas.

*9 de octubre de 1946*

*En una carpeta separada le envió las páginas 51 a 64 del análisis perteneciente a la Modern Gallery en New York. Espero completar el estudio este mes y enviarle los resultados de todas mis investigaciones de forma que puedan ser valoradas por el Departamento de Construcción en caso de ser requerido. La parte principal serán los resultados de las maquetas de prueba. Realicé un cuidadoso análisis teórico porque encontré que algunos cálculos y fórmulas publicados referentes a problemas similares eran erróneos. Algunos autores han confirmado los errores y erratas en sus libros y documentos...*

*J.J. Polivka<sup>142</sup>*

Durante el final de 1946, y con la intención de aliviar el resultado económico de la construcción, en Taliesin exploraban otras posibilidades con tal de ajustar al máximo el coste de la estructura del edificio. Una de las vías estudiadas era la de transformar la estructura en un entramado de acero, situación que Polivka no llegó a rechazar directamente, pero que, a la vista de sus pasos, no parecía ser demasiado partidario de ella. De este modo, siguió con la investigación en el plano económico y sobre los planteamientos constructivos, contando con la colaboración de la compañía Corbetta, ya mencionada anteriormente.

*24 de noviembre de 1946*

*Corbetta Construction Company*

*220 East 42nd Street, New York 17, N.Y.*

---

<sup>141</sup> Polivka Papers. Folder 1.03\_03

<sup>142</sup> Polivka Papers. Folder 1.7 "What is like to work with Wright"

*Apreciado Sr. Corbetta:*

*En referencia a su carta del 7 de mayo, olvidé informarle que la estructura mediante lámina de hormigón que le mencioné en mi carta anterior, está en el último estado de diseño y me gustaría discutir el trabajo con usted próximamente. Hay un esquema alternativo en estudio mediante esqueleto de acero embebido en hormigón y una discusión en persona podría aclarar algunos problemas que he encontrado en esta inusual construcción. Estoy planificando ir a New York la segunda mitad de diciembre. Por favor, hágame saber si estaría disponible para discutir este asunto. La cuestión principal es elegir la estructura más económica bajo las condiciones actuales.*

*Podemos aprovechar la ocasión para hablar sobre mi sistema constructivo de casas para veteranos.*

*Sinceramente suyo.*

*J.J. Polivka<sup>143</sup>*

Frente a esta actitud perseverante de Polivka y viendo que el coste por la investigación de la estructura de la Modern Gallery se incrementaba, Wright se dirigió a Polivka de manera firme, para que interrumpiese su trabajo.

*10 de diciembre de 1946*

*Dr. J.J. Polivka*

*1150 Arch Street, Berkeley 8, California*

*Mí querido Dr. Polivka: ¿Es posible que haya pasado por alto mi carta donde le pido que no haga nada más a mi cuenta hasta que no se lo diga?*

*Y el cheque que se le envió, ¿no fue señalado como recibido por todos los servicios hasta la fecha?*

*El motivo es que no he aceptado todavía utilizar el análisis que usted presentó, la cuestión está por tanto en el aire. Cuando lo decida le haré saber si es conveniente que siga trabajando con nosotros.*

*Ya le diré cuando.*

*El acero resulta, en conjunto, mas pesado de lo que pensábamos. El esquema de Dobell es interesante, pero tengo miedo de que sea impracticable.*

*Sinceramente suyo*

*Frank Lloyd Wright<sup>144</sup>*

Posiblemente Polivka dejó de pasarle más facturas a Wright, pero no canceló las entrevistas que tenía concertadas para ese mes de diciembre en New York con Mr. Corbetta con la intención de tratar diferentes aspectos de la ejecución de las láminas de hormigón y con Mr. Murdock, responsable del Departamento de Construcción de New York. Polivka informó a Wright puntualmente sobre las consultas realizadas y, a pesar de que intentaba no poner de manifiesto el conflicto

---

<sup>143</sup> Polivka Papers. Folder 1.03\_80

<sup>144</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_86



entre un entramado de acero y la solución de láminas de hormigón, sus pasos iban claramente encaminados hacia esta última solución.

*19 de enero de 1947*

*Mr. Frank Lloyd Wright,  
Scottsdale – Taliesin, Phoenix, Arizona*

*Querido Mr. Wright:*

*Siento mucho haber perdido la oportunidad de verle en San Francisco. Nosotros acabamos de volver de New York (ayer por la tarde). El recepcionista de Mark Hopkins me dio la decepcionante noticia de que usted había marchado ya.*

*En relación con otro diseño que involucra un tipo estructural más complicado, tuve una reunión con el señor Murdock, jefe de Board of Standard and Appeal en New York y quedé muy satisfecho de oír qué progresista era en New York el Departamento de Construcción. Aprobarán cualquier tipo de estructura si la firmeza y seguridad de la misma está suficientemente probada por ingenieros experimentados. No hablé de su edificio de la Quinta Avenida, no sin tener una autorización suya para hacerlo, pero el tipo de lámina estructural que expuse es más complicada que su rampa espiral alabeada.*

*Hablando acerca de la complejidad e intrincación de la estructura, tengo en cuenta las dificultades estructurales que tienen que hacer frente los ingenieros para superar las eternas leyes de la naturaleza con las torpes herramientas de las matemáticas y mecánica aplicada, lo que llamamos “análisis estructural”. Nunca alcanzaremos y realizaremos la sublime y simple solución del Creador.*

*Preparando los dibujos finales para la Modern Gallery en New York, debemos tener resueltos los últimos detalles típicos. No importa si el sistema de la rampa es simplemente de hormigón armado o mediante un esqueleto de acero embebido en el hormigón, será necesario disponer refuerzos postensados con el fin de prevenir fisuras e incrementar la resistencia de la estructura. Estoy pensando en un nuevo tipo de refuerzo pretensado que se ha desarrollado muy recientemente, concretamente el método del Dr. F. von Emperger, patentado el 2 de septiembre de 1941, U.S. P.L. N° 2,255,022. Emperger, el cual fue mundialmente reconocido como el padre del diseño moderno del hormigón (miembro honorífico del American Institute y doctor honoris causa de varias universidades americanas) murió en 1942. Yo estuve asociado con él en Viena hace bastantes años. Su método de pretensado tiene muchas ventajas, como el ahorro de una considerable cantidad de caro acero de alta calidad, mayor uniformidad y facilidad de pretensado, relativamente pequeña cantidad de refuerzos típicos adicionales, mejor hormigón sin fisuras; todas las propiedades para garantizar durabilidad de la estructura.*

*Espero tener noticias tuyas muy pronto  
Con los mejores deseos,  
Sinceramente suyo*

*J.J. Polivka*<sup>145</sup>

Este es el momento en el que parece que finalizó la primera etapa de colaboración entre Wright y Polivka. El proyecto se encontraba bloqueado por motivos económicos y, por parte de Wright, una de las posibles soluciones al respecto resultaba la de transformar la estructura en un entramado de acero. Polivka no veía argumentos técnicos objetivos para rechazar esta opción y de algún modo intuía también cuales eran las virtudes de la solución de hormigón desde el punto de vista arquitectónico. Por este motivo, buscaba la manera de resolver los dos aspectos conflictivos del planteamiento estructural, el económico y la aceptación por parte de las autoridades de New York de la intrépida solución de lámina de hormigón. Hay que señalar que el presupuesto total no debía sobrepasar los 1,5M\$ y en este momento la estructura de hormigón suponía más de la mitad de esta cantidad. Durante 1947 los esfuerzos por ambas partes se concentraron en desbloquear la situación en este sentido. Wright, además, debía sortear las dificultades particulares derivadas de planteamientos más generales, como la disposición de los cuadros a lo largo de la rampa o las particularidades del programa.

En vista de nuevos horizontes de cara a la ejecución, a mediados de 1947 se restableció la comunicación entre ambos.

*21 de julio de 1947*

*Estuve muy satisfecho de oír su vigorosa voz esta mañana a las siete en punto y le envié el siguiente telegrama: GRACIAS POR SU AMABLE INVITACIÓN. MRS POLIVKA Y YO VOLAREMOS A MILWAUKEE O MADISON EN UNOS DÍAS, DESPUÉS DE ORGANIZAR MI TRABAJO AQUÍ. SIGUE UNA CARTA. Su llamada fue un poco repentina y tengo que organizar el trabajo aquí. Trabajar con usted fue siempre una gran emoción para mí. Le agradezco su amabilidad de sugerir encargarse de todos los gastos de viaje y estancia para Mrs. Polivka y yo mismo, así como los \$10 diarios para dietas. Esto último parece ser bastante desestimado, pero su confianza de que esta cuestión de trabajo puede ser considerada más adelante, elimina inmediatamente cualquier duda y vacilación, especialmente en vista de su creencia de que mi trabajo no requerirá más de 2-3 horas por día. Las últimas semanas estuvieron aquí de vacaciones nuestros hijos y nietos de New York y Washington. Estuvimos muy felices, pero fue muy extenuante para nuestros nervios y bolsillo. Sólo el viaje de ida y vuelta cuesta unos \$450 para dos personas y estaríamos altamente agradecidos que me adelantase \$500 más o menos, a fin de mantener vivo mi entusiasmo.*

*J.J. Polivka*<sup>146</sup>

---

<sup>145</sup> Polivka Papers. Folder 1.04\_01

<sup>146</sup> Polivka Papers. Folder 1.07 "What is like to work with Wright"

Pero a pesar del entusiasmo mutuo por progresar con el proyecto, la situación no evolucionaba y varios meses más tarde el proyecto de la estructura seguía en el mismo punto.

*20 de octubre de 1947*

*Dr. J.J. Polivka*

*1150 Arch Street, Berkeley 8, California*

*Mí querido Dr. Polivka:*

*Las cosas han estado inestables aquí desde la última vez que le escribí, pero ahora estamos concretando y tendrá una propuesta definitiva pronto.*

*Sinceramente*

*Frank Lloyd Wright<sup>147</sup>*

*5 de noviembre de 1948*

*Dr. J.J. Polivka*

*1150 Arch Street, Berkeley 8*

*Querido Dr. Polivka: Vamos a seguir adelante el próximo invierno con el trabajo del Museo y la Casa Morris en S.F. juntamente con muchas otras cosas y, si usted no está comprometido y podemos hacer un arreglo razonable para que nos ayude, esperamos que pueda hacerlo.*

*Sinceramente*

*Frank Lloyd Wright<sup>148</sup>*

*8 de noviembre de 1948*

*Mr. Frank Lloyd Wright*

*Taliesin, Spring Green, Wisc.*

*Querido Mr. Wright:*

*Recibí su carta del 5 de noviembre con la buena noticia de que van a seguir adelante en próximo invierno con el trabajo del Museo y la Casa Morris en S.F. junto con otros trabajos. Mis mejores felicitaciones. Usted sabe cómo me inspira trabajar con usted y ciertamente arreglaremos todo lo posible para tener esta oportunidad.*

*Estoy siguiendo continuamente el trabajo en Maiden Lane en S.F. y me informaron que el Sr. Morris ha quedado con Wes dentro de dos semanas. ¿Estará usted allí también o preferirá tener una conversación en Spring Green?*

*Sinceramente*

*J.J. Polivka<sup>149</sup>*

---

<sup>147</sup> Polivka Papers. Folder 1.04\_13

<sup>148</sup> Polivka Papers. Folder 1.04\_40

<sup>149</sup> Polivka Papers. Folder 1.04\_41

En los siete trabajos en los que Polivka colaboró con Wright durante trece años, siempre mantuvo el mismo entusiasmo que al principio por trabajar junto a él. El encargo del museo fue el motivo fundamental de esta admiración. Del resto de trabajos desarrollados, algunos también se dilataron en el tiempo hasta la muerte de Wright, como el diseño del Butterfly Wings Bridge para la Bahía de San Francisco, del cual Polivka sentía tener también un alto grado de autoría, pero que por desgracia no se llegó a construir.

*18 de marzo de 1952*

*Frank Lloyd Wright*

*No hay nada en el mundo ni en mi vida que pueda afectar mi gran admiración por su genial trabajo.*

*La última vez, en Taliesin West, cuando organicé la reunión entre el Profesor Torroja y dos de sus asistentes con usted, Ud. se mostró totalmente esperanzado en la construcción definitiva de su incomparable Museo Guggenheim, y me dijo que me informaría cuando llegase la decisión final. Usted sabe lo mucho que aprecio esta oportunidad. Ahora estoy feliz al escuchar que el Museo será erigido este año, desafortunadamente recortado y reducido.*

*Esta podría ser una ocasión oportuna para encontrarnos próximamente, si usted no tuviese tiempo de organizar su estancia en San Francisco en esta importante etapa del desarrollo del puente.*

*Sinceramente suyo*

*J.J. Polivka*

*P.D. Por favor, trasmítame mis más sinceros recuerdos a la Sra. Wright, a tía Sophy y al tío Waldo, a su hija y a Wes.*

*Le adjunto una foto tomada el 27 de mayo de 1951 de la maqueta inacabada, con Strong, Abeya y Mr. Al Merry...<sup>150</sup>*

Una vez definida la estructura, durante 1952, Polivka siguió desarrollando el mismo tipo de trabajo que hasta el momento. Su actividad a partir de este momento se centró especialmente en las justificaciones frente a la comisión de la construcción de la ciudad de New York, ya que, pese a que el comportamiento general de la estructura era cada vez menos arriesgado, la tipología utilizada (láminas de hormigón de geometría curva) no era muy habitual en la construcción de edificios en ese momento. A pesar de las dificultades, como se ha expuesto anteriormente, las incertidumbres sobre la ejecución y utilización del sistema novedoso se fueron resolviendo hasta el comienzo de la construcción en 1956.

---

<sup>150</sup> Polivka Papers. Folder 1.05\_23



***Fig. 3.3.1*** Wright y Polivka durante una sesión de trabajo en Taliesin.

### 3.4 Métodos de análisis de estructuras laminares

El abordar analíticamente el dimensionado de una estructura es una cuestión relativamente reciente en la historia de la ingeniería y arquitectura. Hasta el siglo XVIII, prácticamente las únicas aproximaciones científicas al dimensionado de una estructura habían sido los modelos a escala de algunas grandes catedrales góticas, concentrándose en obtener una relación de proporcionalidad entre las dimensiones de las secciones, las anchuras y alturas del edificio. Este método, más que científico, resultaba ser empírico y a menudo se apoyaba en el principio de prueba-error, aprovechando los numerosos fracasos en este sentido. El objetivo de las aproximaciones era el de garantizar que todas las secciones de los elementos estructurales (arcos, bóvedas, columnas, muros, contrafuertes, etc...) quedasen completamente comprimidas, reconduciendo la resultante de los empujes horizontales hacia la vertical de la base de los elementos, mediante el incremento de peso propio. La mayor sofisticación en este sentido llegó con la Arquitectura Modernista que, utilizando únicamente materiales con capacidad de compresión, llegó a minimizar al máximo su dimensionado gracias a un análisis exhaustivo de la forma como medio principal de control de esfuerzos. Son ampliamente conocidos los modelos realizados por A. Gaudí para obtener geometrías ideales, a partir de la relación directa entre la forma de la catenaria traccionada y el funicular de compresión o principio de inversión.

A partir de las formulaciones desarrolladas por Leonhard Euler<sup>151</sup> en el siglo XVIII, el análisis de estructuras pudo empezar a apoyarse en argumentos más sólidos, que permitían prever el comportamiento de los materiales con mayor detalle. La aparición del acero primero y más tarde del hormigón armado, capaces de asumir otro tipo de esfuerzos (tracción y flexión, con su cortante asociado) implicaba la necesidad de un análisis más sofisticado, aplicando la teoría básica de la Resistencia de Materiales desarrollada por el mismo Euler y otros, como Hooke, Navier, Clapeyron o Mohr. Por poner un ejemplo conocido, el planteamiento matemático del fenómeno del pandeo de columnas esbeltas permitió posteriormente el desarrollo de secciones metálicas mucho más ligeras y con gran capacidad de carga, en comparación con las secciones de madera o mampostería, llegando así a un nivel superior de aprovechamiento del material que dio lugar al tipo de obras que todos conocemos. Estas teorías, sin embargo, permitían únicamente abordar estructuras compuestas por sistemas de barras.

Con el avance de la tecnología del acero, las tipologías estructurales fueron complicándose, generando entramados de barras cada vez más complejos que requerían métodos de análisis para la obtención de esfuerzos acordes con el sistema. Para entramados de barras, el método gráfico de Cremona resultó de gran utilidad. Pero este procedimiento sólo resultaba válido en el caso de que todas las barras estuviesen articuladas en sus extremos. Aplicado a entramados con nudos rígidos, resultaba ser una simplificación tan grosera que los resultados obtenidos eran de dudosa fiabilidad. Los edificios de la Escuela de Chicago basaban su

---

<sup>151</sup> Matemático y físico suizo 1707-1783. Propuso la formulación para abordar el fenómeno del pandeo en columnas esbeltas.

tipología estructural en el nudo rígido entre pilares y vigas de acero. En Europa, las primeras estructuras realizadas con hormigón armado también basaban la estabilidad del sistema en la rigidización de los nudos, por lo que se requería un método de análisis apropiado en ambos casos para obtener los esfuerzos en sistemas con un alto grado de hiperestaticidad. Axel Bendixen<sup>152</sup> y K.A. Čališev<sup>153</sup> desarrollaron métodos de reparto de esfuerzos en barras en función de sus rigideces, preámbulo del método de Cross, habitual hasta la aparición de los ordenadores. Estos métodos, aunque aproximados debido a su resolución iterativa, permiten precisar lo suficiente, ya que el grado de precisión depende del número de iteraciones. Sin embargo, su aplicación requiere la transformación de entramados tridimensionales en un sistema plano y esta simplificación sólo es válida en las situaciones donde la estructura está organizada siguiendo pórticos ordenados.

El hormigón, gracias a sus propiedades plásticas previas al endurecimiento, puede configurar superficies continuas donde, de nuevo, los sistemas analíticos antes citados vuelven a resultar demasiado simplificados. El método de pórticos virtuales o emparrillados planos requiere realizar simplificaciones que quedan a merced del proyectista que los aplica, sobre todo cuando la geometría de la estructura no es ortogonal o no se pueden identificar fácilmente las alineaciones de los soportes.

Gustave Kirchhoff<sup>154</sup> desarrolló en el siglo XIX su teoría de placas y láminas estableciendo las bases teóricas para la obtención de esfuerzos y deformaciones de este tipo de elementos estructurales. Esta teoría sólo resulta válida para placas delgadas y queda limitada a la aplicación en situaciones con geometrías concretas. En el caso del análisis de placas planas, las variaciones dependen de las condiciones de contorno, partiendo de geometrías rectangulares o circulares de la placa de manera que, a pesar de la limitación, permite resolver gran parte de las situaciones habituales de este tipo de elemento estructural. En cuanto a las láminas con curvatura, el problema se limita exclusivamente a bóvedas, cúpulas o paraboloides hiperbólicos, de manera que no es posible abordar problemas con otro tipo de geometría. Esta teoría fue complementada por Reissner<sup>155</sup> y Mindlin<sup>156</sup>, ampliando su campo de aplicación a placas de cualquier espesor.

---

<sup>152</sup> Ingeniero alemán que presentó en 1914 un método de resolución de entramados ortogonales con nudos rígidos.

<sup>153</sup> Ingeniero Servo-Croata que propuso en 1922 el método de resolución de entramados, predecesor del método de Cross.

<sup>154</sup> Físico prusiano 1824-1887 que desarrolló la teoría clásica de flexión de placas basada en la hipótesis básica de suponer que las secciones normales planas a la superficie neutra de la placa permanecen planas después de la deformación, cumpliendo la hipótesis de ortogonalidad de Bernoulli, lo que permite plantear la ecuación diferencial de la placa.

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{b}{D}; \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Donde  $w$  es el desplazamiento vertical de un punto genérico,  $b$  la carga distribuida,  $D$  la rigidez a flexión de la placa,  $E$  es el módulo de elasticidad,  $h$  el espesor de la placa y  $\nu$  el coeficiente de poisson (o distorsión volumétrica).

<sup>155</sup> Eric Reissner. Matemático e ingeniero alemán emigrado a Estados Unidos 1913-1996

<sup>156</sup> Raymond D. Mindlin. Ingeniero estadounidense 1906-1987

Stephen Timoshenko<sup>157</sup> desarrolló la teoría clásica de Resistencia de Materiales con fines docentes. Dentro de sus publicaciones se encuentra la Teoría de Placas y Láminas, publicada en 1940<sup>158</sup>. Este texto contempla situaciones mucho más variadas que las planteadas originariamente por Kirchhoff, haciendo alusión a placas circulares con agujeros o con diferentes variaciones de curvatura. No obstante, como en los otros casos, las limitaciones geométricas en el planteamiento del problema reducían en gran medida el poder abordar estructuras con formas poco habituales, como es el caso del Guggenheim. Además, el desarrollo de esta formulación se realizó muy poco antes del comienzo del proyecto del mueso, por lo que Polivka no disponía de una formulación contrastada al respecto. Fue aproximándose al problema con apoyo de la teoría básica o de recientes publicaciones. La ventaja de la aplicación directa de la teoría de placas y láminas resulta ser la exactitud de resultados, pero, de nuevo, las simplificaciones necesarias para conducir el problema hacia los patrones estudiados, en muchos casos se desvían tanto del modelo original que pierden la fiabilidad de toda precisión.

El esquema estructural propuesto por Wright, como hemos visto, no se ajustaba de una manera directa a los recursos analíticos disponibles en los años cuarenta. Los colaboradores habituales de Wright ya le habían transmitido sus preocupaciones acerca de la viabilidad de la estructura, motivo que propició la entrada de Polivka en el escenario del proyecto. En el texto, *What is like to work with Wright*<sup>159</sup>, Polivka confesó sus dudas sobre la idoneidad de los resultados exclusivamente analíticos, de manera que consideró que éstos debían verificarse mediante el ensayo de unas maquetas de plexiglas sometidas a diferentes situaciones de carga, que ratificasen los resultados obtenidos en el planteamiento teórico. En un primer momento, se apuntó hacia un planteamiento del análisis en el conjunto de la rampa espiral, abandonado esta opción rápidamente. En realidad, para Polivka la estructura, a nivel de análisis, resultaba ser mucho más sencilla que para Wright. El ingeniero consideró desde el inicio cada una de las plantas de forma independiente, como una lámina de forma circular, apoyada o empotrada en su perímetro y con un gran hueco circular en el centro. Esta situación, Timoshenko la abordaba analíticamente en su texto sobre placas y láminas de 1940, cuya aplicación más usual resultaba ser el análisis de placas y pistones de acero. Polivka, suponiendo primero un contorno articulado y posteriormente empotrado, implementó las ecuaciones de este caso para resolver una planta tipo del museo. La principal incógnita resultaba ser si, al no estar las plantas del museo contenidas en un plano sino formando una espiral continua, era posible aplicar esta teoría

---

<sup>157</sup> Ingeniero ucraniano emigrado a Estados Unidos 1878-1972

<sup>158</sup> TIMOSHENKO, S. – WOJNOWSKI - KRIEGER, S. *Theory of Plates and Shells*. Ed. McGraw-Hill Book Company, 1ª Ed. 1940, 2ª Ed. 1959

TIMOSHENKO, S, *Strength of Materials, Part II. Advanced Theory and Problems* Ed. McGraw-Hill Book Company, 1ª Ed. 1930, 2ª Ed. 1941

<sup>159</sup> Polivka Papers. Folder 1.07 “*What is like to work with Wright*”



directamente. Los ensayos con maquetas [Fig 3.4.4] verificarían la idoneidad del método analítico aplicado a este caso concreto<sup>160</sup>.

El problema, tal como lo planteó Polivka, tenía su origen en el análisis de placas de forma circular desarrollado por Timoshenko. A partir de la ecuación diferencial que plantea las condiciones de equilibrio, se obtiene una solución genérica donde aplicando las condiciones de contorno de las situaciones simplemente apoyada o empotrada, se concreta la forma particular para estas dos situaciones, despejando las deformaciones, momentos radiales, tangenciales o cortantes [Fig. 3.4.7].

Con un mayor grado de sofisticación, Timoshenko estudió también la posibilidad de que la placa circular tuviese un hueco centrado, formando un disco. El proceso es análogo al caso anterior, donde Polivka partió de la solución genérica del problema. En un primer tanteo aplicó las condiciones de contorno para estudiar el caso simplemente apoyado, pero la mayor parte del desarrollo lo basó en la situación con el perímetro empotrado [Fig. 3.4.8].

La opción de articular el perímetro constructivamente resultaba más sencilla que la solución empotrada. Además, la simplificación del apoyo en el borde exterior habría resultado seguramente más atractiva para Wright, que no deseaba que ningún elemento interfiriese en la circulación de la rampa. Pero debido a las dimensiones considerables de este caso, con un diámetro de entre 29m y 37m, las deformaciones del borde interior de la losa resultaron inadmisibles. Cuanto mayor es el diámetro menor es el efecto favorable de la forma circular. En el supuesto de un diámetro extremadamente grande, la losa debería trabajar casi exclusivamente en voladizo, empotrada en el perímetro exterior. De este modo, Polivka derivó el planteamiento hacia la losa empotrada [Fig. 3.4.8] con la intención de restringir la deformación del extremo del voladizo.

La ejecución del empotramiento resultaba a priori de difícil materialización, dado que se trataba de un voladizo “sin compensar”. Como hemos dicho, y posteriormente veremos en detalle, la fachada no resultaba ser un elemento estructural principal por lo que no era posible otorgarle la función de soporte del voladizo a causa de la discontinuidad entre plantas. De este modo, el empotramiento continuo deducido de la aplicación de la ecuación, debía configurarse a partir de la sucesión de unas pantallas cada 30°. La longitud de las pantallas, de 2,0m a 5,4m dispuestas de forma radial, permitía generar un par (mayor en las plantas superiores) que diese respuesta al empotramiento [Fig. 3.4.4]. Esta simplificación, a pesar de parecer de importancia considerable, sin embargo se observa en los modelos analizados mediante MEF [Apartado 3.7] que su efecto discontinuo queda completamente diluido en el borde interior. Por este motivo Polivka consideró necesario un análisis particularizado, mediante fotoelasticidad, de la unión de la losa con las pantallas, muy probablemente para evaluar la distribución de tensiones sobre el soporte de manera detallada. Los

---

<sup>160</sup> Hay que señalar que la utilización de maquetas no es habitual en el análisis de estructuras flexionadas, al no haber relación lineal entre el modelo y la realidad debido al efecto cuadrado/cubo (distancias y momentos resistentes). Sin embargo, en este caso, la intención de Polivka era la de verificar la idoneidad de un cierto método de análisis, aplicando en ese caso los valores propios del ensayo (dimensiones y características mecánicas del plexiglás).

gradientes tensionales en estos puntos sobrepasaban el ámbito del análisis general y demandaban un método de estudio más preciso. En 1946, para evaluar esta situación, la única herramienta disponible eran los ensayos mediante fotoelasticidad, con los que Polivka estaba familiarizado. Este aspecto complementaba el planteamiento analítico para las zonas particulares de discontinuidad y, junto a la verificación antes citada, concluía el estudio de la estructura de la rampa.

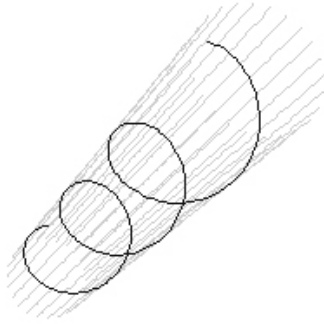
Para Polivka la única solución posible requería de un apoyo en el perímetro exterior de la rampa. Sus notas preliminares datan de 1946 y el planteamiento es el mismo desde el inicio. Sin embargo, Wright no incorporó este elemento hasta los planos presentados en 1952. La correspondencia demuestra un entendimiento entre ambos en cuanto a la incorporación de los comentarios de Polivka en la propuesta arquitectónica, pero no fue hasta seis años después del inicio de los trabajos de Polivka que Wright dibujó en la propuesta las nueve pantallas de soporte, que juntamente con el núcleo y los dos pilares circulares, formaban el sistema de soporte de la rampa. Wright no deseaba pilares que interrumpiesen la continuidad de la rampa y Polivka consiguió desplazar los soportes del borde interior al perímetro exterior, recuperando el planteamiento de la propuesta preliminar de planta hexagonal, donde Wright organizaba el espacio mediante “alcobas” adosadas a la fachada y liberando así el perímetro del atrio interior. Como se ha podido ver también, los muros de soporte dispuestos radialmente en la planta de 1943 [Fig 3.2.1] tenían una analogía directa con las pantallas cada 30° dibujadas a partir de 1952.

Tradicionalmente se le ha otorgado una gran importancia al funcionamiento helicoidal de la rampa o el papel de las fachadas y barandilla interior. La bibliografía al respecto relaciona el funcionamiento estructural del museo con las rampas de Lubetkin o con el caparazón del nautilo. El papel rigidizador de fachadas y barandilla, sin despreciar su efecto, ha sido enfatizado de manera desproporcionada, como también ocurrió con las barandillas en la Casa de la Cascada. Sin embargo, todos estos conceptos, a pesar de la voluntad integradora de Wright, cumplen una función estructural secundaria y no figuraban en ninguno de los planteamientos analíticos de Polivka. Este hecho, posiblemente se debe por un lado a la dificultad de su incorporación en la formulación disponible y por otro lado, como se demostrará, a su escasa función resistente dentro del conjunto de la estructura. De este modo, la estructura de la rampa se concibió en realidad tal como se construyó, como una placa circular empotrada perimetralmente, dimensionada para soportar la sobrecarga de uso y el peso de los diferentes elementos constructivos (barandillas y fachadas), sin considerar las contribuciones del resto de elementos secundarios.

Actualmente, gracias a la capacidad de cálculo de los ordenadores, el problema podría haberse abordado sin necesidad de realizar simplificaciones sustanciales o análisis paralelos, de una manera global para todo el conjunto de la estructura. El Método de Elementos Finitos discretiza el conjunto de la estructura en un número finito de elementos y, aplicando la Teoría de Reissner – Mindlin a cada porción de placa, éstos se ensamblan en un sistema matricial que puede resolverse con la ayuda de los ordenadores por diversos métodos iterativos. Como todos los

procedimientos de cálculo, requiere también de unas simplificaciones y abstracciones que permitan aplicar la teoría al respecto, pero en este caso, por lo menos la geometría de la estructura no resulta un impedimento para su aplicación.

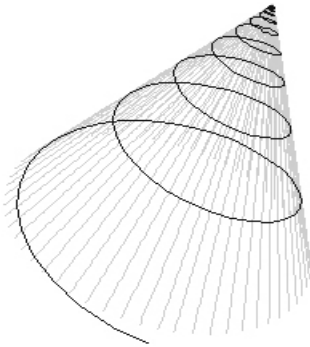
La conclusión a la que se puede llegar con un análisis por este método es que el hecho de “abrir” el disco para formar una espiral no sólo no resulta perjudicial, sino que favorece el comportamiento de la estructura. A esta conclusión Polivka llegó a través de la observación de las deformaciones de las maquetas ensayadas, concluyendo que el método analítico planteado resultaba decantarse hacia una mayor seguridad de la estructura, tal como se ha verificado [3.4.2. Modelos simplificados mediante Elementos Finitos]. La consideración de la rigidez de la barandilla del perímetro interior o la fachada, en cualquier caso hace aumentar el grado de seguridad de la estructura. Por este motivo, el planteamiento de Polivka resultó ser conservador, al considerar estos elementos únicamente como carga y no como elementos resistentes.



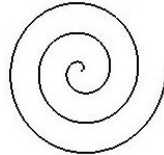
**Fig. 3.4.1** Espiral cilíndrica. Su proyección en planta es una circunferencia, al estar contenida en la superficie de un cilindro. El planteamiento de su ecuación es el siguiente:

$$\begin{aligned}x &= a \cdot \cos\theta \\y &= a \cdot \text{sen}\theta \\z &= a \cdot \theta \cdot \cot\alpha\end{aligned}$$

Donde  $a$  es un parámetro del cilindro (radio o diámetro) y  $\alpha$  el ángulo constante de corte entre la curva y las generatrices.

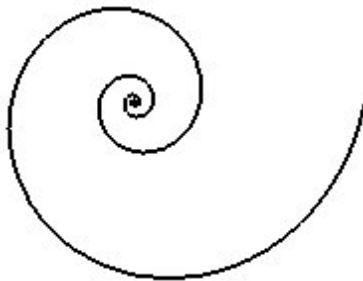


**Fig. 3.4.2** Espiral cónica. Su proyección en planta es una espiral de Arquímedes, al estar contenida en la superficie de un cono. El planteamiento de su ecuación es el siguiente:



$$\begin{aligned}x &= a \cdot e^{kt} \cdot \text{cost} \\y &= a \cdot e^{kt} \cdot \text{sent} \\z &= a \cdot e^{kt} \cdot \cot\alpha\end{aligned}$$

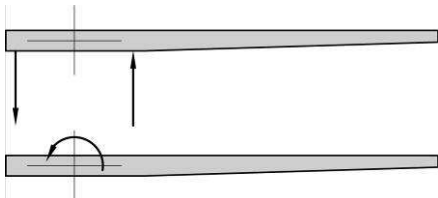
Donde  $k = \text{sen}\alpha \cdot \cot\beta$ ,  $\alpha$  es el ángulo que forman las generatrices con el eje del cono,  $\beta$  es el ángulo formado por la hélice con las generatrices y  $\alpha$  es un parámetro que controla el tamaño del cono.



**Fig. 3.4.3** En una nota del 1 de mayo de 1946<sup>161</sup>, Polivka apuntó hacia un planteamiento a partir de una espiral logarítmica, abandonando esta opción enseguida.

$$r = a \cdot e^{m\theta}$$

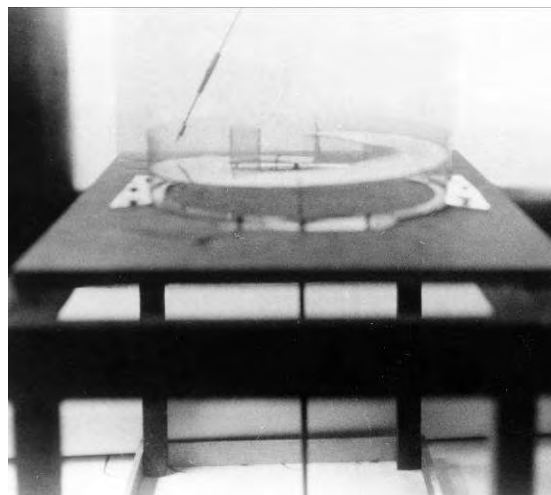
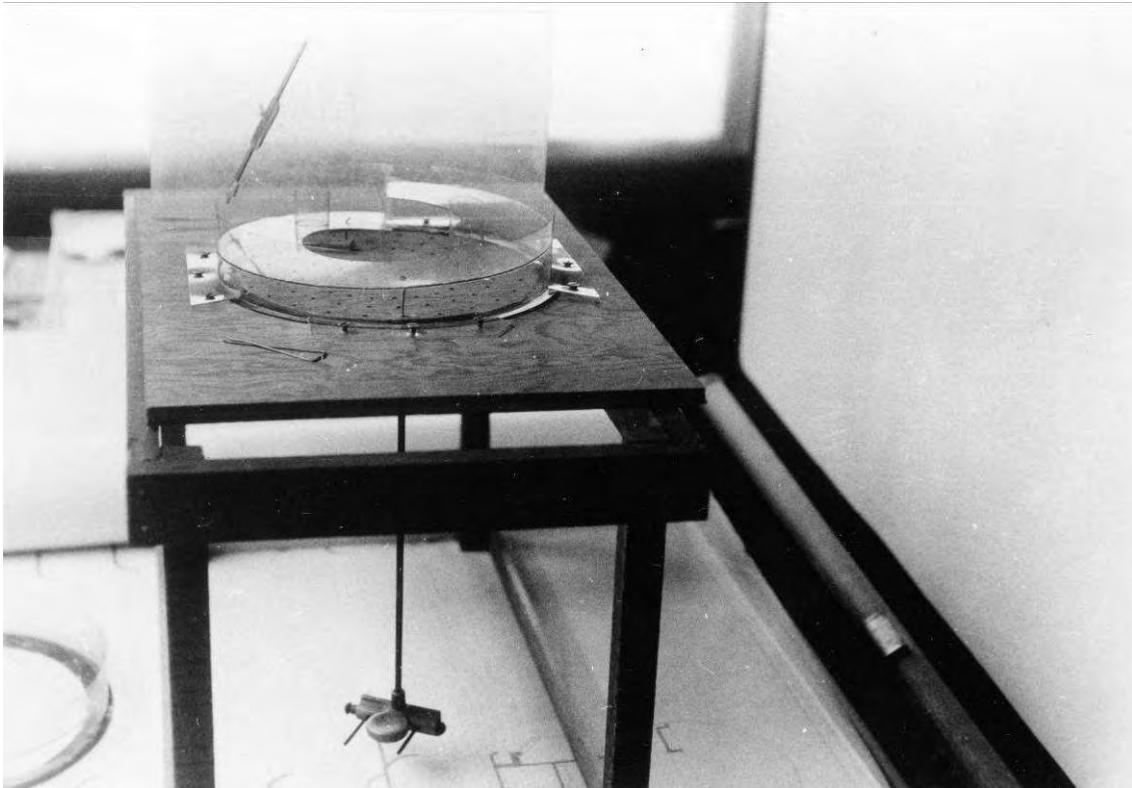
La rampa del museo además no corresponde a este tipo de espiral y, como se ha visto, Polivka eludió cualquier tipo de comportamiento tridimensional de la espiral a la hora de analizar la estructura.



**Fig. 3.4.4** Esquema del efecto de empotramiento en el borde perimetral de las plantas del museo. El par de fuerzas de reacción en los extremos de la pantalla de soporte generan un momento de empotramiento acorde con el planteamiento analítico de Polivka.

<sup>161</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_27

**Fig. 3.4.5-6-7** Imágenes de una de las maquetas realizadas por Polivka como verificación del método de cálculo aplicado. Es significativo ver que se trata de una sola vuelta de la espiral (placa circular abierta), apoyada en el perímetro exterior y con un peso situado en el centro de la circunferencia. Este esquema se corresponde con la formulación de Timoshenko expuesta en el texto *Plates and Shells* y adoptada por Polivka para abordar el problema.



Con la intención de poner de manifiesto la complejidad del planteamiento de los modelos matemáticos, en las diferentes situaciones simplificadas que se aproximan al comportamiento de la estructura del museo, se expone a continuación la formulación desarrollada por Timoshenko entre 1930 y 1940. Esta base teórica sirvió como herramienta a Polivka para el análisis de las rampas y se expone en una de las carpetas de los documentos revisados<sup>162</sup>, donde se puede identificar el planteamiento de estas ecuaciones así como su desarrollo a la hora de deducir las constantes de integración. A lo largo de más de cien páginas de desarrollo matemático Polivka sólo exploró este método analítico, dejando de lado cualquier planteamiento tridimensional más complejo que tuviese en consideración fachadas o barandillas.

### 3.4.1. Planteamiento de las condiciones generales de equilibrio de una placa circular<sup>163</sup>.

#### Placa circular genérica

$$\frac{d^3 w(r)}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2 w(r)}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dw(r)}{dr} = \frac{V(r)}{D} \quad [1]$$

Que también puede expresarse de la siguiente manera, más fácil de resolver:

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{V(r)}{D} \quad [2]$$

Donde:

w(r): es la deformación vertical (eje z) de un punto r del plano respecto a la posición inicial.

r: distancia desde el centro a cualquier punto.

V(r): esfuerzo cortante de un punto r.

D: rigidez de la placa, igual que en el caso de placas rectangulares

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

E: módulo de elasticidad del material

h: espesor de la placa

$\mu$  coeficiente de Poisson

El cortante V(r) depende de las cargas que actúan, siendo P una carga puntual aplicada en el centro y q una carga uniformemente repartida:

$$V(r) = \frac{qr}{2} + \frac{P}{2\pi r} \quad [3]$$

<sup>162</sup> Polivka Papers, Folder 1.02, páginas 4 a 67 y Folder 1.03, páginas 26 a 67

<sup>163</sup> TIMOSHENKO, S. – WOINOWSKI - KRIEGER, S. *Teoría de placas y láminas*. Espasa-Calpe, Madrid 1957, Pág. 54

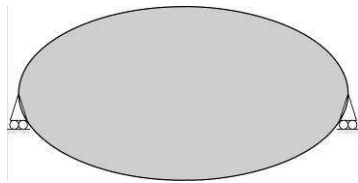
Por lo tanto, la integración de [1] o [2] da la solución general a la deformación del problema:

$$w(r) = \frac{qr^4}{64D} + \frac{Pr^2}{8\pi D}(\ln r - 1) - \frac{C_1 r^2}{4} - C_2 \ln r + C_3 \quad [4]$$

Donde:

$C_1, C_2$  y  $C_3$  son las constantes de integración deducibles a partir de la aplicación de las condiciones de contorno para los casos apoyado o empotrado. Estas constantes, agrupándolas en la solución general [4], dan lugar a la solución particular de las dos situaciones:

- *Borde simplemente apoyado:*

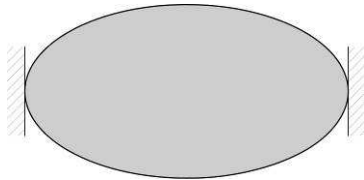


$$\text{Deformación: } w(r) = \frac{q(a^2 - r^2)}{64D} \left( \frac{5 + \mu}{1 + \mu} a^2 - r^2 \right) \quad [5]$$

$$\text{Momento radial: } M_r = \frac{q}{16} (3 + \mu)(a^2 - r^2) \quad [6]$$

$$\text{Momento tangencial: } M_t = \frac{q}{16} [a^2(3 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)] \quad [7]$$

- *Borde empotrado:*



$$\text{Deformación: } w(r) = \frac{q}{64D} (r^2 - a^2)^2 \quad [8]$$

$$\text{Momento radial: } M_r = \frac{q}{16} [a^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)] \quad [9]$$

$$\text{Momento tangencial: } M_t = \frac{q}{16} [a^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)] \quad [10]$$

### Placa circular anular<sup>164</sup>.

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{V(r)}{D} \quad [11]$$

Parte de la misma ecuación que en el caso de una placa circular sin agujero [2]

Donde:

w(r): es la deformación vertical (eje z) de un punto r del plano respecto a la posición inicial.

r: distancia desde el centro a cualquier punto.

V(r): esfuerzo cortante de un punto r dentro de la placa.

D: rigidez de la placa, igual que en el caso de placas rectangulares

E: módulo de elasticidad del material

h: espesor de la placa

m coeficiente de Poisson

El cortante V(r) depende de las cargas que actúan, siendo P una carga puntual aplicada en el centro y q una carga uniformemente repartida:

$$V(r) = V_0 \frac{b}{r}; \quad V(r) = \frac{P}{2\pi b} \quad [12]$$

Hay que señalar que, a diferencia de la placa circular, en este caso no se contempla la contribución al cortante de una carga uniformemente repartida.

Por lo tanto, la integración de [11] da la solución general a la deformación del problema:

$$w(r) = \frac{Pr^2}{8\pi D} \left( \ln \frac{r}{a} - 1 \right) - \frac{C_1 r^2}{4} - C_2 \ln r + C_3 \quad [13]$$

Que Polivka la expresa de la siguiente manera:

$$w(r) = z(r) = C_0 + C_1 \ln r + C_2 r^2 + C_3 r^2 \ln r \quad [14]$$

Donde:

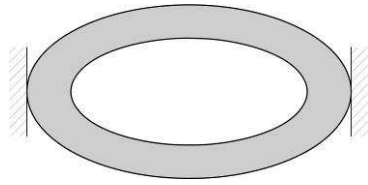
C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> y C<sub>3</sub> son las constantes de integración deducibles a partir de la aplicación de las condiciones de contorno para los casos apoyado o empotrado. Estas constantes, agrupándolas en la solución general [13], dan lugar a las soluciones particulares:

---

<sup>164</sup> TIMOSHENKO, S. – WOJNOWSKI · KRIEGER, S. *Theory of Plates and Shells*. Ed. McGraw-Hill Book Company. Pág. 58



- *Deformación del caso con borde empotrado:*



$$w(r=b) = \frac{Pa^3}{2\pi bD} \left\{ \frac{\frac{1+\mu}{2} \frac{b}{a} \ln \frac{a}{b} + \frac{1+\mu}{4} \left( \frac{a-b}{b} - \frac{b}{a} \right) \frac{b}{4a} \left[ \left( \frac{b}{a} \right)^2 - 1 + 2 \ln \frac{a}{b} \right]}{\frac{1}{2} \left[ (1+\mu) \frac{b}{a} + (1-\mu) \frac{a}{b} \right]} - \frac{b}{4a} \left[ \left( \frac{b}{a} \right)^2 - 1 + 2 \ln \frac{a}{b} \right] \right\}$$

[15]

Como se pone de manifiesto, el problema planteado para una carga puntual resulta engorroso de operar. Timoshenko no desarrolla el caso de una carga uniformemente repartida, para lo cual remite a una tabla donde se dan coeficientes para el cálculo de diez situaciones diferentes de carga y apoyos<sup>165</sup>. Esta tabla resume diez posibles situaciones habituales (más habituales en piezas de mecánica que en estructuras, por lo que los coeficientes se han calculado para una  $\mu=0,3$ , correspondiente con la del acero). Una vez obtenidas  $k$  y  $k_1$ , se substituyen los valores en las siguientes expresiones:

$$\sigma_{\max} = k \frac{qa^2}{h^2}; [16]$$

$$\sigma_{\max} = k \frac{P}{h^2}; [17]$$

$$w_{\max} = k_1 \frac{qa^4}{Eh^3}; [18]$$

$$w_{\max} = k_1 \frac{Pa^2}{Eh^3} [19]$$

Donde:

$\sigma_{\max}$ : es la tensión normal máxima de la lámina tanto para una carga repartida  $q$  como para una carga puntual  $P$  aplicada en el extremo.

$w_{\max}$ : es la deformación máxima de la lámina, igualmente para los casos de una carga repartida como puntual.

a: es el radio exterior

b: es el radio interior

h: es el espesor de la placa

E: es el módulo de elasticidad del material.

Mediante el método de superposición, Polivka pudo haber aplicado los coeficientes, corregidos para la  $\mu=0,2$  del hormigón, de los casos 9 y 10 que correspondían con la situación de una de las plantas tipo.

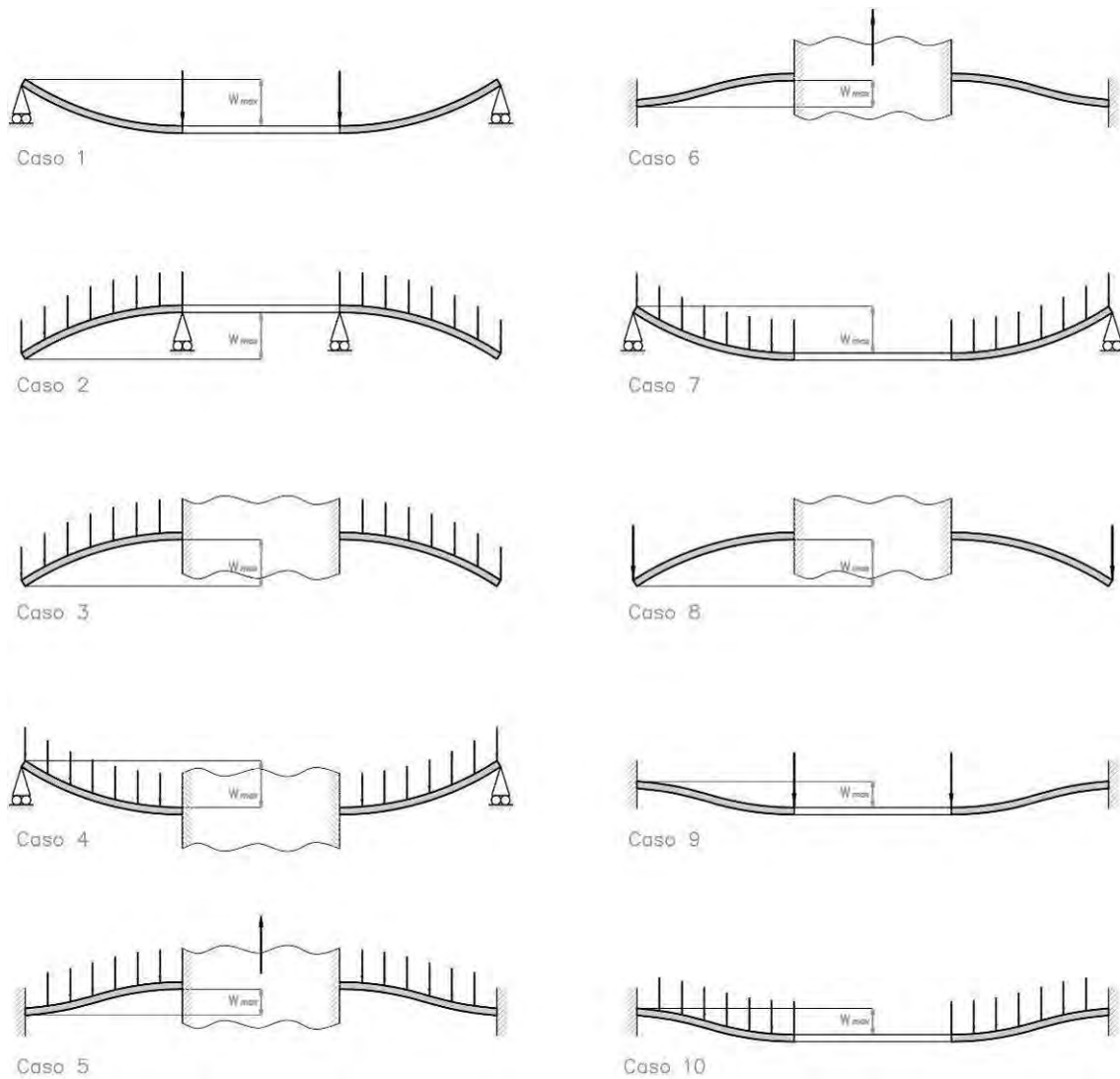
Es significativo que los casos 3 y 8, recuerdan a la torre de investigaciones del edificio Johnson, que Polivka desarrollaba en paralelo con el proyecto del museo.

<sup>165</sup> En este punto del texto Timoshenko hace referencia a: BEYER K. *Die Statik inu Stainbetonbau*, 2ªEd. Berlin 1948

**Coefficientes  $k$  y  $k_I$  en las ecuaciones [16,17,18 y 19] para los diez casos indicados de la figura<sup>166</sup>**

a/b=	1,25		1,5		2		3		4		5	
Caso	$k$	$k_I$	$k$	$k_I$	$k$	$k_I$	$k$	$k_I$	$k$	$k_I$	$k$	$k_I$
1	1,100	0,34100	1,260	0,51900	1,480	0,67200	1,880	0,734	2,170	0,724	2,340	0,704
2	0,660	0,20200	1,190	0,49100	2,040	0,90200	3,340	1,220	4,300	1,300	5,100	1,310
3	0,135	0,00231	0,410	0,01830	1,040	0,09380	2,150	0,293	2,990	0,448	3,690	0,564
4	0,122	0,00343	0,336	0,03130	0,740	0,12500	1,210	0,291	1,450	0,417	1,590	0,492
5	0,090	0,00077	0,273	0,00620	0,710	0,03290	1,540	0,110	2,230	0,179	2,800	0,234
6	0,115	0,00129	0,220	0,00640	0,405	0,02370	0,703	0,062	0,933	0,092	1,130	0,114
7	0,592	0,18400	0,976	0,41400	1,440	0,66400	1,880	0,824	2,080	0,830	2,190	0,813
8	0,227	0,00510	0,428	0,02490	0,753	0,08770	1,205	0,209	1,514	0,293	1,745	0,350
9	0,194	0,00504	0,320	0,24200	0,454	0,08100	0,673	0,172	1,021	0,217	1,305	0,238
10	0,105	0,00199	0,259	0,01390	0,480	0,05750	0,657	0,130	0,710	0,162	0,730	0,175

<sup>166</sup> TIMOSHENKO, Stephen P. – WOINOWSKY-KRIEGER, S. *Teoría de placas y láminas*. Espasa-Calpe, Madrid 1957. *Tabla 3, pág. 82*



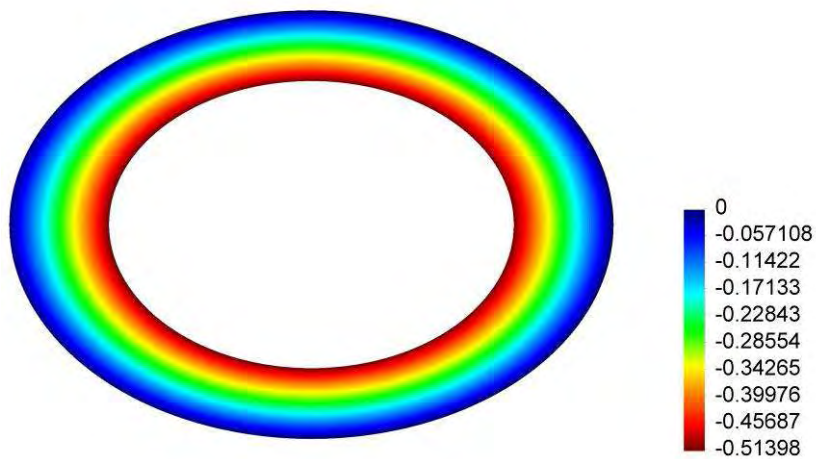
**Fig. 3.4.8** Esquemas para la localización de los diferentes casos de flexión de una placa anular, donde a partir de la localización del caso, se aplicarán los coeficientes de la tabla anterior<sup>167</sup>.

<sup>167</sup> TIMOSHENKO, Stephen P. – WOINOWSKY-KRIEGER, S. *Teoría de placas y láminas*. Espasa-Calpe, Madrid 1957. *Figura 36, pág. 81*

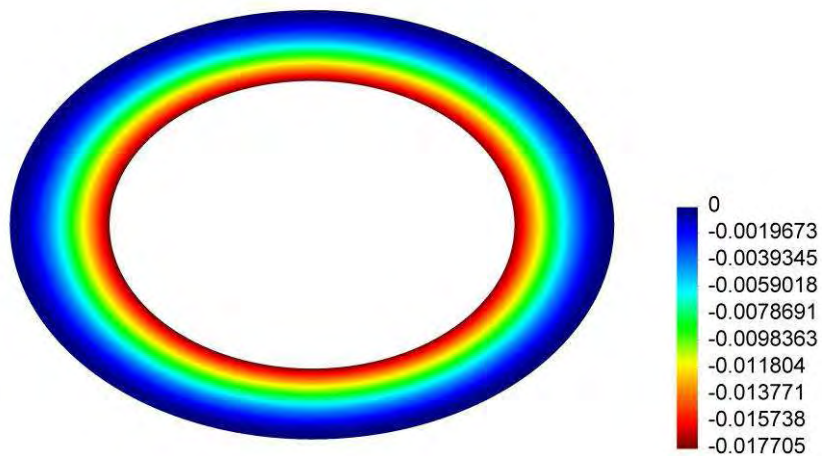
### 3.4.2. Modelos simplificados mediante Elementos Finitos

El planteamiento analítico anterior del disco plano, puede trasladarse a unos modelos mediante Elementos Finitos, exponiéndose también de la siguiente manera<sup>168</sup>:

#### Disco contenido en el plano



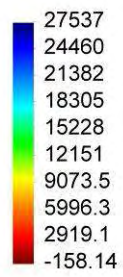
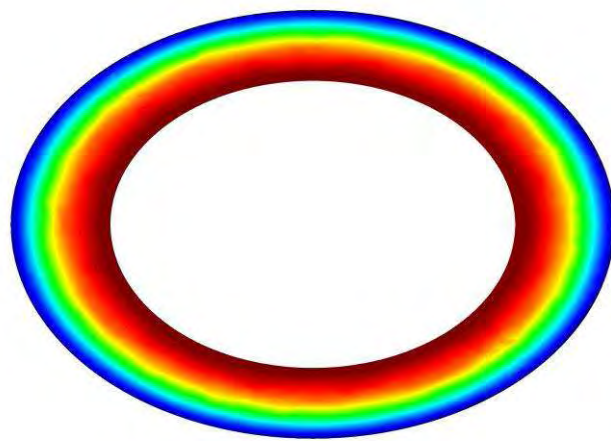
A



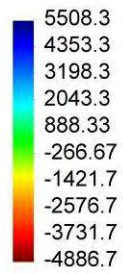
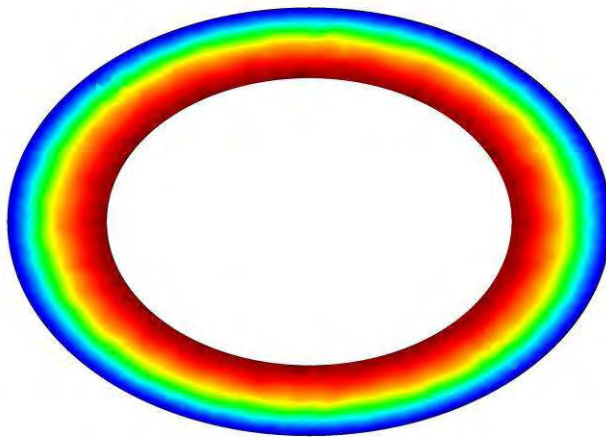
B

---

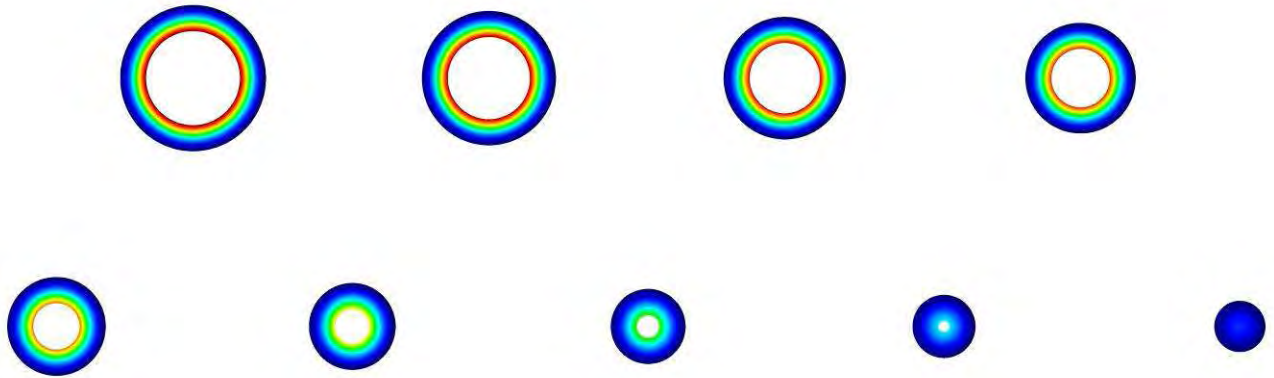
<sup>168</sup> Para los modelos se ha considerado una losa de hormigón de 15cm de espesor, con un diámetro exterior de 26,6m y uno interior de 17,8m, bajo la carga de su peso propio.



C



D

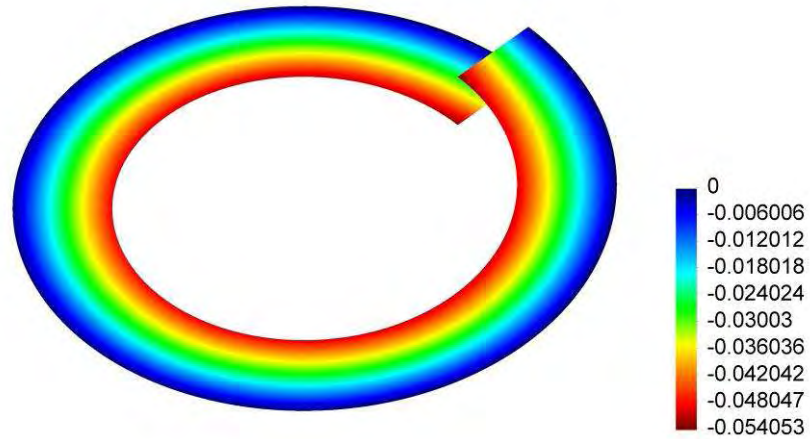


E

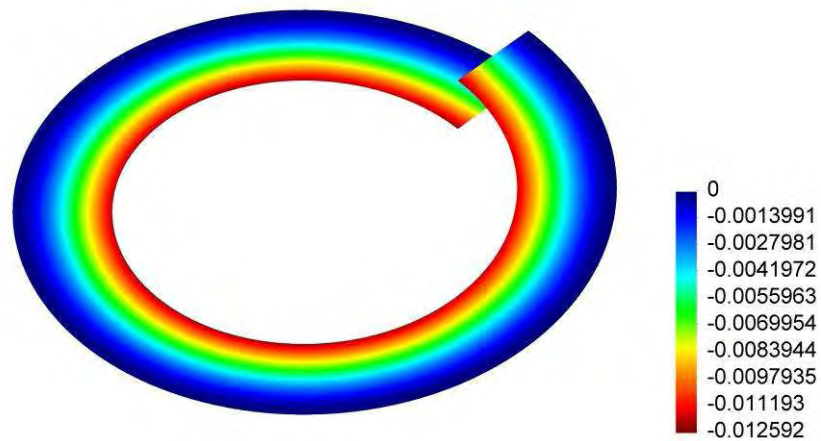
- A. *Deformaciones con el borde simplemente apoyado (m)*: Para este diámetro puede observarse que las deformaciones hacen inviable esta opción. Cuanto más grande es el diámetro, menor el es efecto favorable de la circunferencia.
- B. *Deformaciones con el borde empotrado (m)*: Respecto a la opción anterior, la diferencia es sustancial. Cuanto mayor es el diámetro, más diferencia habrá entre la opción empotrada y apoyada. Para diámetros muy pequeños, las deformaciones de ambos casos se aproximan.
- C. *Momentos radiales* (momento máximo en las direcciones principales; N.m/m) con el borde empotrado. De la misma manera que las deformaciones, el momento en la dirección radial, para diámetros grandes se aproxima al momento de un voladizo empotrado en el extremo  $M=qL^2/2$ . Según decrece el diámetro, el momento resulta cada vez más pequeño respecto al del voladizo  $M=qL^2/2$ .
- D. *Momentos tangenciales* (momento mínimo en las direcciones principales; N.m/m) con el borde empotrado. Al contrario que el momento radial, el valor más alto del momento tangencial se produce en el borde interior. También, con diámetros mayores, este valor crece proporcionalmente al aumento del diámetro.
- E. *Deformaciones de una serie con el borde empotrado*. Si probamos a variar el diámetro exterior e interior proporcionalmente, manteniendo los 4,4m de ancho de lámina, se puede observar que cuanto menor es la dimensión del disco, mejor comportamiento tiene. Esto se traduce en que, cuanto mayor sea la dimensión, más se aproximará su comportamiento al de un voladizo de 4,4m empotrado en el extremo. Este sería el caso correspondiente a un diámetro infinito.

### Disco abierto

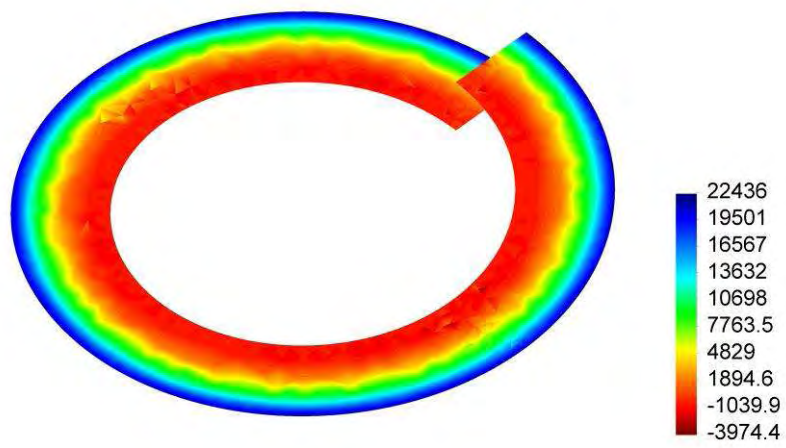
Polivka recurrió al ensayo de unas maquetas, para verificar la idoneidad del planteamiento analítico de un disco plano trasladado a la situación real del disco abierto (un tramo de la espiral).



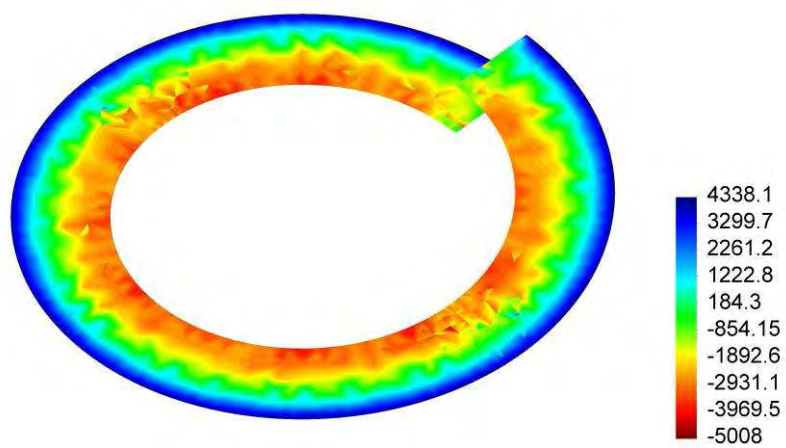
A



B



C



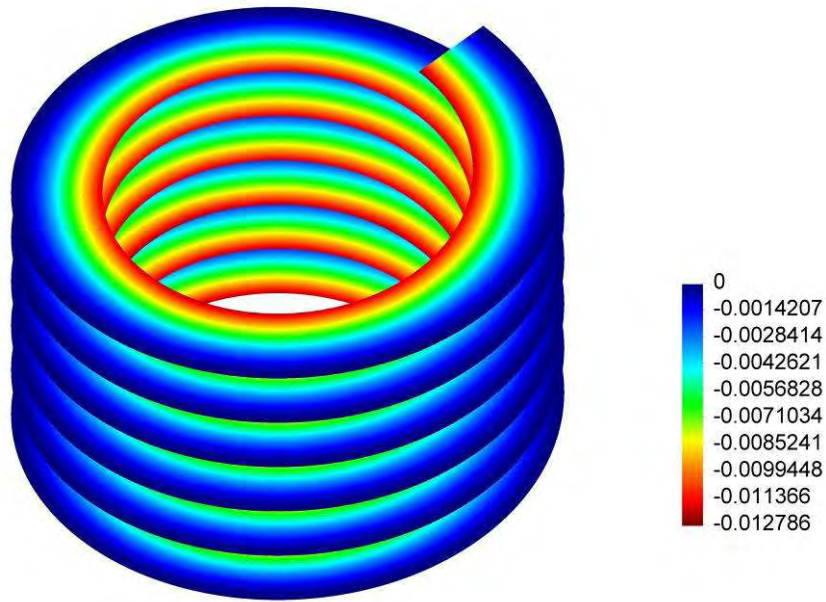
D



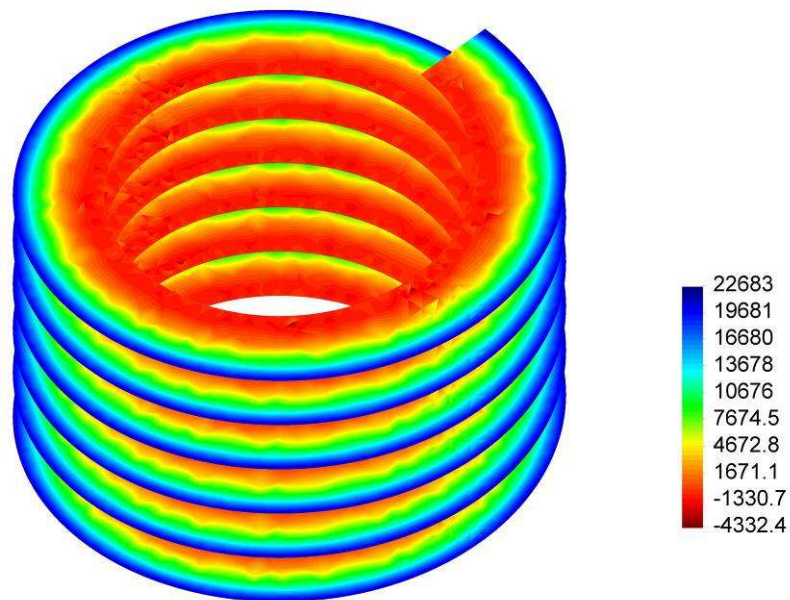
- A. *Deformaciones del disco con el borde simplemente apoyado (m)*. Aunque siguen siendo deformaciones inadmisibles, es significativa la diferencia que hay respecto al disco plano. La deformación es del orden de 10 veces inferior, debido al efecto tridimensional de “tijera”. Este efecto, como se ha dicho, se diluye para diámetros grandes, pero como se puede apreciar en este caso, su contribución es considerable aún con un diámetro de 26,6m
- B. *Deformaciones del disco con el borde empotrado (m)*. La relación respecto al disco plano no es tan acusada como en la opción simplemente apoyada. No obstante, se aprecia un cierto efecto favorable del orden de 1,4 veces menor deformación para el disco abierto.
- C. *Momentos radiales* (momento máximo en las direcciones principales; N.m/m) con el borde empotrado. El efecto favorable tridimensional se aprecia también en los momentos radiales, donde disminuye el momento de empotramiento en el borde exterior, pero sin embargo aumenta el momento positivo del límite interior (efecto de apoyo en el anillo interior).
- D. *Momentos tangenciales* (momento mínimo en las direcciones principales; N.m/m) con el borde empotrado. El efecto tridimensional en “tijera” hace disminuir de nuevo los valores de los momentos en la dirección tangencial donde la tendencia es igualarse el valor máximo negativo con el positivo.

Espiral cilíndrica-cilíndrica:

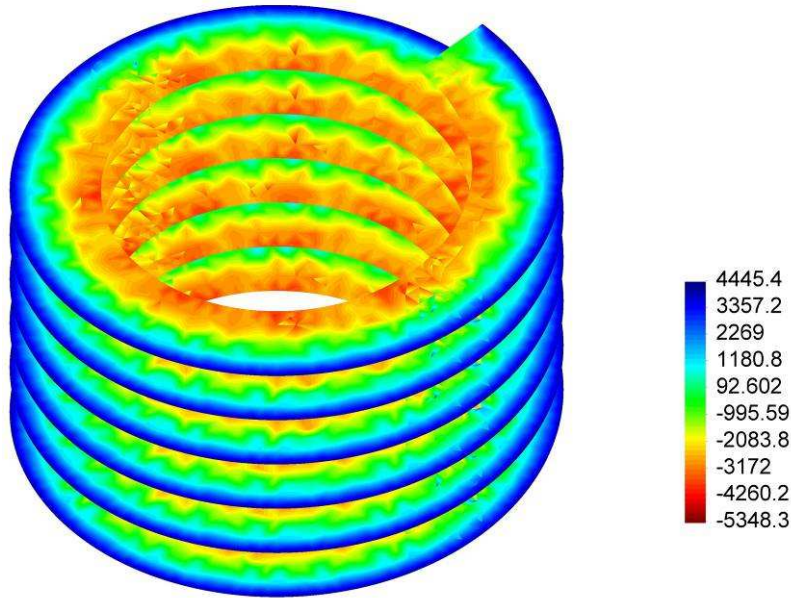
El problema anterior del disco abierto, puede aproximarse más a la realidad del Guggenheim extendiendo la rampa y formando una espiral de varias plantas, cuyos contornos (interior y exterior) se han considerado como espirales cilíndricas, para evaluar si existe algún tipo de efecto favorable o no debido a la superposición. En este caso, respecto a las condiciones de contorno, el perímetro exterior se ha considerado siempre empotrado en toda su longitud.



A



B

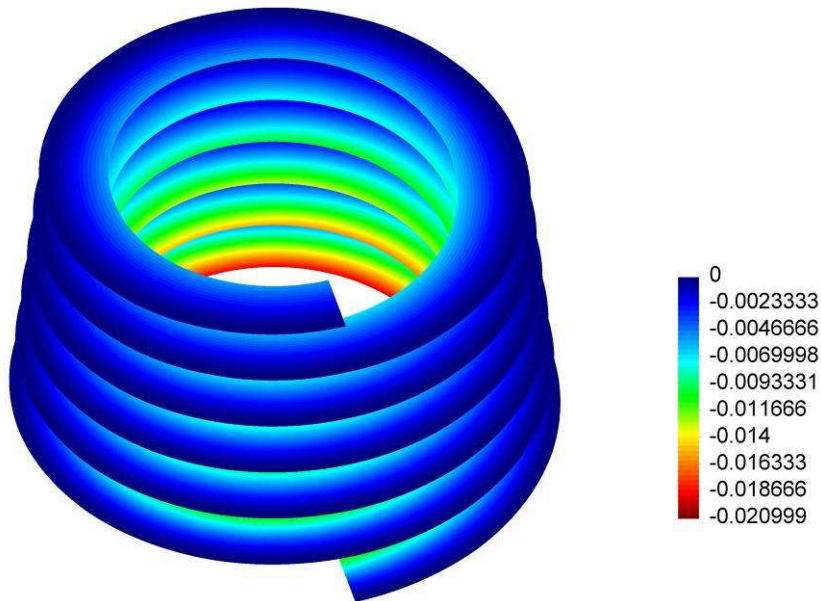


C

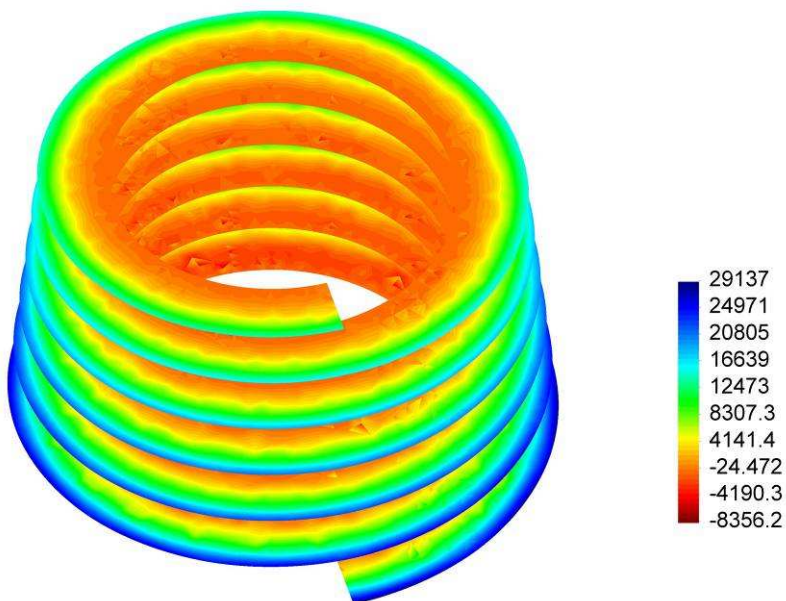
- A. *Deformaciones de la rampa (m)*. El efecto de superposición de varias plantas no favorece ni penaliza las deformaciones máximas del borde interior, que siguen siendo prácticamente iguales que en el análisis de una sola vuelta de la espiral. Esto permite que las plantas puedan ser analizadas de forma independiente.
- B. *Momentos radiales (N.m/m)*. En cuanto a los momentos el resultado es análogo; no hay ninguna diferencia sustancial respecto al modelo del disco abierto. De esto se puede deducir que el número de plantas es irrelevante y por este motivo Polivka abandono rápidamente la línea de análisis a través del planteamiento como resorte.
- C. *Momentos tangenciales (N.m/m)*. Sucede lo mismo que en el caso de momentos radiales.

### Espiral cónica-cilíndrica:

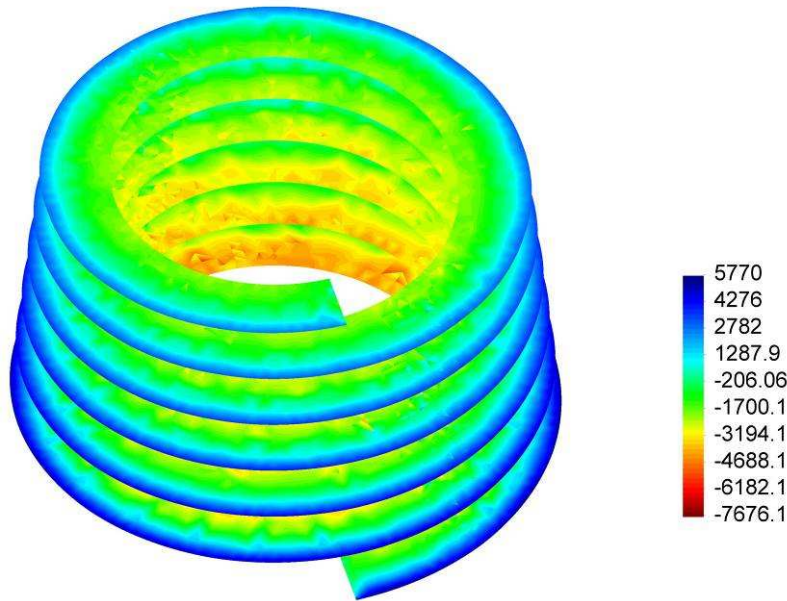
Sin embargo, desde un inicio, las propuestas para la rampa se han configurado a partir de diversas variantes, combinando una espiral cónica en el exterior con espirales cilíndricas o cónicas en el interior. En este caso, en correspondencia con la versión de la Modern Gallery de 1948, la espiral del borde interior es cilíndrica, lo que provoca que el ancho de la rampa sea variable (mayor anchura en las plantas inferiores, que se va reduciendo según se asciende).



A



B



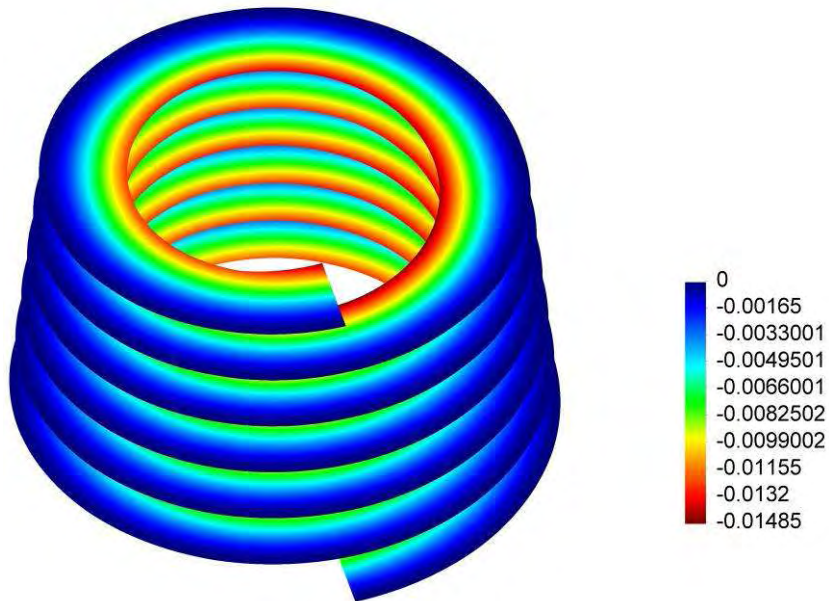
C

- A. *Deformaciones de la rampa (m)*. La variación del ancho de la rampa junto con la reducción del diámetro total en las plantas superiores hace que el comportamiento de la lámina en las partes altas del edificio sea mucho más favorable. Las deformaciones en el borde interior oscilan desde los 19mm en el nivel inferior a los 6mm de la última planta.
- B. *Momentos radiales (N.m/m)*. Los esfuerzos de la lámina siguen el mismo criterio que las deformaciones: a menor vuelo de la losa respecto al perímetro, menor es el momento. La reducción de diámetro también contribuye a esta disminución de los valores de momentos radiales y tangenciales.
- C. *Momentos tangenciales (N.m/m)*. Sucede lo mismo que en el caso de momentos radiales.

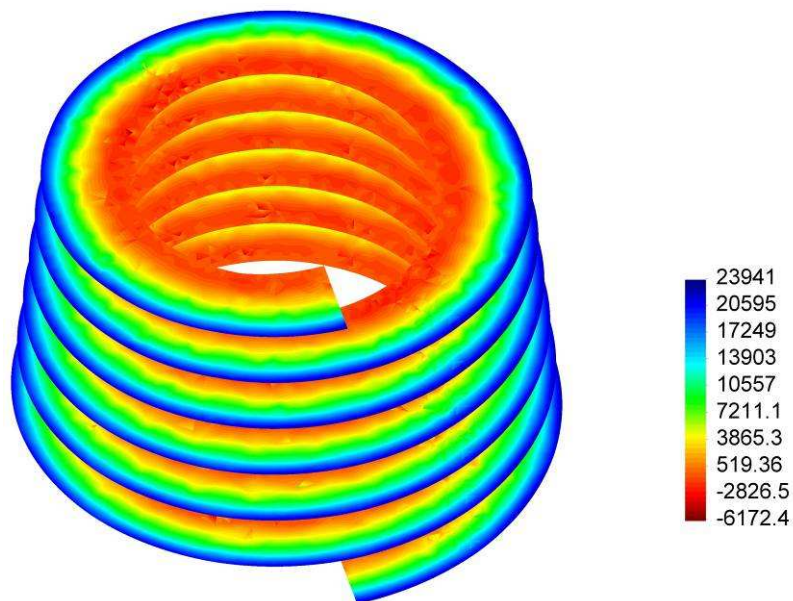
En las imágenes, el aspecto de la rampa es de una espiral que se cierra en las plantas superiores, al contrario que la visión “tarugiz”. Esto es debido a que se ha considerado como envolvente exterior de la espiral la línea del borde interior de las pantallas radiales. Dado que estos soportes tienen una forma trapezoidal en su alzado, con mayor dimensión en la parte superior, la envolvente de los puntos interiores o línea ficticia de empotramiento, forma una espiral que se cierra en sentido ascendente. Sucede lo mismo en el modelo de la espiral cónica-cónica.

Espiral cónica-cónica:

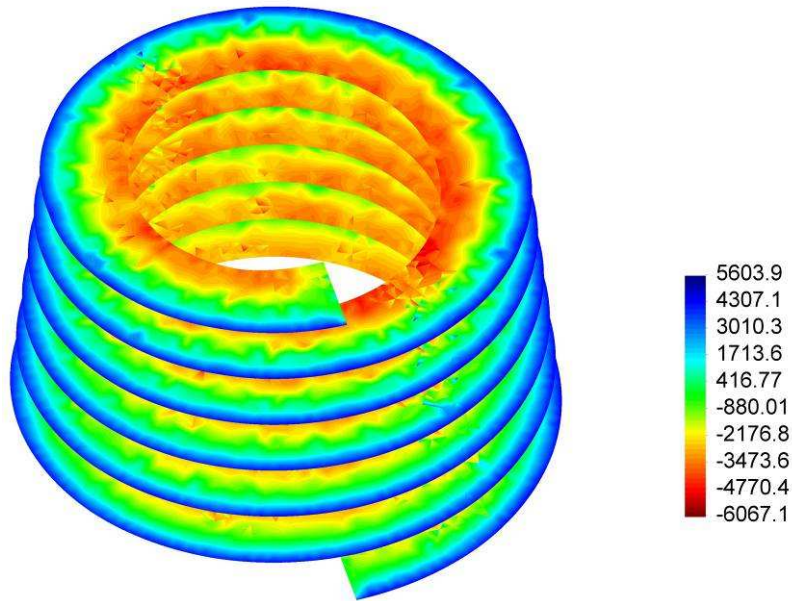
La propuesta definitiva corresponde a un trazado de la rampa entre dos espirales cónicas paralelas, por lo que el ancho de la rampa es constante mientras que lo que varía son los diámetros exterior e interior.



A



B



C

- A. *Deformaciones de la rampa (m)*. En este caso sí que se aprecia que, aunque el vuelo en cada planta es igual, las deformaciones son menores en los niveles superiores donde el diámetro total es menor. En la primera planta la flecha instantánea del borde interior es de 14mm mientras que en la planta superior resulta ser de 12mm. Es una diferencia pequeña, pero que tiene su explicación en la serie de discos planos con variación de diámetros.
- B. *Momentos radiales (N.m/m)*. La diferencia de momentos entre unas plantas y otras también sigue el mismo criterio de variación, resultando más favorables las plantas superiores de menor diámetro total.
- C. *Momentos tangenciales (N.m/m)*. Sucede lo mismo que en el caso de momentos radiales.

De estas series de modelos simplificados pueden obtenerse unas primeras conclusiones, tanto respecto al funcionamiento global de la estructura como en cuanto al método de análisis utilizado por Polivka:

Las plantas pueden analizarse de manera independiente ya que no hay efecto favorable o penalizador por el hecho de superponer varias plantas. Para el análisis es independiente el número de niveles de la espiral. Las variables que determinan el problema son el diámetro interior y exterior así como el espesor de la placa.

El hecho de que el anillo sea abierto (tridimensional) en lugar de plano resulta ser un efecto favorable respecto al disco plano, por lo que la aplicación de la formulación de la teoría de láminas añade un grado de seguridad adicional a la estructura.

Respecto a la referencia de una losa en voladizo sin curvatura en planta, donde el momento es  $M=qL^2/2$ , el momento de empotramiento en el borde exterior disminuye proporcionalmente a la reducción del diámetro total.

Por estos motivos, los análisis mediante elementos finitos del siguiente punto se han realizado de manera particular para cada versión de la estructura, pero considerando siempre una sola planta, del mismo modo que lo realizó Polivka.





### 3.5 Análisis de la estructura mediante el Método de los Elementos Finitos

La transformación de las diferentes propuestas del museo desde el inicio hasta su construcción ha estado íntimamente ligada con el desarrollo de su estructura. Los principales elementos arquitectónicos se fueron definiendo en el conjunto de forma paralela al desarrollo del sistema estructural. Ya en los esquemas preliminares se apreciaba una fuerte componente formal de la estructura que, en lugar de condicionar el resultado final, sirvió para potenciar los aspectos arquitectónicos esenciales sugeridos por Wright desde el inicio.

Con la intención de contrastar las cuestiones resistentes de esta evolución con su papel arquitectónico, se han realizado varios modelos mediante el Método de Elementos Finitos, de las versiones más significativas del proceso. Dado que el interés se concentra en la rampa helicoidal y, visto el planteamiento de Polivka al respecto del modelo estructural, se ha considerado oportuno realizar el análisis de una planta tipo de la zona de exposición, en lugar de modelizar toda la estructura. Como se ha dicho anteriormente, la intención del trabajo no es la de valorar cuantitativamente los detalles del total de la estructura, sino poner de manifiesto el avance de los aspectos cualitativos fundamentales de la estructura que han dado lugar al edificio finalmente construido.

De esta manera, las etapas que se ha considerado oportuno exponer corresponden a las siguientes versiones intermedias:

- Esquema preliminar de diciembre de 1943 de plantas hexagonales independientes.
- Propuesta de enero 1946, previa a la entrada de Polivka en el proyecto.
- Propuesta de 1952, donde aparecen por primera vez los apoyos en las nueve pantallas perimetrales.

Para la realización de estos modelos se ha tomado la geometría de los esquemas de la estructura expuestos en el apartado 3.2, basados a su vez en la documentación gráfica disponible en múltiples publicaciones sobre Wright y el Guggenheim. Las simplificaciones realizadas son las habituales en la utilización de este método de análisis, siendo la asimilación de las losas y muros de hormigón a una lámina coincidente con su fibra neutra, de características mecánicas equivalentes. Las condiciones de contorno, en el caso de los soportes, se han considerado como articulaciones a media altura de los soportes, lo que permite obtener información suficiente en el entorno de los enlaces entre la rampa y los soportes. En los extremos de la rampa, como caso particular, se ha coartado el giro para simular el efecto de continuidad con los tramos de rampa colindantes (plantas superior e inferior). En concepto, los modelos de cada una de las versiones reproducen en cierto modo el ensayo realizado por Polivka mediante maquetas para evaluar la idoneidad del método de cálculo.

En los casos de 1946 y 1952, el espesor de hormigón de la lámina que forma la rampa es de seis pulgadas [15,24cm], tal como se especifica en la correspondencia del 5 de junio de 1946. Del modelo preliminar de 1943 no hay datos concretos

respecto al espesor de la losa, por lo que se ha adoptado un grueso de 35cm, acorde con las luces entre apoyos y voladizos.

La sobrecarga de uso considerada por Polivka es de 100PSI [488,24Kg/m<sup>2</sup>]. No existen datos sobre las concargas derivadas de los acabados, por lo que se ha aplicado un valor de 120Kg/m<sup>2</sup>, posiblemente escasa según los criterios actuales, pero suficiente para contener un revestimiento de yeso y un pavimento continuo. En cuanto al peso de la fachada y la barandilla interior, los espesores de hormigón que figuran en los planos constructivos de 1956 han servido como referencia. La fachada, de hormigón gunitado, tiene un espesor de cinco pulgadas [12,7cm] al que debe añadirse un cerramiento ligero interior de placas de escayola, con un peso total<sup>169</sup> de 370Kg/m<sup>2</sup>. En el caso de la barandilla, el espesor del hormigón gunitado es de tres pulgadas [7,62cm], revestido de yeso, con un peso de 205Kg/m<sup>2</sup>. La repercusión de la carga de la fachada y barandilla en el caso de los modelos donde se ha considerado su rigidez como elemento estructural ha sido automática. En los modelos donde se ha prescindido de su rigidez, se ha computado la carga por metro lineal en función de su altura: 1,55m para la barandilla y 2,39m en la fachada, según los planos constructivos de 1956. No se han tenido en cuenta acciones horizontales debidas al viento.

Respecto a los materiales, los parámetros adoptados son los utilizados habitualmente en la modelización de estructuras de hormigón en régimen elástico lineal<sup>170</sup>.

Es cierto que considerar los mismos parámetros para el hormigón gunitado que el vertido resulta una cierta simplificación. No obstante, las diferencias que podrían darse en ambos casos no se consideran relevantes de cara al objetivo de este análisis, que no pretende cuantificar con precisión aspectos tensionales, sino su repercusión dentro de la arquitectura del conjunto. La asignación de otros espesores, como muros del núcleo o pantallas de soporte, se ha deducido de la documentación gráfica disponible, asumiendo un cierto margen de error respecto a la realidad. De la misma manera, las posibles variaciones de esfuerzos debidas a los valores adoptados, no se estiman tampoco relevantes de cara al estudio, ya que las grandes diferencias se encuentran en el planteamiento global de la estructura y no en el detalle de su dimensionado.

---

<sup>169</sup> Considerando una densidad del hormigón gunitado de  $\gamma = 2.500 \text{ Kg/m}^3$

<sup>170</sup> Módulo de Young  $E_{\text{cm}} = 8.500 \sqrt[3]{f_{\text{cm}}}$ ;  $E_{\text{cm}} = 23.072,55 \text{ N/mm}^2$ , según EHE para un hormigón HA-20. Coeficiente de Poisson  $\mu = 0,2$

### *Modelo diciembre de 1943*

La diferencia fundamental de esta primera aproximación respecto a las siguientes es la continuidad de la losa dentro del plano horizontal y no tanto la forma hexagonal previa a la proyección circular. En 1943 el análisis de una placa plana, a pesar de tener una forma no habitual, resultaba relativamente asequible<sup>171</sup>. La distancia entre apoyos varía de 7,55m a 10,3m debido a la disposición radial de los muros de soporte. El voladizo exterior se genera a partir de la propia forma hexagonal llegando a un máximo de 3,0m. Hacia el interior, las pantallas radiales no llegan hasta el límite del atrio permitiendo una circulación alrededor del mismo sobre un voladizo de 2,0m.

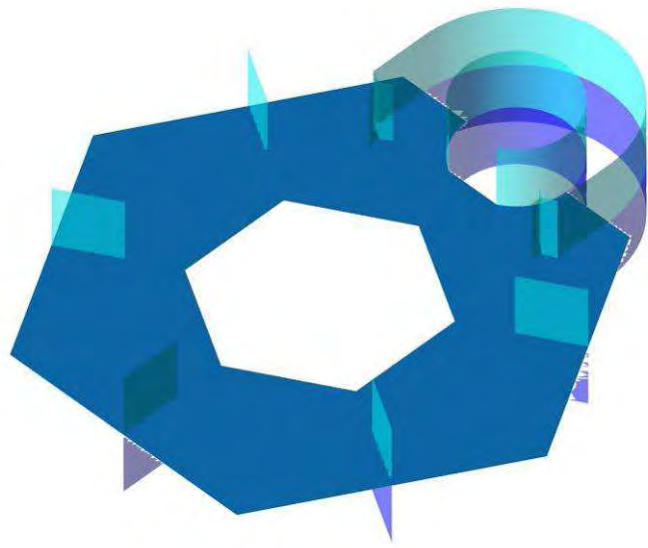
El núcleo situado en uno de los lados del hexágono no resulta indispensable para el equilibrio del conjunto, dado que en el caso de eliminarse, el sistema de pantallas sería suficiente para asumir tanto las cargas gravitatorias como los empujes de viento. Por este motivo, se pone de manifiesto que la función estructural de este elemento es más formal que resistente.

A nivel de deformaciones, a pesar de haber considerado para el análisis un presumible espesor de losa de 35cm, del que no hay constancia, se puede comprobar que el planteamiento estructural de esta opción no presenta problemas considerables de resolución. Las flechas instantáneas máximas del extremo de los voladizos exteriores (de 8,2mm) podrían llegar a controlarse a través de una contraflecha durante su ejecución o introduciendo elementos de postensado. En cuanto a los esfuerzos, los momentos máximos positivo (61.511N.m/m) y negativo (180.630 N.m/m) que el espesor de placa considerado<sup>172</sup> puede asumir perfectamente.

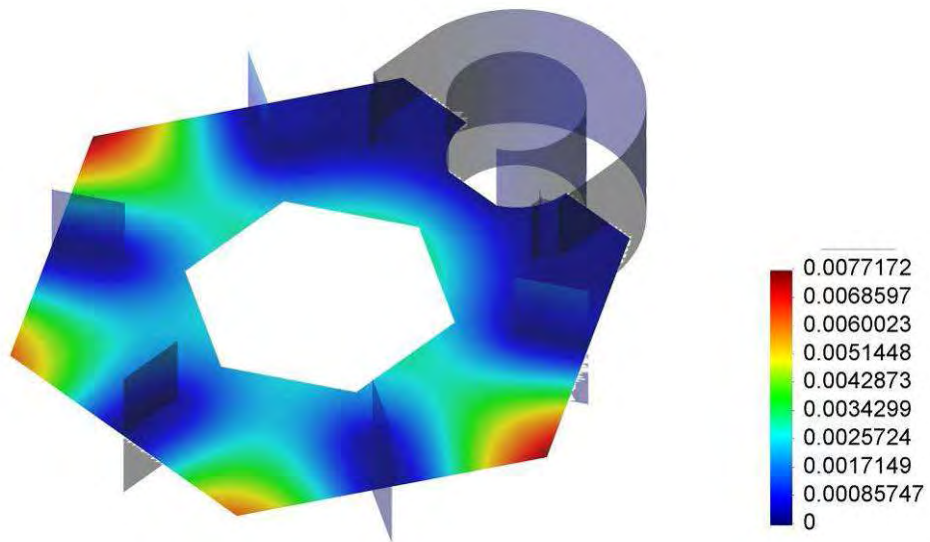
---

<sup>171</sup> Puede asimilarse a una planta trapezoidal con los dos lados no paralelos empotrados y los otros dos libres.

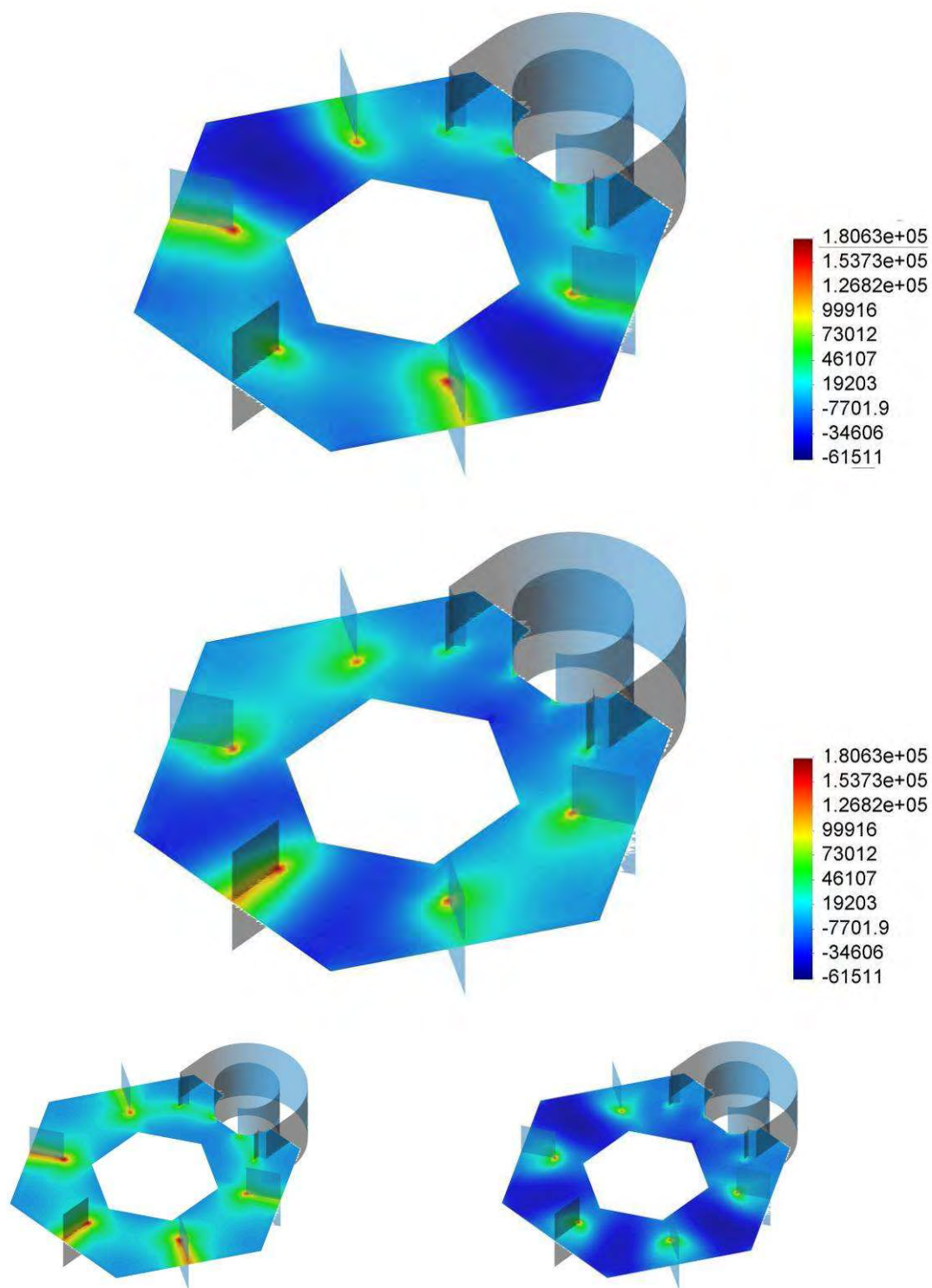
<sup>172</sup> Para el momento positivo un armado de 1Ø10c/20 + 1 Ø 10c/20 y para el momento negativo 1 Ø 10c/20 + 1 Ø 25c/20, sin considerar ningún tipo de redistribución de momentos.



**Fig. 3.5.1** Modelo de una planta tipo



**Fig. 3.5.2** Deformaciones instantáneas verticales. La zona del núcleo coarta el movimiento de un tercio de la planta. En el resto, las máximas deformaciones se concentran en los vértices del hexágono que quedan en voladizo (valores en m).



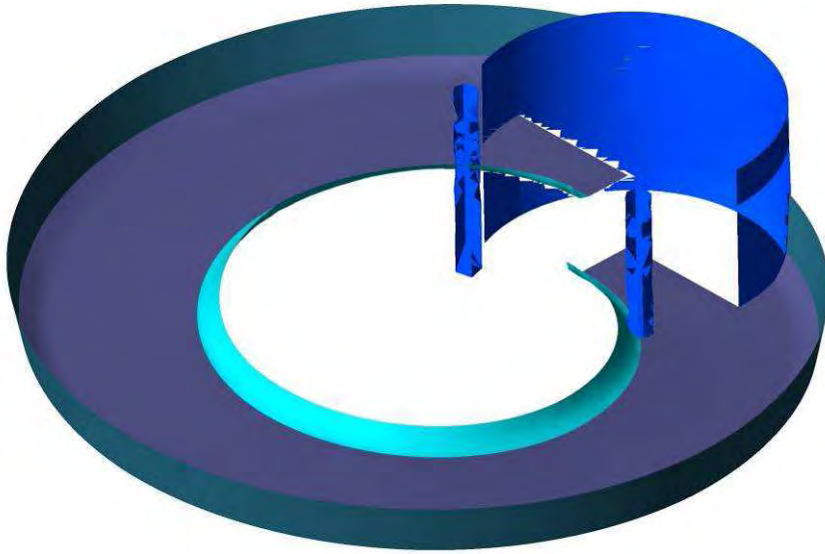
**Fig. 3.5.3-4** Momentos en los ejes x,y de la placa, coincidentes con los ejes X,Y globales (imágenes superiores). El momento positivo máximo se produce entre el apoyo de dos pantallas, cuando la distancia entre ellas es máxima. El momento negativo máximo, sobre el apoyo, se produce debido a la misma situación. En el caso del voladizo exterior, de la descomposición de los momentos x,y en la dirección perpendicular al vuelo se obtienen los momentos en las direcciones principales (imágenes inferiores). (Valores en N.m/m)

### *Modelo enero de 1946*

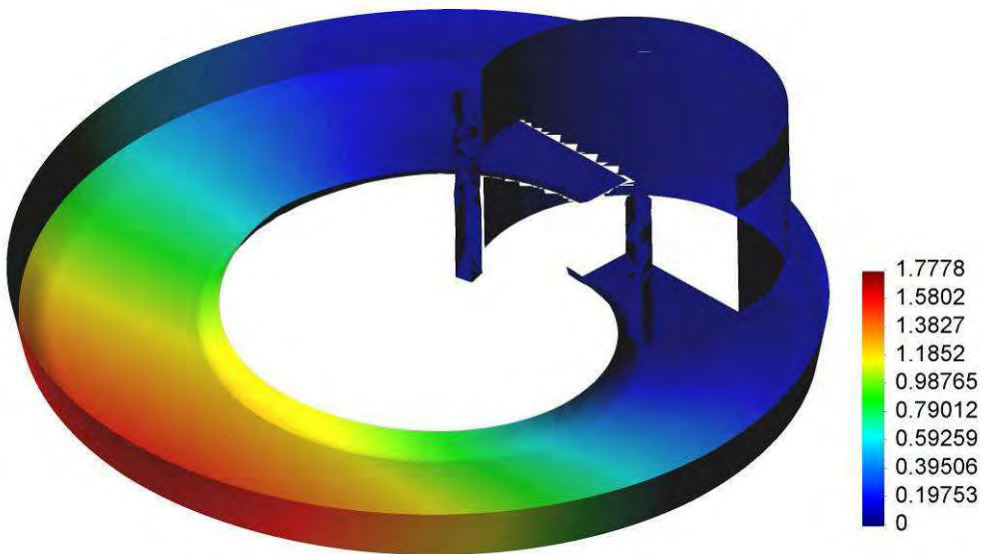
El objetivo de realizar este modelo es el de poner de manifiesto la imposibilidad del esquema estructural deducido de las propuestas de Wright posteriores a la transformación en una rampa continua en espiral. Lo más probable es que tanto Wright como sus colaboradores fuesen conscientes de la inviabilidad de esta solución. No obstante se ha considerado oportuno ponerlo de manifiesto ya que, a pesar de las grandes dimensiones de la planta, se plantea la incógnita sobre la capacidad portante del sistema de fachadas como una gran viga pared en voladizo empotrado en el núcleo y el efecto “tijera” debido al despliegue de la rampa. En este caso, la función de soporte del núcleo es fundamental, como punto de empotramiento del sistema.

La altura de unos 2,40m del muro de hormigón de la fachada, aparentemente resulta escasa para resolver un voladizo de más de 18m. Pero dentro de la lógica estructural, cabe la posibilidad de mejorar la situación considerando la diferencia de altura entre el arranque y la llegada a cada planta de la rampa, como es el caso de las rampas de la Penguin Pool o de cualquier escalera sin apoyos en el rellano.

Sin embargo, al realizar este modelo puede comprobarse que, a pesar de estos dos factores, la deformación que se obtiene es de más de 1,70m para el total de las cargas, lo que la hace impracticable desde todos los puntos de vista. El efecto de la viga pared, como se intuía, es insuficiente para la relación canto/vuelo del problema, sin considerar cuestiones básicas de equilibrio como el vuelco del núcleo debido a las grandes excentricidades, que harían también de la cimentación un problema ciertamente complejo desde el punto de vista constructivo y económico. El efecto de tirante y puntal, o efecto “tijera”, se aprecia en el esquema de distribución de líneas isostáticas [fig. 3.5.9] que contribuye, pero no suficientemente. Esto es debido a dos cuestiones básicas: la relación entre la altura de las plantas y el vuelo, y por el diámetro del hueco central. En escaleras soportadas por este sistema, para que el recurso sea efectivo el ojo de la escalera debe ser el mínimo posible, simplificándose el problema a dos bielas de tracción y compresión. A medida que el hueco va cobrando dimensión, aparecen esfuerzos de torsión en la placa, de tal modo que llegado un punto, el recurso pierde una cierta efectividad real. La concentración de isostáticas de tracción (en rojo) y de compresión (en azul) [Fig. 3.5.9] exponen este comportamiento, pero, como se ha dicho, resulta insuficiente para controlar la deformación total.

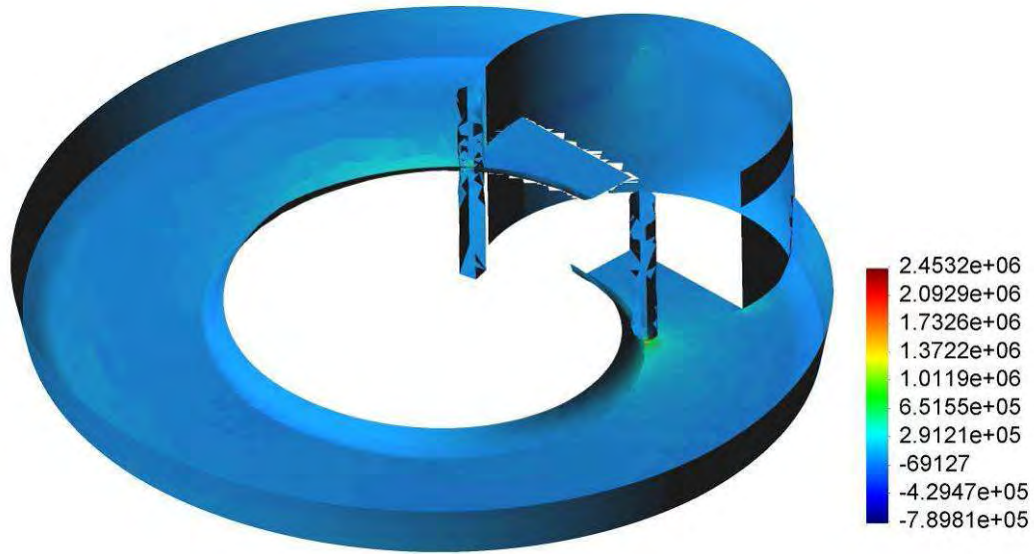


**Fig. 3.5.5** Modelo de una planta tipo

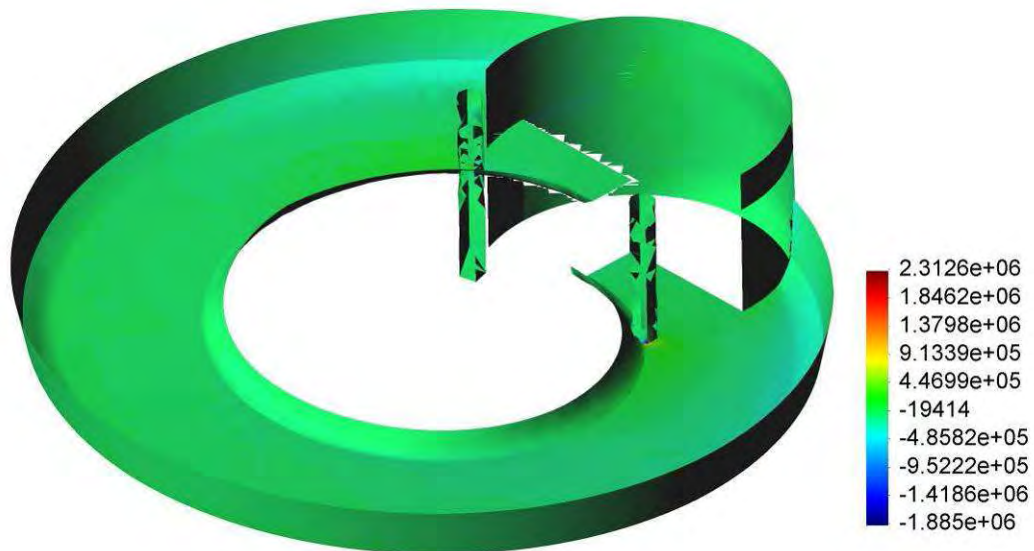


**Fig. 3.5.6** Deformaciones verticales. La zona del núcleo no sufre apenas desplazamientos en contraposición a la máxima deformación del extremo opuesto. Nótese que, a pesar de ser igualmente una deformación inadmisibles, el desplazamiento vertical del borde interior es del orden de 60cm menor que el máximo, debido al efecto rigidizador de la barandilla. (Valores en m)

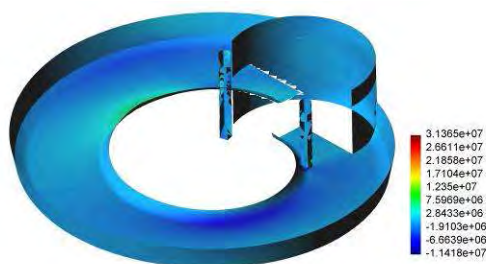




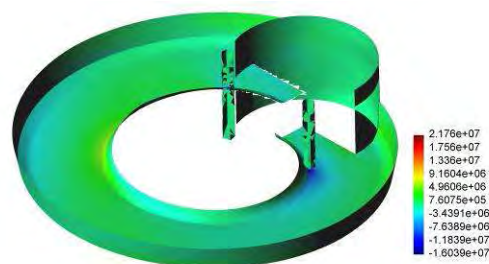
M11



M22

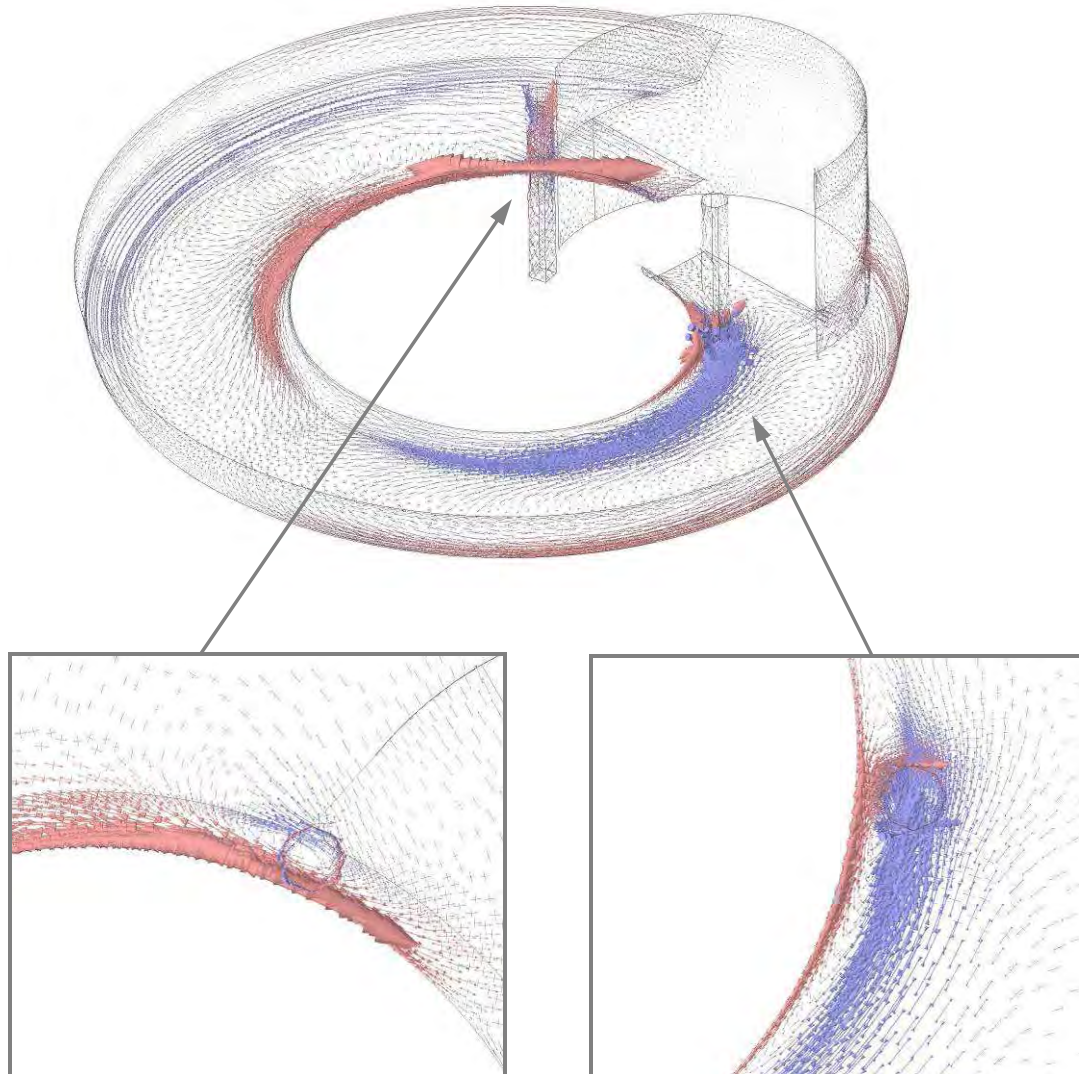


N11



N22

**Fig. 3.5.7-8** Los momentos de la lámina espiral M11 y M22 (momentos principales) sobrepasan con creces la capacidad resistente del espesor de hormigón de 15cm. Si se consideran también las tracciones y compresiones contenidas en el plano de la placa debidas al comportamiento tridimensional del conjunto N11 y N22, es evidente que a nivel resistente tampoco es viable esta opción. (Valores en N.m/m)



**Fig. 3.5.9** Disposición de líneas isostáticas de la lámina. La barandilla interior, al quedar empotrada en los dos pilares frente al núcleo, concentra el papel de soporte, ya que su rigidez frente al conjunto es mayor (a pesar de tener menos canto que la fachada, sin embargo cubre un voladizo menor). La contribución del efecto “tijera” se manifiesta a través de las isostáticas de tracción en el apoyo superior (rojo), y las de compresión en el apoyo inferior (azul).

## *Modelo de 1952*

De cara a la evaluación real del papel de la fachada y la barandilla, en esta ocasión se han ensayado las dos opciones: aprovechando estos elementos como resistentes o considerándolos únicamente como peso añadido. Este planteamiento de la estructura es coherente con el desarrollo analítico y con los ensayos realizados por Polivka, donde no se consideró la contribución estructural de tales elementos constructivos.

En ambos casos el esquema estructural está claro. Se pretende conseguir un empotramiento de la losa en el borde exterior materializado a partir de la secuencia de pantallas cada 30°. La función de este elemento es de vital importancia estructural, tanto desde el punto de vista resistente, como se ha visto, como desde una óptica formal. En este sentido, su disposición no interfiere en la continuidad del espacio interior y al mismo tiempo pauta y sistematiza la secuencia de las zonas de exposición, enlazando con la primera propuesta desarrollada en 1943. Como soporte para cada una de las plantas, sus dimensiones en sentido radial permiten materializar el empotramiento de cada nivel de la rampa en el perímetro.

Atendiendo a una configuración espacial, la longitud de las pantallas aumenta con la altura del edificio, por lo que el empotramiento en las plantas superiores se consigue de manera más efectiva. Sin embargo, esta cuestión es un recurso formal utilizado por Wright para conseguir la forma de zigurat invertido y no tanto una necesidad estructural. En concreto, en este momento del proyecto, la espiral interior está contenida en un cilindro, por lo que los voladizos de las plantas superiores son menores que en las inferiores y por tanto requieren de un menor empotramiento, al contrario de la realidad constructiva de la propuesta.

A nivel de deformaciones del borde interior, a pesar de que el efecto del empotramiento es discontinuo, cada 30°, en el perímetro interior el efecto queda diluido, observándose una deformación homogénea. La contribución de la fachada, como se aprecia en ambos casos, a pesar de ser de una gran rigidez no influye sustancialmente en el resultado. Esto es debido a que la necesidad de rigidez en esta propuesta se concentra en sentido radial, no perimetral. En cuanto a la barandilla, en este modelo sí se observa una ligera diferencia de deformación entre los dos casos. No obstante, hay que tener en cuenta la dificultad constructiva que representa garantizar la continuidad con la losa y, sobre todo, el empotramiento de ésta en los pilares frente al núcleo. En cualquier caso, su efecto favorece el comportamiento del conjunto y, dada la complejidad de incorporarla al proceso analítico realizado por Polivka y las posibles dudas sobre su ejecución, parece sensato no haberla tenido en cuenta en el análisis y considerar su beneficio únicamente como un incremento extra de seguridad.

Es destacable que a nivel de esfuerzos, la losa de 15cm planteada de manera genérica no es capaz de responder a las sollicitaciones que se observan en el modelo. Momentos negativos de 201.220 N.m/m<sup>173</sup> son excesivos para la capacidad resistente de la losa planteada. Por este motivo en la versión definitiva se propuso

---

<sup>173</sup> No es posible considerar redistribuciones de momentos debido a que se trata de un voladizo.

un canto variable para la losa que oscila desde 40cm en los apoyos a 15cm en el borde interior.

Teniendo en cuenta el desarrollo del proyecto, parece razonable que Polivka fuese avanzando en la definición de la estructura de una manera progresiva, desde la acotación del problema general hasta la resolución de los detalles. Como hemos visto en el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio de la lámina en el apartado anterior, para Polivka la incógnita resultaba ser si las ecuaciones de la placa circular agujereada, desarrolladas por Timoshenko, resultaban válidas para el problema tridimensional de la espiral. Una vez verificado mediante el análisis de maquetas que esta opción se decantaba hacia el lado de la seguridad, nuevamente el problema planteado devino una simplificación de la realidad constructiva. El empotramiento en el contorno de la losa se materializó mediante la pauta de pantallas cada 30°. La diferencia respecto al modelo ideal planteado en el capítulo anterior es que los momentos se concentran alrededor de los soportes, como es evidente. El valor de este momento de empotramiento corresponde al momento de empotramiento del disco ideal, atribuyéndole el ancho de banda correspondiente a la separación entre pantallas [ $36.452 \text{ N.m}^{174} \times 6,8\text{m} = 247.870 \text{ N.m/m}$ ]. En realidad este valor es menor [ $201.220 \text{ N.m/m}$ ] [Fig.3.5.14] debido al efecto favorable producido por los pilares frente al núcleo. En la correspondencia de Polivka a Wright se pone de manifiesto la importancia resistente de estos pilares, coherente con el protagonismo formal que ambos adquieren dentro del conjunto del atrio.

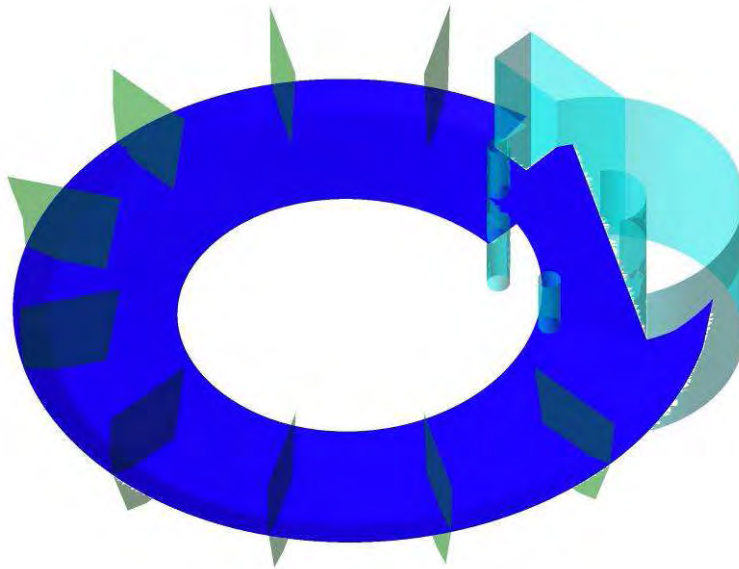
Frente a la duda sobre el papel resistente de la fachada y de la barandilla interior, a pesar de que Polivka abordó el problema sin considerarlas, se ha realizado una comparación entre ambas situaciones: contando, por un lado con la rigidez de fachada y barandilla y por el otro sin considerarla. De las imágenes [Figs. 3.5.10-17] se puede deducir que, en el caso de la fachada su contribución al funcionamiento general del sistema no es significativa. La línea de proyección de la fachada sobre la espiral coincide con el extremo exterior de las pantallas de soporte. La separación de las pantallas en este punto es de 8,10m en las plantas inferiores y de 9,65m en la última planta. En la versión definitiva, la losa en el borde perimetral se resolvió mediante un espesor de 40cm, suficiente para salvar luces entre apoyos de 8,40m en el perímetro exterior, por lo que la rigidez de la fachada no resulta imprescindible de cara a la estabilidad del conjunto. Además, como se verá más adelante, aliviar a la fachada de una función resistente primaria resultará constructivamente más sencillo.

En cuanto a la barandilla interior, en vista de los resultados de los modelos, es evidente que contribuye en cierto modo a reducir la flecha entre las dos opciones (6mm de flecha instantánea), pero al igual que la fachada, el esfuerzo constructivo extra que representa su ejecución conjuntamente con la rampa no queda compensado por su beneficio resistente. Su contribución se basa de nuevo en el efecto “tijera”, sobre-rigidizando la zona más próxima al centro de la planta, que incrementa así el grado de seguridad de la rampa<sup>175</sup>.

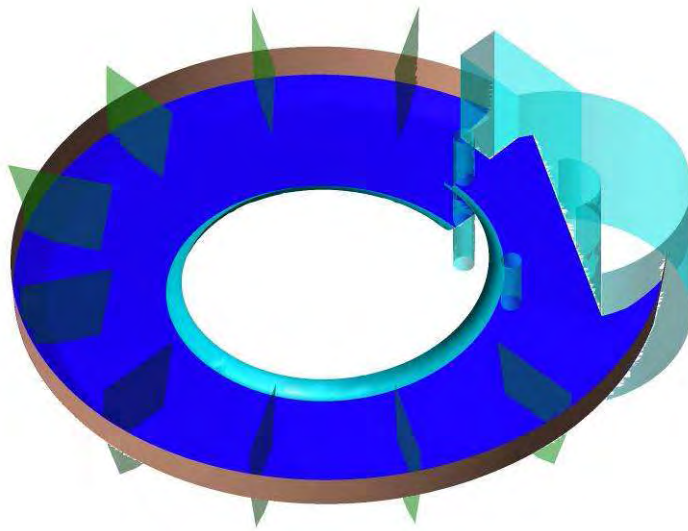
---

<sup>174</sup> Momento de empotramiento en el borde [Fig. 3.4.10 C] del disco abierto.

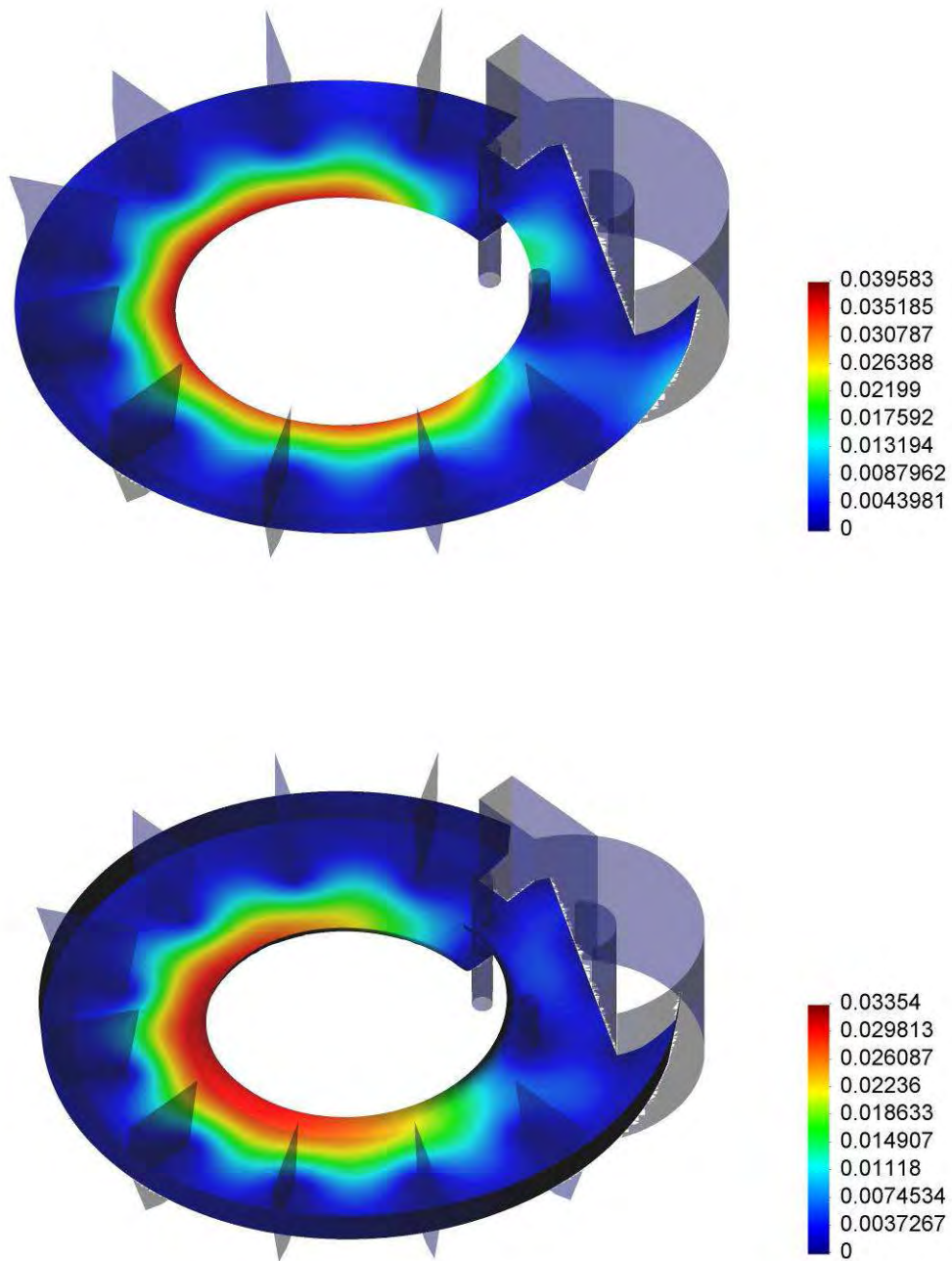
<sup>175</sup> Aunque de manera más sutil que en modelo de 1946, se forma una biela traccionada y una comprimida, ancladas en los dos pilares frente al núcleo [Fig. 3.5.18-19].



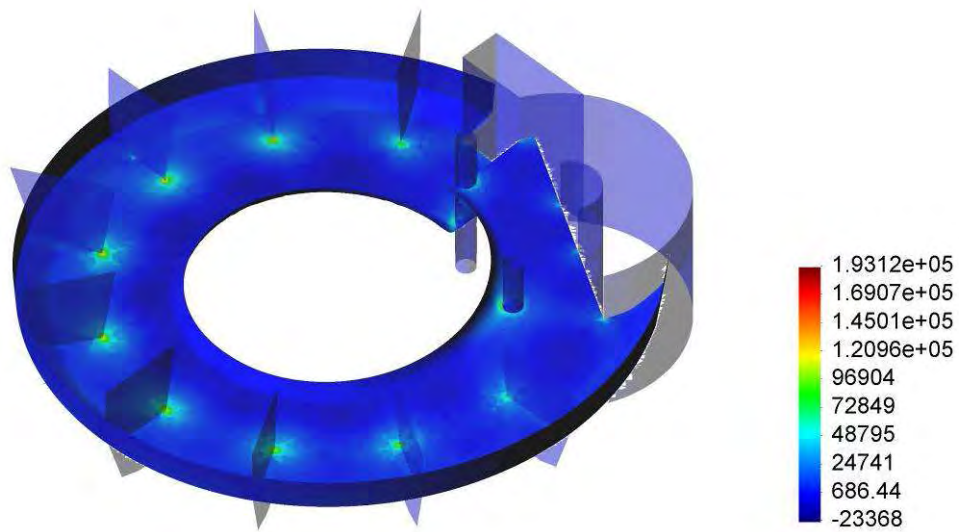
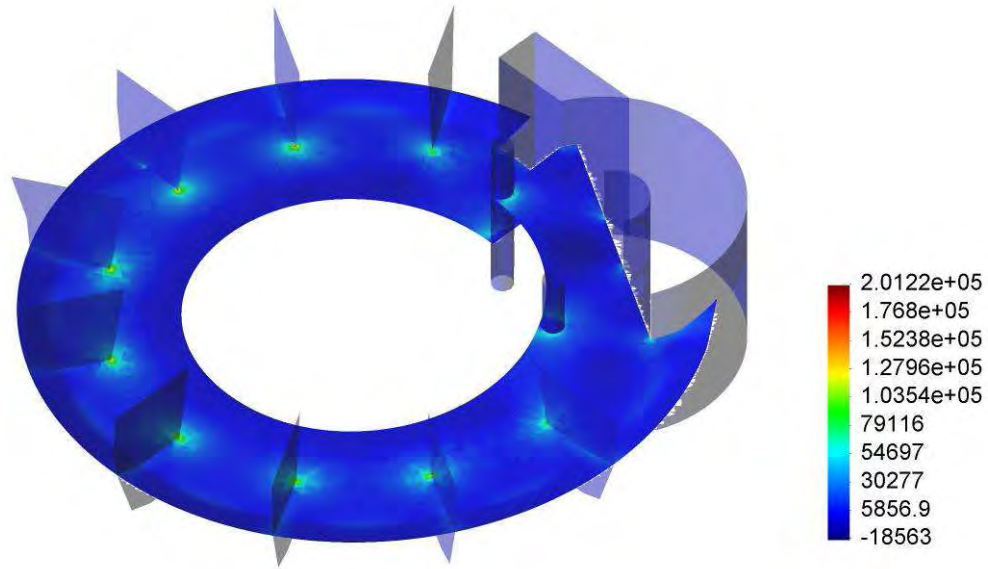
*Fig. 3.5.10* Modelo de una planta tipo sin considerar la rigidez de la barandilla ni la fachada



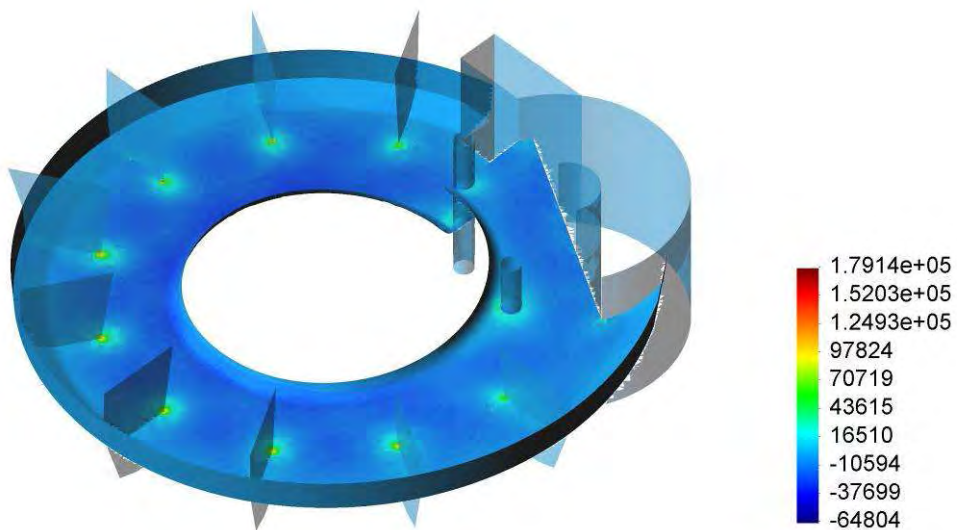
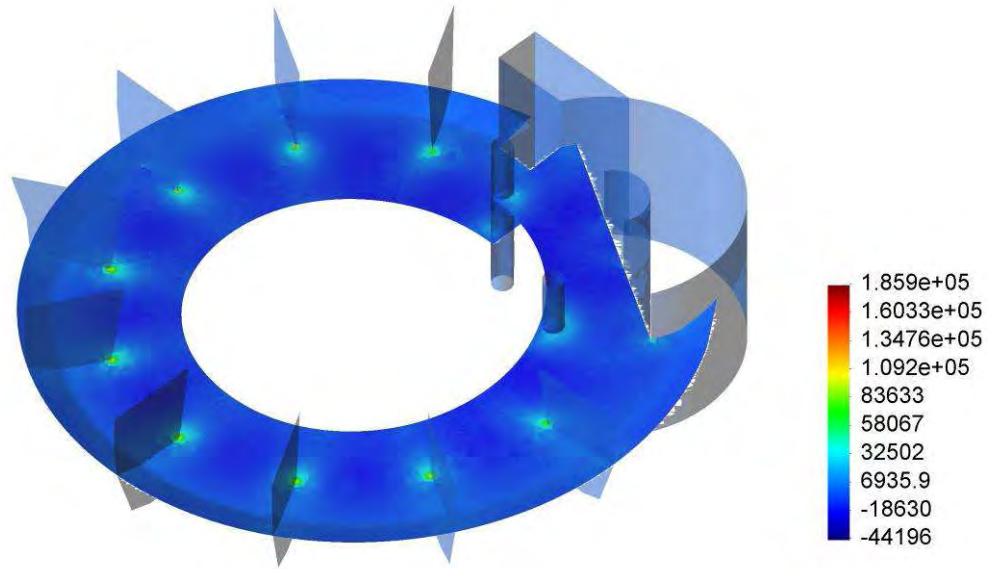
*Fig. 3.5.11* Modelo de una planta tipo considerando la rigidez de la barandilla y de la fachada.



**Fig. 3.5.12-13** En el perímetro exterior, tanto en el caso de la contribución de las fachadas como en el contrario, la diferencia de deformaciones no resulta significativa. En ambos casos, en el borde interior, a pesar de la discontinuidad de las pantallas la deformación observada resulta bastante homogénea. (Valores en m).

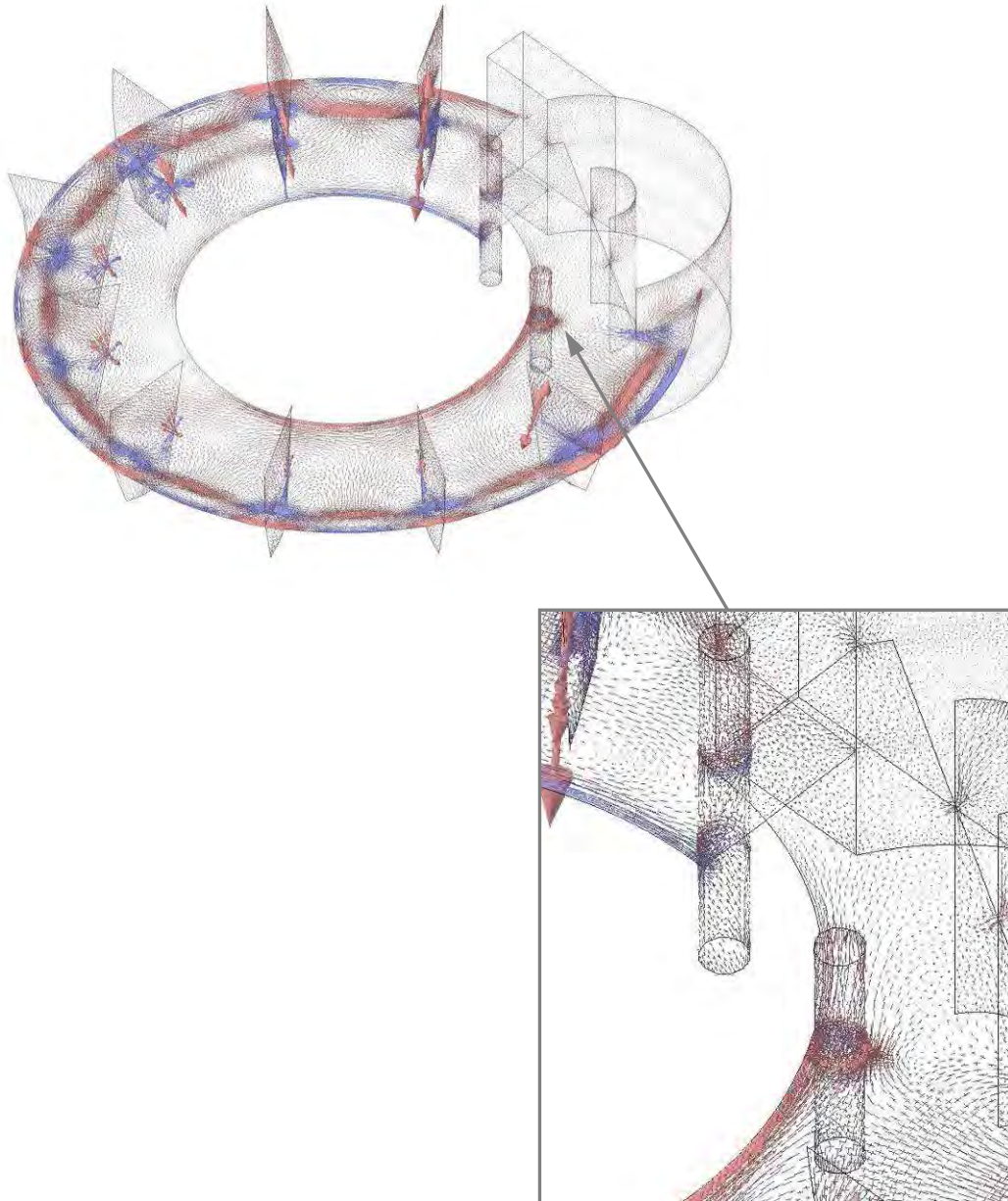


**Fig. 3.5.14-15** Momentos radiales. La mayor concentración de momentos se produce en el extremo interior de las pantallas. En el caso de considerar la rigidez de la fachada y de la barandilla, ésta última alivia ligeramente el valor del momento negativo máximo. Es significativo que en ambos casos aparece un pequeño momento positivo próximo al borde interior, debido al efecto tridimensional favorable de la espiral, apoyándose el voladizo ligeramente en este borde interior. (Valores en N.m/m).

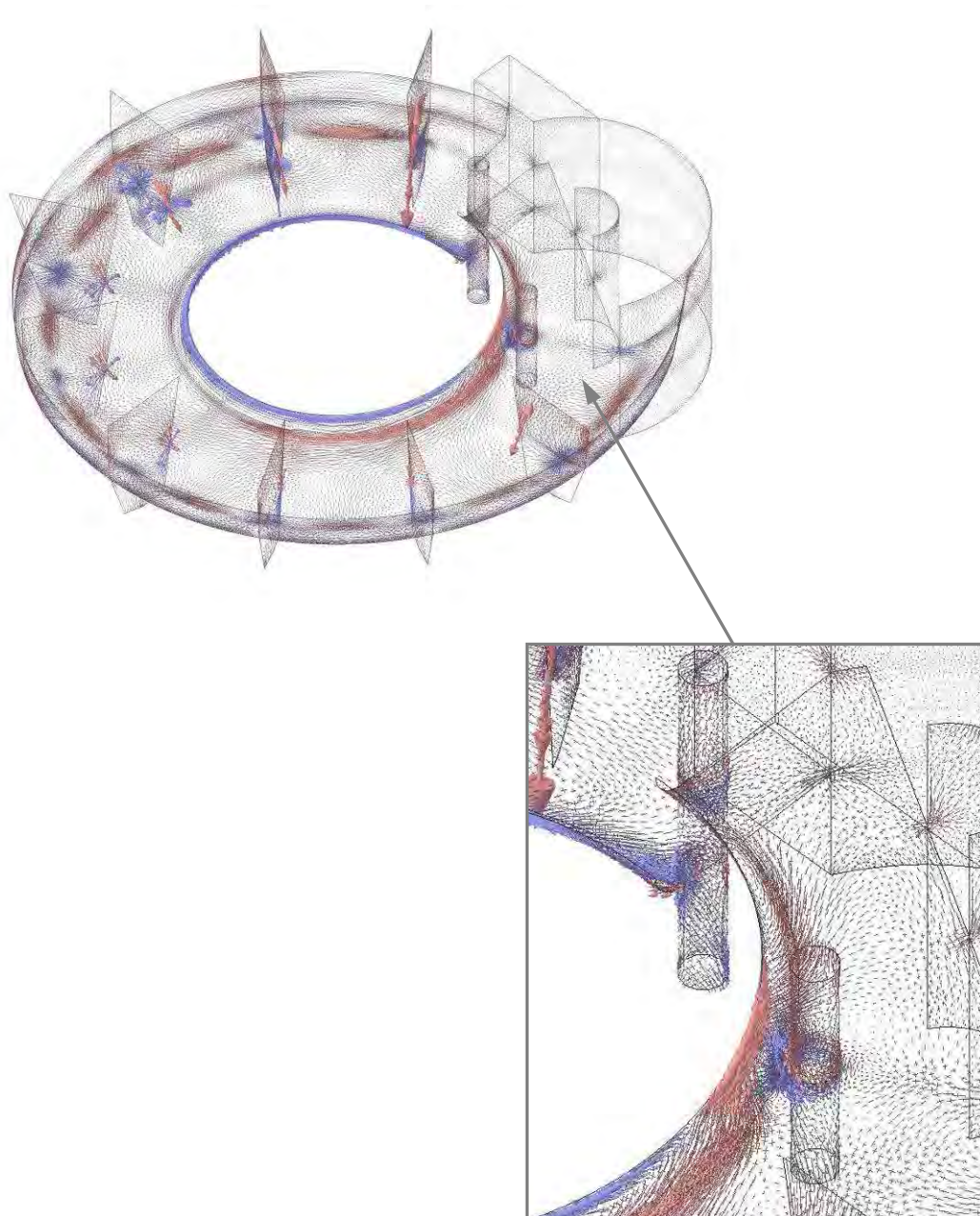


**Fig. 3.5.16-17** En cuanto a los momentos tangenciales, los máximos valores negativos se producen también entre los apoyos sobre las pantallas. Sin embargo, los valores positivos máximos están localizados en el borde interior (tanto en el caso con barandilla como sin barandilla). La razón es el funcionamiento como disco, expuesto en el apartado 3.4.9-10. (Valores en N.m/m).





**Fig. 3.5.18** En la opción sin considerar la barandilla ni la fachada como resistentes, la distribución de líneas isostáticas muestra una concentración de tensiones de tracción y compresión en los extremos del borde interior de la rampa, junto a los dos pilares frente al núcleo. Hay una cierta similitud en relación al modelo de 1946, pero en este caso la estabilidad del conjunto no depende exclusivamente de este efecto, sino que únicamente colabora a reducir ligeramente la deformación respecto a la situación del disco plano [Fig. 3.4.9]



**Fig. 3.5.19** En el modelo donde se ha considerado la rigidez de la fachada y la barandilla, este último elemento, al aumentar la rigidez del borde interior, agudiza el efecto de bielas traccionadas y comprimidas, reduciendo todavía más las deformaciones en el interior del anillo.



### 3.6 La crisis de los materiales. La lámina de hormigón VS el entramado de acero

Dentro del conjunto de dificultades a sortear en el proceso de desarrollo del proyecto del museo, el aspecto económico resultó de especial importancia. Como en cualquier edificio actual de este tipo, el valor de la estructura puede representar más de un 30% del presupuesto total y es donde, en la mayor parte de los casos, se cuestionan las virtudes de las soluciones estructurales adoptadas. A nivel de acabados o instalaciones, el listón lo suele fijar el promotor y generalmente es donde menos se pretende escatimar el coste ya que son aspectos de apreciación inmediata. Sin embargo, en lo que concierne a la estructura del edificio, al otorgársele en muchas ocasiones erróneamente un papel exclusivamente de soporte, se intenta a menudo encontrar una solución que se rija exclusivamente por criterios de optimización económica. Esto, a priori, no es malo, pero en ocasiones se sacrifican soluciones que por un incremento de coste poco relevante respecto al conjunto, aportan una gran calidad a la solución arquitectónica. En este caso, durante el desarrollo del proyecto del museo, también se produjeron situaciones de este tipo, no sólo por cuestiones presupuestarias sino también debido a la dificultad de encajar soluciones poco aceptadas socialmente, como es el caso de la lámina de hormigón frente al entramado de acero en la ciudad de New York, con una sólida tradición de construcción de rascacielos mediante entramados metálicos.

Inicialmente Wright planteaba una estructura para el edificio realizada a partir de un sistema metálico y recubierto mediante un gunitado de hormigón sobre una malla de acero. Este sistema no requería encofrados y se fundamentaba sobre la base de la utilización del acero como sistema estructural habitual, lo cual tenía una gran ventaja económica y social de partida. Las opciones formales para las fachadas barajadas por Wright eran de diferentes tonalidades de aplacados de piedra, mármol blanco o rosa. Esta solución inicial no contemplaba uno de los aspectos más importantes, el principio de continuidad y el monolitismo del conjunto, ya que quedaban diluidos en cada una de las juntas planteadas. Después de la primera toma de contacto con el hormigón, Wright decidió eliminar el aplacado y utilizar el propio material estructural como acabado exterior, quizás recubierto con polvo de mármol del color decidido, para aprovechar así el carácter continuo del material.

Pero el inconveniente fundamental del hormigón era el encofrado, que para las propuestas en espiral resultaba ciertamente singular. La rampa, en sus diferentes versiones a pesar de ser una superficie reglada dependía inicialmente para su estabilidad, en cierto modo, de la rigidez que le otorgaban la fachada y la barandilla interior. Como se ha visto, las intersecciones con estos elementos fueron evolucionando hacia formas estructuralmente más efectivas, pero también complejas de ejecutar, de manera que posiblemente, para que el conjunto de cada planta llegase a ser estructuralmente autónomo, debía ejecutarse de manera unitaria tanto la losa de la rampa como la fachada y barandillas. Todas las juntas de trabajo dentro de cada planta debían ser tratadas y dimensionadas al respecto frente a las tensiones rasantes de manera que garantizaran la continuidad de la sección, por lo que a la complejidad geométrica se le añadió un extra derivado de los procesos de hormigonado.

A finales de 1946, con la solución estructural concretada y verificada por Polivka, resultaba imprescindible encontrar una viabilidad a su construcción. Peters y Glickman, que seguían y supervisaban todo el proceso de desarrollo, propusieron retomar la opción del entramado de acero. Wright, en vista de las dificultades por seguir en el camino del hormigón, accedió a que se valorase esta posibilidad y Polivka, aunque siempre respetuoso con las decisiones de su patrón, siguió insistiendo en la posibilidad de la variante de hormigón. Su objetivo no era transformar la estructura de hormigón en acero sino el encontrar una solución económicamente competitiva con el acero y de fácil construcción.

*10 de octubre de 1946*

*Dr. J.J. Polivka*

*Berkeley, California*

*Querido Dr. Polivka: Siguiendo las directrices de Mr. Wright y Mr. Mendel Glickman he estudiado con mucho interés su nuevo análisis estructural sobre los problemas de la Modern Gallery. Después de discutir las diferentes alternativas con Mr. Wright entendemos que él, en este momento, se inclina por una estructura de acero, incluyendo las losas de los forjados. La protección contra el fuego puede aplicarse posteriormente a la construcción de la malla estructural.*

*Mr. Wright cree que en este momento y bajo las condiciones del trabajo existente en el área de New York, sería más económico y eficiente fabricar la mayor parte de esta estructura en acero comercial. También, utilizando un armazón de acero para la estructura, las formas y metodología de trabajo son un factor de coste importante en este momento.*

*En vista de lo anterior, nos preguntamos en qué medida cree usted si el análisis del sistema de forjados mediante la teoría de entramados puede ser aplicada a una retícula con barras radiales y dispuestas en forma de circunferencia. La razón por la que mencionamos esta dimensión específica es que presentimos que el efecto Poisson, el cual usted nos indicó, juega un importante papel en la reducción de flechas, siendo las barras de la malla menos efectivas donde éstas están más separadas.*

*Después de estudiar los resultados de su investigación, nos parece que construir unos forjados íntegramente mediante una malla de barras de acero no excedería aproximadamente las 7" [17,78cm] de espesor en el límite exterior (excluyendo la protección al fuego).*

*Como usted sabe, las piezas de acero pueden estar muy estandarizadas y podría ser fácil fabricarlas en el mercado, encargando vigas soldadas mediante pletinas, reduciendo las cargas muertas que pudieran aparecer, así como la reducción de momentos negativos en los muros soporte, particularmente en los niveles inferiores.*

*Tal como lo entendemos, su informe no tiene en cuenta la magnitud de la fuerza cortante y momento en la base de los muros en cada piso, así como la magnitud de las tensiones derivadas de la fuerza radial en la parte superior del muro, aunque en el dibujo indica la necesidad de estos refuerzos.*

*Agradeceríamos escucharle en el futuro en relación a estos temas ya que Mr. Wright desea resolverlos para preparar los planos finales.*

*Con los mejores deseos  
Sinceramente suyo*

*William Wesley Peters, Arquitecto  
Oficina de Frank Lloyd Wright  
Taliesin, Spring Green, Wisconsin<sup>176</sup>*

Polivka había utilizado en otros edificios un sistema de placas de hormigón fijadas a un entramado de acero, como en la casa Morris. Las placas de hormigón servían como base para un gunitado y contribuían al buen comportamiento térmico del edificio. Por este motivo, no se mostraba en desacuerdo con las nuevas propuestas.

*15 de octubre de 1946*

*He recibido su carta del 10 de octubre y estoy encantado de oír que Mr. Wright está preparando ya los dibujos finales para el Guggenheim Modern Gallery y que él está a favor de su esqueleto estructural de acero, soportando placas de hormigón ligero de acuerdo con mi sugerencia de los dibujos n°5 y n°16. Es posible que bajo las condiciones de trabajo que hay en New York, este tipo de estructura fuera más económica. Mi análisis original de la rampa de hormigón monolítico está basado en la teoría de mallas curvadas que es igualmente aplicable a una malla estructural consistente en barras radiales y tangenciales...*

*J.J. Polivka<sup>177</sup>*

Para Wright la cuestión estaba ya zanjada y es de suponer que no quería arriesgar las posibilidades de construcción del edificio por falta de seguridad en la solución estructural.

*8 de noviembre de 1946  
Dr. J.J. Polivka  
1150 Arch Street, Berkeley*

*Querido Dr. Polivka: Me he retrasado, esperando en San Francisco por ahora. Pensaba enviarle el cheque después de la consulta concerniente al alcance y carácter de sus servicios, esbozándolo de manera que sea útil.*

*He decidido seguir adelante en el museo con la malla de acero propuesta inicialmente, con placas de hormigón entre las barras y los techos cubiertos de corcho pegado.*

*Su esfuerzo debería estar dirigido hacia este sistema. El total de la estructura era más pesada tal como la teníamos.*

---

<sup>176</sup> Polivka Papers. Folder 1.03\_23

<sup>177</sup> Polivka Papers. Folder 1.07 "What is like to work with Wright"

*No le quiero retrasar en el estudio de la cimentación de la Johnson al seguir adelante con el hormigón para el Museo.*

*Realmente ha sobrepasado el tiempo previsto. Sin embargo podemos discutirlo cuando nos encontremos en algún momento. Después del 20 de noviembre estaré en San Francisco.*

*Sinceramente suyo  
Frank Lloyd Wright<sup>178</sup>*

Pero como se ha podido comprobar en la correspondencia mantenida con la compañía Corbetta, la intención de Polivka era la de agotar todas las posibilidades de la solución de hormigón, principalmente en lo que respecta a su valoración económica y puesta en obra<sup>179</sup>, cuestión que llegó a resultar incómoda para Wright, mostrándose contundente en la última misiva del año.<sup>180</sup>

La insistencia de Polivka tuvo su fruto ya que consiguió que se le liquidasen todas las facturas pendientes hasta el momento, aunque años más tarde, cuando escribió *What is like to work with Wright*<sup>181</sup>, creyó que había sido demasiado duro, no poniéndose en la difícil situación de Wright de ese momento. Es cierto que, aunque no hay demasiada constancia del porqué de la vuelta a la solución del hormigón, es muy probable que las gestiones realizadas por Polivka al respecto allanasen de nuevo el camino de la estructura respecto a este material, aunque con matices significativos que la convirtieron en una solución constructiva y económicamente viable.

Desde la perspectiva que ofrecen casi sesenta años, es evidente que ambas soluciones podrían haber resultado válidas desde el punto de vista funcional, cada una de ellas con sus ventajas e inconvenientes. No obstante, también está claro que el resultado final no hubiese sido el mismo. Trasladándonos a otras obras de Wright, la variación de material de la estructura hubiera supuesto un cambio sustancial del carácter arquitectónico. Repitiendo el ejemplo de las columnas del edificio Johnson, es difícil imaginar la misma atmósfera interior si éstas se hubiesen realizado de otra manera, aunque una envolvente de cartón-yeso reprodujese la misma forma. El principio de unidad orgánica de la obra de Wright está íntimamente ligado a este aspecto respecto a la manifestación de la estructura. Del mismo modo que en las casas construidas con el sistema block difícilmente se puede separar la estructura del conjunto, en el edificio Johnson y por ende en el Guggenheim sucede lo mismo.

El entramado de acero en la obra de Wright tiene dos vertientes. Por un lado, en las primeras obras donde se utilizó como único recurso conocido capaz de resolver el problema estructural, en el caso del Edificio Larkin o el Abraham Lincoln Center. Por el otro, entendiendo el material de acero y los entramados (y en algunos casos

---

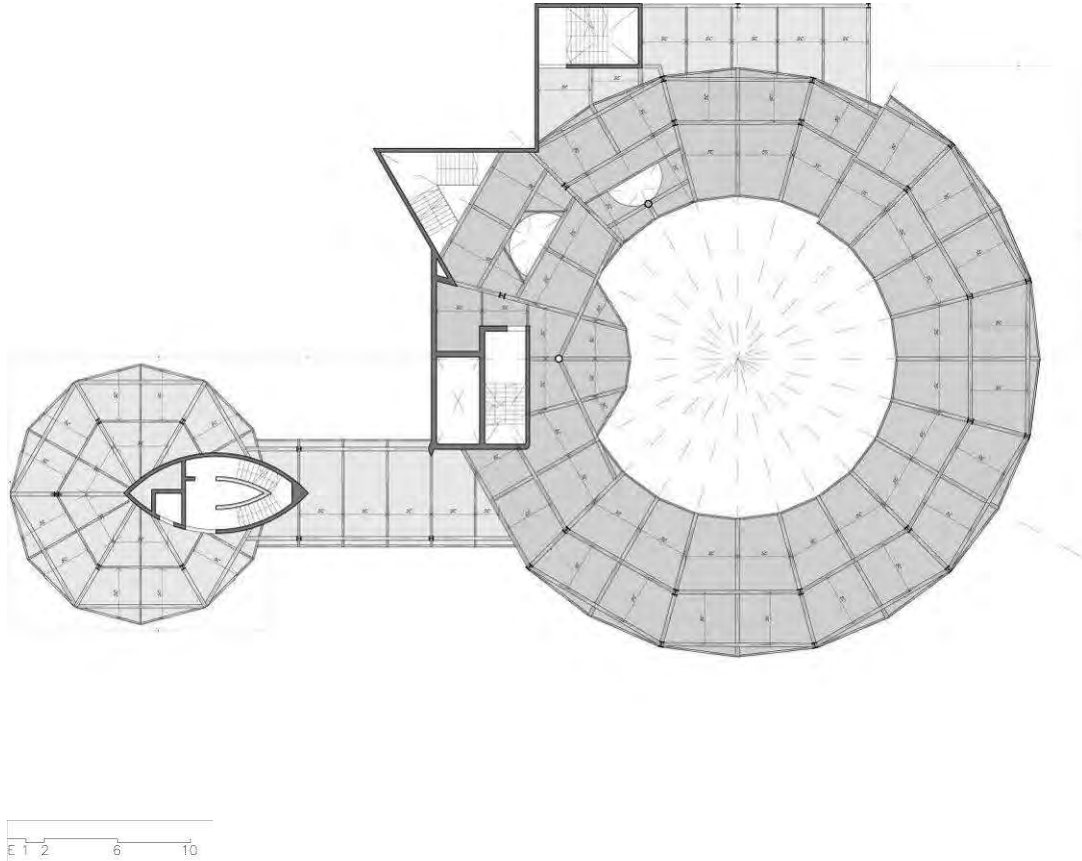
<sup>178</sup> Polivka Papers. Folder 1.03\_75

<sup>179</sup> Carta de Polivka a Mr Corbetta del 24 de noviembre de 1946. Apartado 3.3

<sup>180</sup> Carta de Wright a Polivka del 10 de diciembre de 1946. Apartado 3.3

<sup>181</sup> Polivka Papers. Folder 1.07 "*What is like to work with Wright*"

como en Taliesin Spring Green de madera) bajo la óptica del material, igual que había hecho con el hormigón. Este no es el caso de la estructura del museo, planteada en todo momento como un elemento continuo, no como un entramado revestido, y aprovechando sus cualidades plásticas en la materialización del espacio interior y la forma exterior del edificio.



**Fig. 3.6.1** Recreación de una posible solución estructural para la rampa en espiral resuelta mediante un entramado de acero revestido. La opción podría haber sido válida desde el punto de vista resistente y haber acelerado los trámites para su construcción, por lo menos en lo que respecta a las justificaciones frente al Departamento de Construcción de New York. Sin embargo, económicamente tampoco resultaba una opción tan ventajosa. De un dimensionado rápido se puede deducir una cuantía de acero de unos  $85\text{Kg/m}^2$ , frente a lo cual la losa de hormigón puede resultar competitiva.

Sin embargo, la diferencia principal entre esta opción y la finalmente construida reside en la forma de la estructura acorde con la arquitectura. Como se ha ido viendo a lo largo del texto, la arquitectura de Wright está fuertemente caracterizada por la forma estructural del edificio. En particular, la continuidad del espacio principal del museo depende en gran medida de su paralelismo con el planteamiento estructural. De esta manera, la lámina de hormigón reproduce de manera fiel esa intención y el entramado de acero, aunque eficaz, haría retornar el edificio en este sentido a la construcción del edificio Larkin.

Como puede intuirse en esta planta, la aparente regularidad radial de la misma se traduce en numerosas y variopintas soluciones para los encuentros entre perfiles de acero que de ningún modo enriquecen arquitectónicamente el edificio ya que quedarían embebidos dentro de los revestimientos. Esto no quiere decir que no haya arquitecturas de nivel realizadas con este sistema, pero, desde una perspectiva de 50 años, no parece que éste sea el más apropiado para el Guggenheim Museum.

Puede compararse esta propuesta de estructura con la finalmente construida de hormigón [Fig. 3.7.11 Nivel 4].





### 3.7 Propuesta final

Como se ha visto en los modelos previos a la solución definitiva, el comportamiento de la estructura se basa fundamentalmente en la capacidad autoportante de la rampa con forma helicoidal para resolver el voladizo hacia el interior del edificio. En este sentido, tanto las fachadas como la barandilla interior no parecen, a priori, ser elementos estructurales de primer orden.

#### Origen de la documentación:

De cara al análisis de la versión definitiva de la estructura, la geometría se ha basado en la documentación publicada al respecto sobre la versión de 1956. Sin embargo, el detalle de los espesores de cada elemento se han obtenido de la lectura de los planos constructivos originales, presentes en la última exposición sobre Wright<sup>182</sup>. De esta manera, se han abstraído unos esquemas de la estructura previos al análisis de la misma y que se muestran al final de este apartado [Figs. 3.7.7-14].

#### Descripción de la estructura:

La estructura de la versión construida se basa en la idea fundamental, ya manifestada en la versión de 1952, de formalizar el soporte perimetral mediante nueve pantallas dispuestas radialmente cada 30°. El núcleo cierra la serie hasta los 360° y, en esta última versión, se desdobra en dos volúmenes de planta triangular y rectangular respectivamente. El eje diagonal presente desde la Modern Gallery de 1945, se desdobló enfatizando así una zona de distribución y paso frente a uno de los núcleos. Como se verá, esto requirió de una solución puntual de la estructura diferente al resto de la rampa.

Dentro de todo el sistema de acotación de las plantas para su construcción, destaca la definición de la espiral como una línea poligonal formada por segmentos cada 10° en lugar de una curva como parece aparentar. La dificultad de ejecución de una curva continua decantó su trazado hacia una poligonal. Desde el interior, el trazado se suavizó mediante la colocación de un trasdosado continuo. En la cara exterior, las aristas desaparecieron mediante un tratamiento superficial de las mismas. El resultado es el efecto deseado por Wright de una superficie continua que envuelve y acompaña la forma arquitectónica, integrando en el hormigón las funciones de definición espacial y cerramiento, aparte de la función primaria de sustento.

De esta descripción genérica pueden detallarse matices que resuelven de manera particular aspectos concretos de la materialización del edificio. Hasta el nivel 2, el apoyo continuo perimetral se formaliza de manera literal, mediante un muro cilíndrico de casi 30m de diámetro. En la planta sótano el muro se perfora para iluminar el interior a través de un patio inglés y en la planta baja y primera presenta grandes aberturas para abrir el atrio central hacia el exterior. En estos

---

<sup>182</sup> Exposición del 50 aniversario de la muerte de Wright y la inauguración del Guggenheim. Museo Guggenheim New York – Bilbao, 2009-2010. Las reproducciones de los planos, de gran tamaño, no permiten la lectura de pequeñas notas, habituales en un plano constructivo. De los planos originales no ha sido posible obtener ninguna copia legible, por lo que estos datos se basan en las notas tomadas por el autor [Figs. 3.7.1-6]

puntos, aparecen contrafuertes a ambos lados de los huecos que se sitúan siempre sobre la pauta radial de los 30°. Son, en algunos casos, la continuación hacia la base de las pantallas radiales que resuelven las plantas tipo. De nuevo en el nivel inferior, el forjado que en las versiones iniciales se insinuaba como una cúpula, se materializó como una losa plana donde, para reducir la distancia entre apoyos de 30m, aparecieron un grupo de pilares circulares formando un anillo interior de 18,5m de diámetro, que se resolvió mediante una losa maciza de unos 65cm de espesor. Dos de estos pilares son los que se prolongan en las plantas superiores caracterizando el frente de los núcleos. En el caso del pilar frente al núcleo rectangular, su papel de soporte es fundamental. Wright introdujo una variación de la forma interior del atrio mediante la ampliación de la superficie en este punto en cada una de las plantas, por lo que el voladizo, sin contar con el pilar, hubiese sido de 5,6m. El soporte, aparte de resolver esta cuestión resistente, tiene una presencia formal interior importante, indicando en cada una de las plantas la posición de los accesos. El otro pilar queda integrado en el volumen cilíndrico de servicios, que se manifiesta también como un elemento vertical continuo diferenciador del espacio. Las nueve pantallas de soporte perimetral también son en cierto modo continuas a lo largo de toda la altura del edificio. Nacen, bien de los contrafuertes del muro en la base o bien de la coronación de este y se prolongan hacia la cubierta aumentando sus dimensiones de forma lineal al aumento de anchura de la rampa. La razón de ser de esta forma no es resistente ya que la mayor concentración de axil de compresión está en la base y no en la coronación, donde presentan mayor dimensión. Sin embargo, al igual que en el edificio Johnson las columnas dendriformes son más estrechas en la parte inferior, aquí este estrangulamiento materializa de algún modo el apoyo del sistema de pantallas sobre el muro de base minimizando la transmisión de momentos. Nuevamente, son los nudos rígidos entre las pantallas y la losa de la rampa los responsables de garantizar un sistema en equilibrio [fig.2.4.3], pero en este caso siguiendo un desarrollo radial, no ortogonal.

Una diferencia importante de esta solución final respecto a las anteriores es la resolución de la estructura del lucernario central. En todas las opciones previas, figura una cúpula resuelta mediante tubo de pirex. Sin embargo, posiblemente por cuestiones económicas, el tubo de vidrio se sustituye por un lucernario con piezas de vidrio convencionales. También en el lucernario perimetral de cada planta, que ilumina la superficie de exposición, se reemplazó el pirex por una solución más convencional. No obstante, en el caso del atrio central, esto no sólo no representó una pérdida de valores espaciales sino que sirvió para potenciar el carácter continuo de los espacios, en este caso hacia la parte superior. Esto fue gracias a la continuidad de las pantallas de soporte, que se transformaron en jácenas radiales agrupadas de dos en dos, tal como se explica en el siguiente apartado.

La sección tipo de la rampa se define como una losa maciza de canto variable, con un espesor máximo de 1'-3,5" [39,37cm] en todo el ámbito de apoyo sobre las pantallas y con un espesor mínimo de 4,5" [11,43cm] en el borde interior para resolver así el vuelo constante hacia el interior de 4,4m. La fachada es, como se ha dicho, un paramento de hormigón poligonal, de 5" [12,7cm] que se indica específicamente su ejecución mediante un encofrado por la cara exterior y gunitado desde el interior. El sistema de construcción de la barandilla interior es el mismo,

gunitando el espesor de hormigón de 3' [7,62cm] sobre un encofrado desde el interior del atrio. En este caso la barandilla envuelve los conductos de climatización que circulan sobre el perímetro interior. Para asegurar su correcto anclaje a la estructura se disponen dos puntos de conexión, mediante una barra de acero en forma de “u” de ½” [12,7mm]. Esta superficie gunitada sólo dispone de un armado central, reforzándose en el pliegue y extremos.

#### Descripción del análisis:

Para el análisis se ha tomado como referencia una planta tipo, nivel 3, aplicando los mismos criterios de materiales, cargas y condiciones de contorno que en las versiones anteriores<sup>183</sup>. La diferencia, aparte de la geométrica, es la utilización de los espesores concretos de esta versión para cada uno de los elementos de hormigón. Tanto la fachada como la barandilla se han considerado únicamente a efectos de carga, no de rigidez. En el caso de la barandilla, dada su menor envergadura resistente frente a la losa y el dimensionado de conectores y armado, se ha considerado estrictamente como un elemento constructivo no resistente. Además, debido a la secuencia de construcción necesariamente posterior debido a que incorpora instalaciones en su interior, es dudoso que se haya considerado su contribución a la rigidez de la estructura. En cuanto a la fachada, como se ha comprobado, a pesar de poder rigidizar considerablemente la rampa en espiral, su efecto no repercute en la misma proporción sobre la estructura ya que sobrerigidiza la parte menos necesaria del sistema. Como se verá en las imágenes del proceso de construcción, se muestra que la rampa y estos dos elementos no se construyeron de manera simultánea, lo que refuerza estas hipótesis.

#### Conclusiones del análisis:

Como sucede en los modelos simplificados y en las versiones anteriores, la máxima deformación se produce en el borde interior del anillo, en concreto en el extremo opuesto a la ubicación del núcleo. El hecho de considerar en este caso una losa de canto variable, con mayor espesor en el apoyo que en los modelos anteriores, reduce significativamente la deformación en este punto a 15mm de flecha instantánea [Fig. 3.7.16]. Esto supone unos 35mm de flecha diferida, que para un vuelo de unos 4,4m resulta una relación 1/125 de la longitud del vuelo. Hay que señalar que el

---

<sup>183</sup> Análisis en régimen elástico lineal mediante elementos finitos (programa GID, The personal Pre and Post Processor – Módulo Ramshell. [www.gid.cimne.upc.es](http://www.gid.cimne.upc.es) – [www.compassis.com](http://www.compassis.com) ).

Datos del hormigón: Módulo de Young  $E_{cm} = 8.500 \sqrt[3]{f_{cm}}$  ;  $E_{cm} = 23.072,55 \text{ N/mm}^2$ , según EHE para un hormigón HA-20. Coeficiente de Poisson  $\mu = 0,2$  ;

Densidad  $\gamma = 25.000 \text{ N/m}^3$

#### Estado de cargas:

Peso propio: según espesor de la losa

Cargas permanentes:  $1.200 \text{ N/m}^2$  [pavimento, instalaciones y falso techo]

Sobrecarga de uso:  $4.880 \text{ N/m}^2$  [según carta de Polivka a Wright del 17 de junio de 1946 la sobrecarga de uso aplicada era de 100PSI<sup>2</sup>]

Condiciones de contorno: Tanto los pilares como las pantallas y el núcleo se consideran articulados en la base y coronación del modelo.

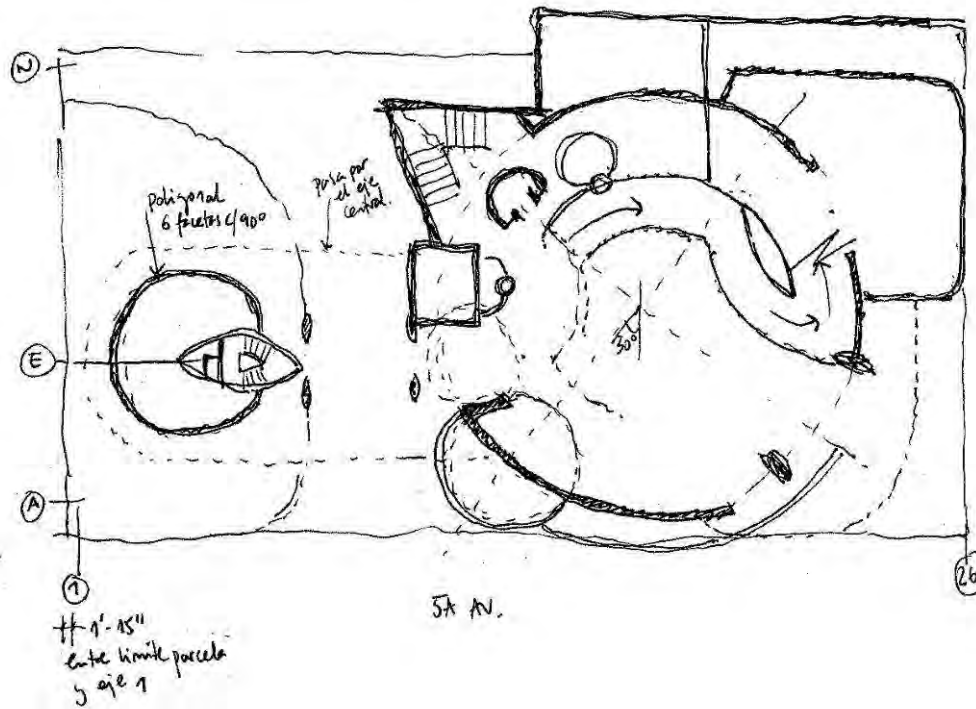
rango de aceptación de deformaciones actual no es el mismo que hace cincuenta años. Además, no existen elementos constructivos que unan dos forjados consecutivos por lo que no existe riesgo de rotura de tabiques o cuestiones similares. Sin embargo, en un nivel de análisis más profundo, una flecha excesiva puede suponer que la frecuencia de vibración del forjado supere los límites admisibles de confort, a lo que el autor debe decir que, paseando por el borde de la barandilla no se percibe ningún tipo de sensación de vibración. En este sentido, el voladizo que se produce frente al pilar exento es el punto más desfavorable, por lo que puntualmente la losa presenta aquí un mayor espesor.

A nivel de esfuerzos, las imágenes de los momentos en las direcciones principales [Fig.3.7.17-18] evidencian el comportamiento en voladizo hacia el interior de la rampa. El valor máximo observado en la dirección del voladizo es de 277N.m/m (momento negativo radial) y de 286N.m/m (negativo tangencial) y 124N.m/m (positivo tangencial). Estos valores, a pesar de ser de una magnitud respetable, son perfectamente asumibles para un espesor de losa de 39cm. A modo de ejemplo, para el momento generado por el voladizo son necesarios 32,3cm<sup>2</sup> de acero, lo que representa aproximadamente 11 Ø 20 en un metro. En cuanto al negativo en sentido perpendicular, sin considerarse cierta redistribución de momentos, son necesarios 33,5cm<sup>2</sup> de acero, lo que se traduce en 12 Ø 20. El momento positivo de la dirección tangencial, del orden de la mitad que los negativos, requiere 13,2cm<sup>2</sup>, unas 8 Ø 16 cada metro. Estos valores, traducidos directamente a un área de acero sin tener en cuenta ningún tipo de criterio de plastificación, ponen de manifiesto la viabilidad de los espesores propuestos en los planos constructivos, optimizando la rampa respecto a las versiones anteriores al concentrar el mayor canto en el empotramiento y aligerar el extremo del voladizo.

El efecto tridimensional de la rampa, aunque sutil, contribuye favorablemente del mismo modo que se observa en los modelos simplificados. En el mapa de líneas isostáticas [Fig. 3.7.19], se observa frente al núcleo rectangular un par de fuerzas laminares de tracción-compresión de forma análoga a las bielas producidas en los modelos anteriores o en el efecto “tijera”. Este fenómeno aporta seguridad al análisis plano efectuado por Polivka, al igual que el incremento de rigidez que puede producir la fachada de hormigón o la barandilla en el extremo interior del voladizo.

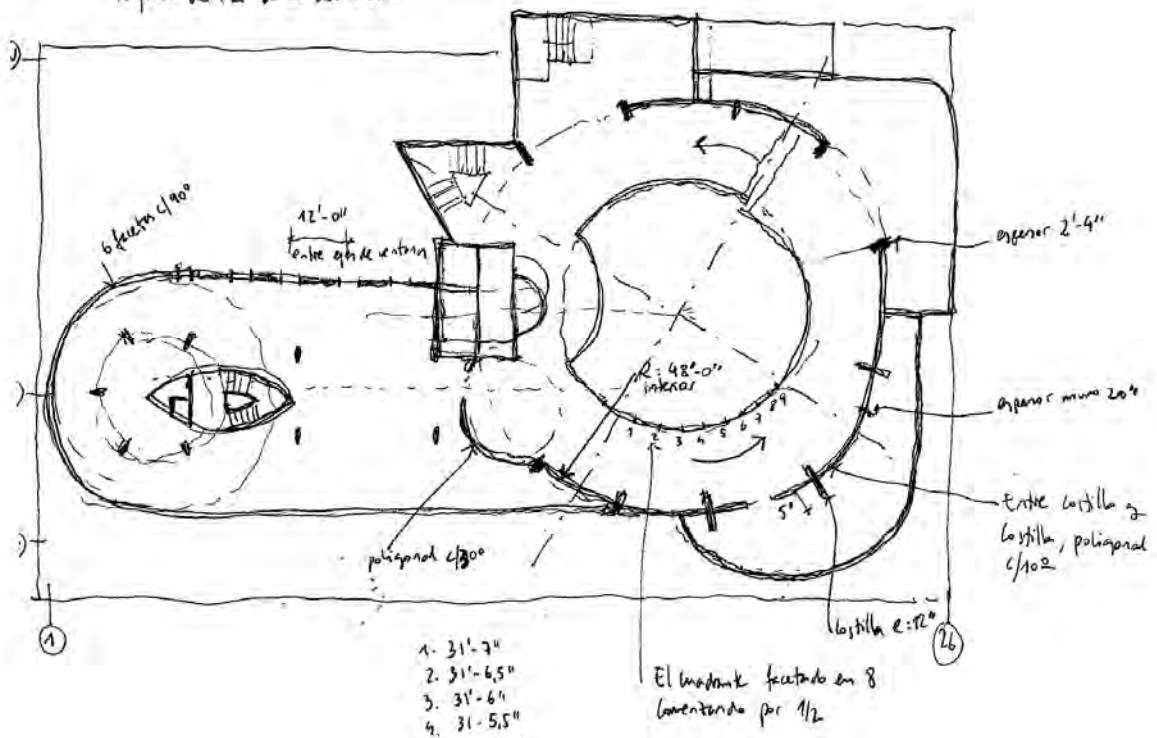
Todo esto puede resumirse en varios conceptos:

- El efecto de empotramiento de la rampa helicoidal en su perímetro exterior se consigue gracias a la sucesión de pantallas cada 30°
- En la zona del núcleo, los dos pilares circulares frente al mismo son necesarios debido a la distorsión que produce la posición del núcleo respecto a la solución tipo del resto de cada planta.
- La losa que forma la rampa es autoportante, sin necesidad de que la fachada o la barandilla contribuyan a la rigidez del conjunto de la estructura.
- El efecto tridimensional de la rampa tiene como consecuencia un grado extra de seguridad del sistema, reduciendo las deformaciones en el extremo del voladizo tipo. La consecuencia son unas fuerzas de tracción y compresión en el plano de la placa.

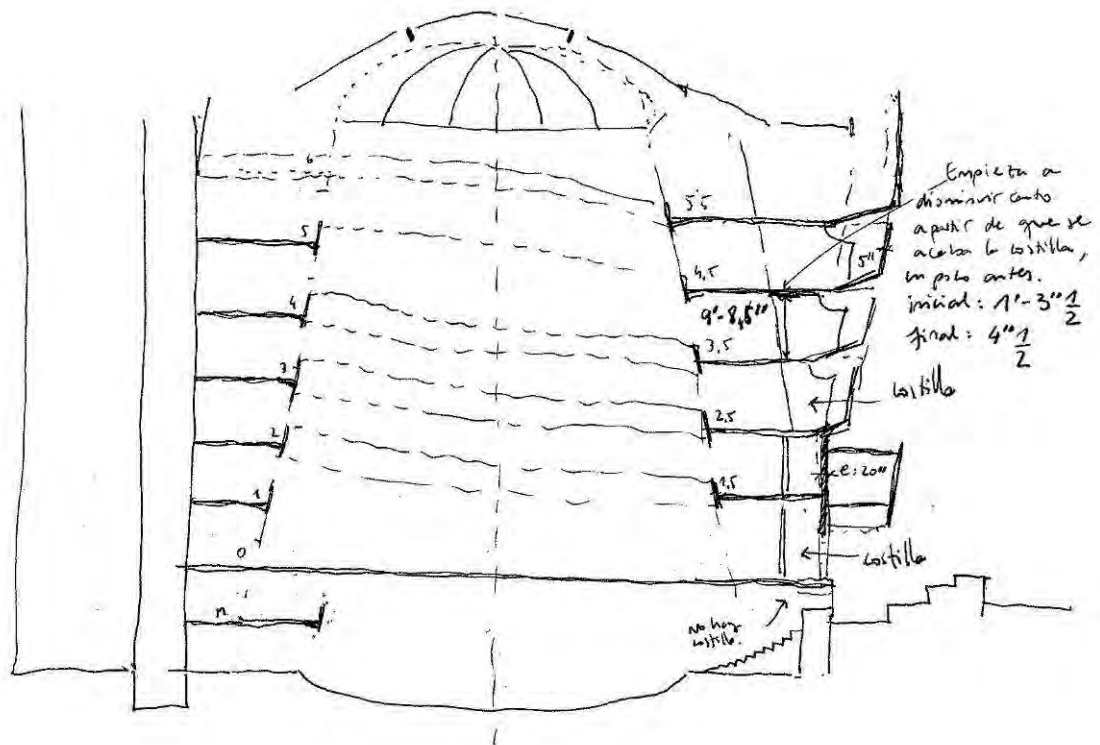


**Fig. 3.7.1** En la planta baja se observan los elementos principales de soporte. El radio interior del espacio principal es de 48'-0" [14,63m] y el espesor del muro de 20" [50,80cm].

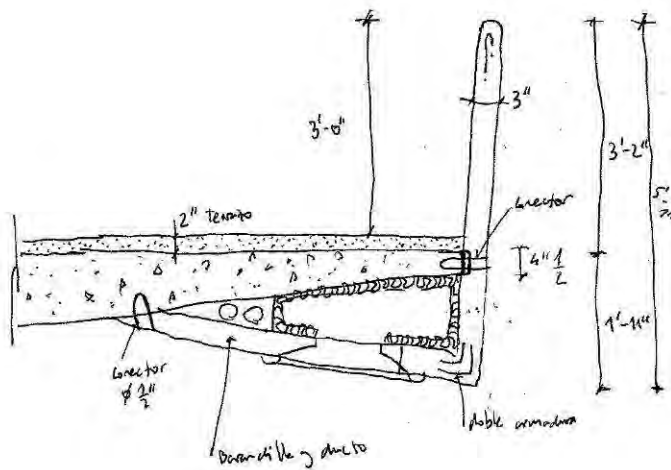
En PB y P1 es una circunferencia. R: 48'-0" interior  
A partir de P2 se va abriendo



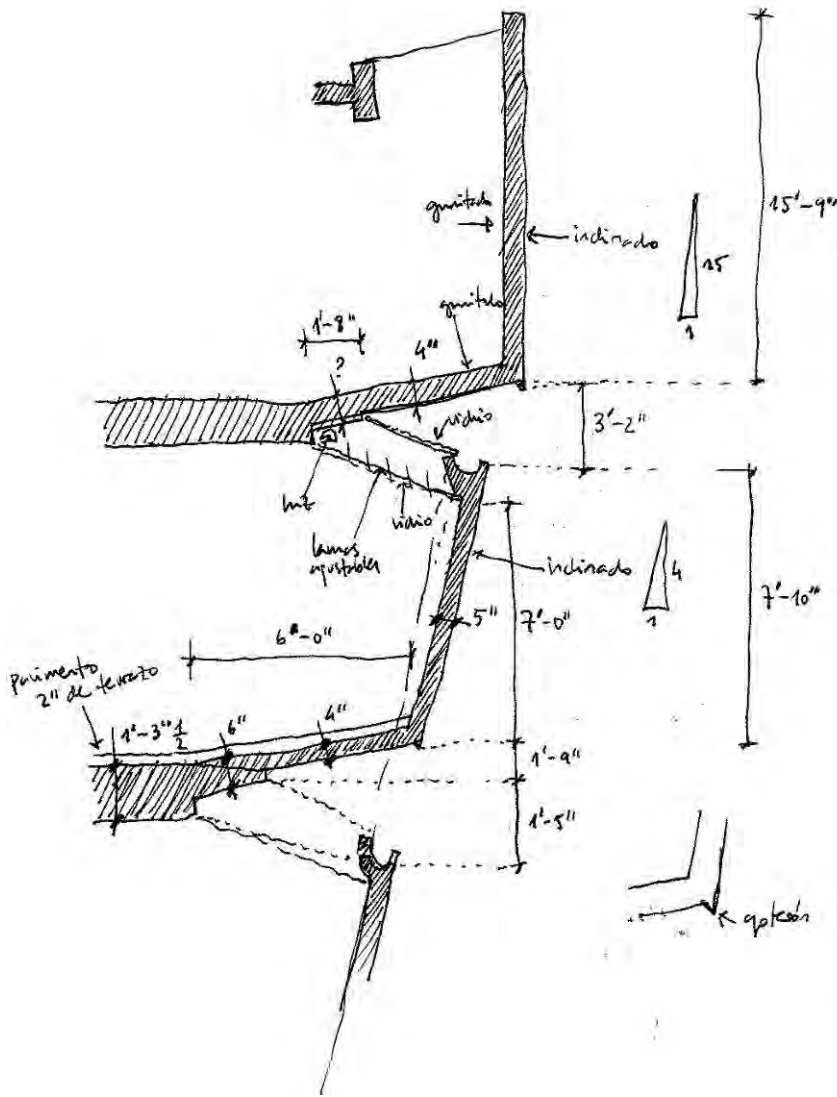
**Fig. 3.7.2** En la planta primera aparecen las pantallas radiales que arrancan de la coronación del muro circular. Las pantallas radiales se dividen en dos tipos de espesor: las de 20" de grueso y las de 12" [30,48cm]. La curva de la barandilla de la rampa se faceta en una poligonal cada 11,25° (8 tramos cada 90°) y la curva exterior en una poligonal cada 10° (3 tramos cada 30°).



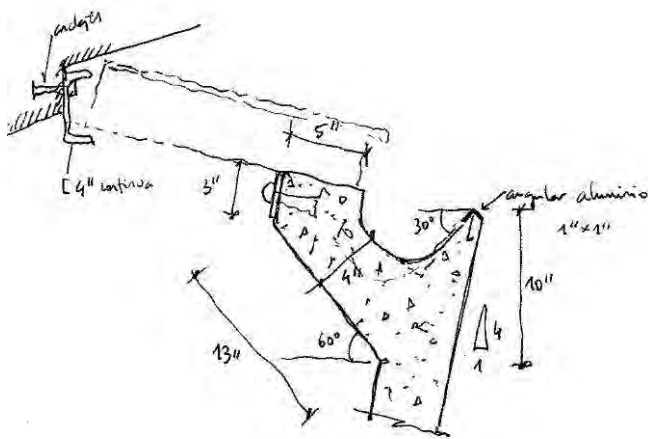
**Fig. 3.7.3** Sección general de la sala. La altura entre plantas se acota de 9'-8,5" [2,96m]. El espesor de la rampa en voladizo es de 1'-3,5" [39,37cm] en el arranque del vuelo y de 4,5" [11,43cm] en el extremo. El sistema de pantallas radiales desaparece en el sótano.



**Fig. 3.7.4** La barandilla interior se propone también de hormigón gunitado, finalmente con un espesor de 3' [7,62cm], por lo que difícilmente puede atribuírsele una función estructural principal.

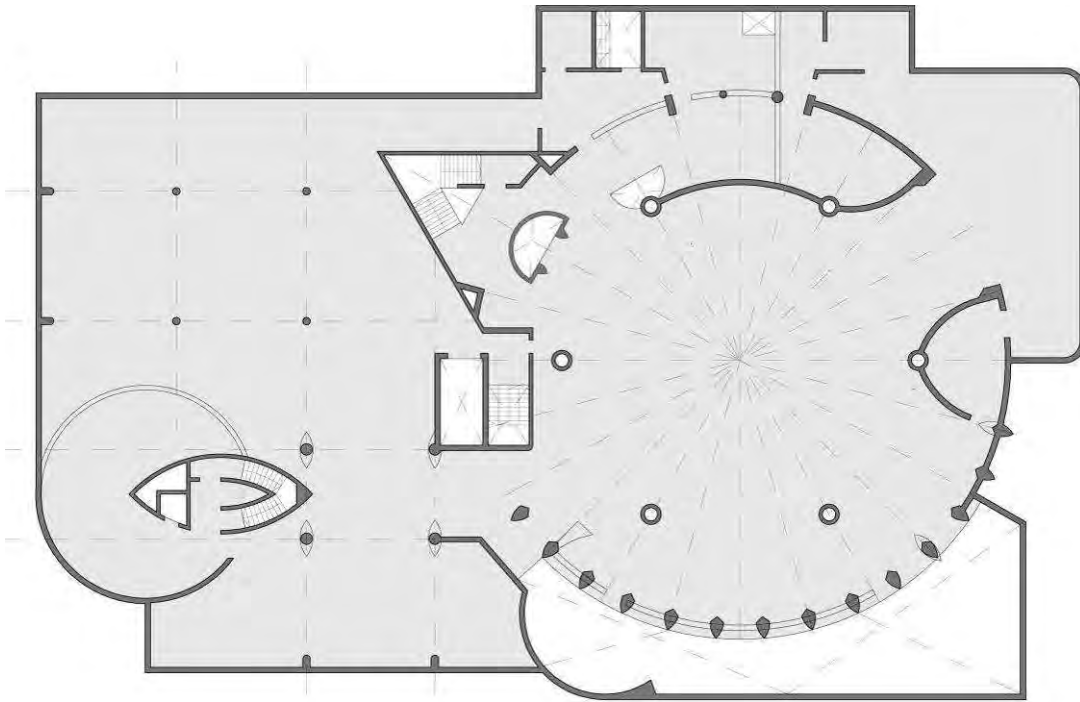


**Fig. 3.7.5** En el detalle de la sección aparecen las especificaciones del gunitado para la fachada, con un espesor de 5" [12,7cm], difícil de ejecutar con garantías en caso de haberse encofrado en las dos caras. El gunitado no sólo se utiliza para los paramentos casi verticales, sino también para el tramo de losa inclinada de conexión con la fachada, de un espesor de 4" [10,16cm].

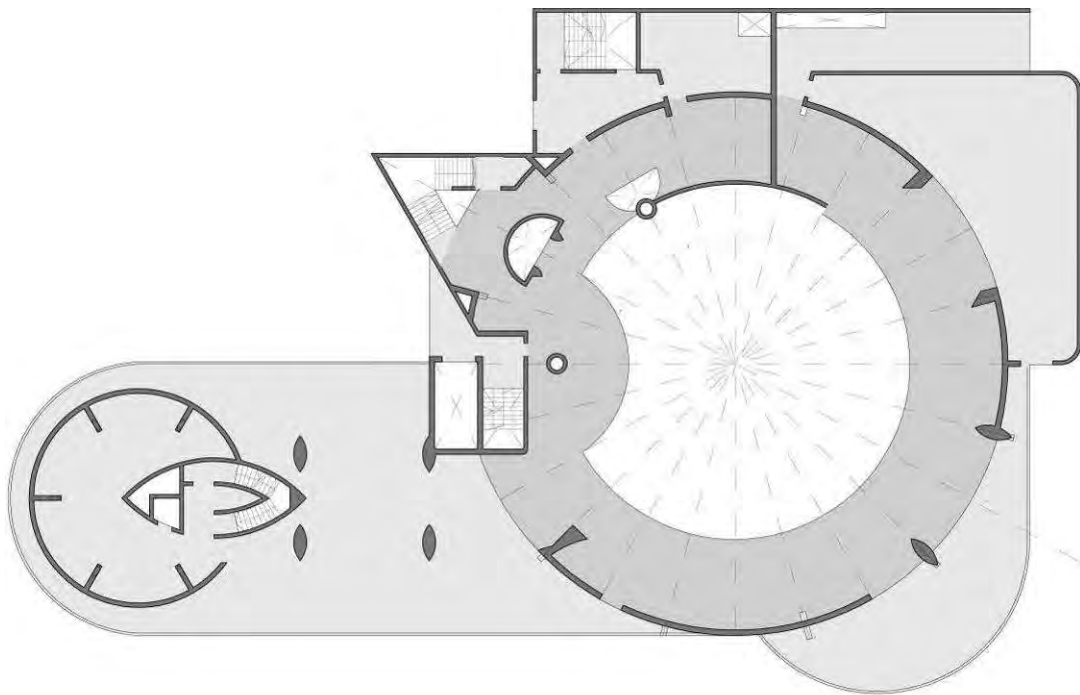


**Fig. 3.7.5** Para el detalle de fijación del vidrio del lucernario continuo perimetral se utilizan elementos de acero, anclados al hormigón. La solución del lucernario mediante tubo de pirex se desestima en la versión construida, al igual que en la gran cúpula central.



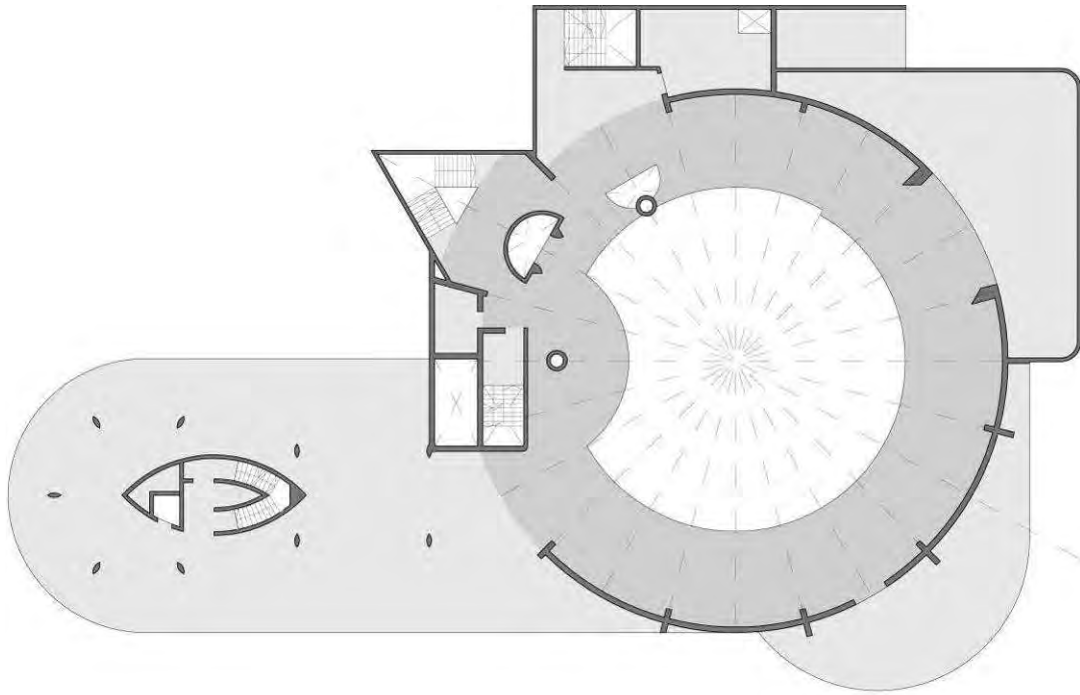


**Fig. 3.7.7** Nivel 0, Techo del sótano

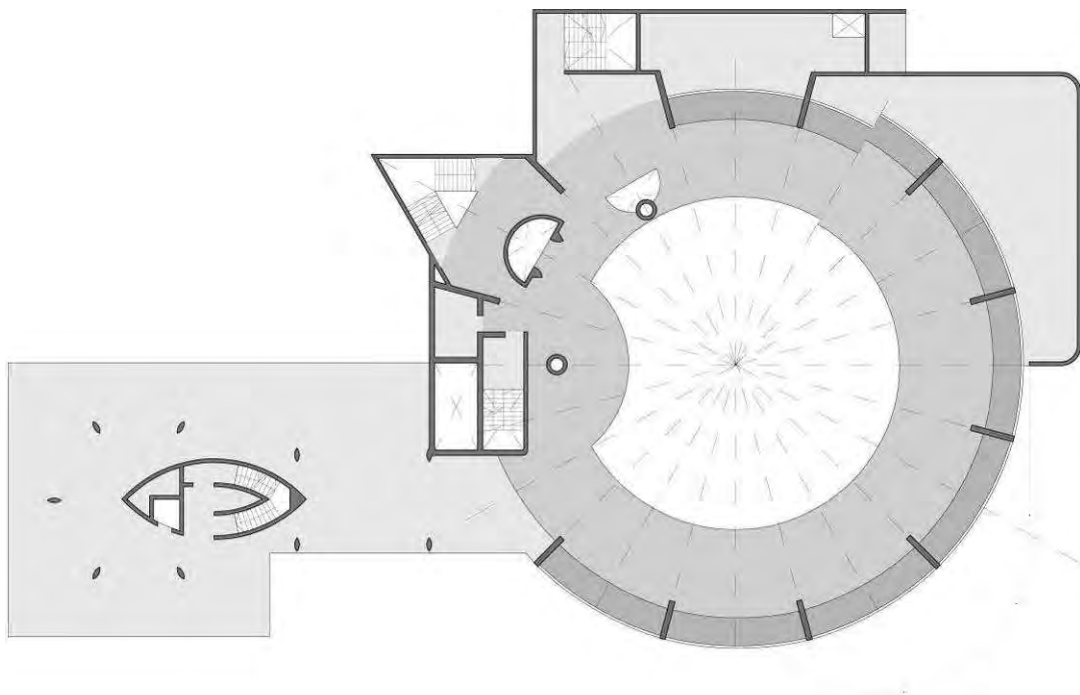


**Fig. 3.7.8** Nivel 1, Techo de la planta baja

E 1 2 6 10

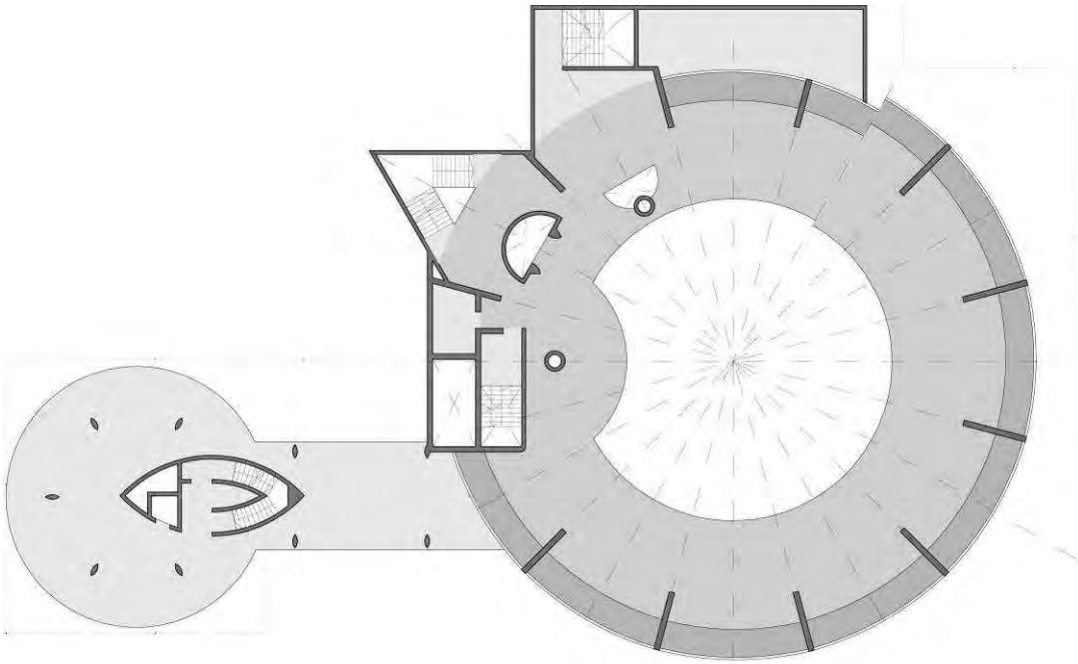


**Fig. 3.7.9** Nivel 2

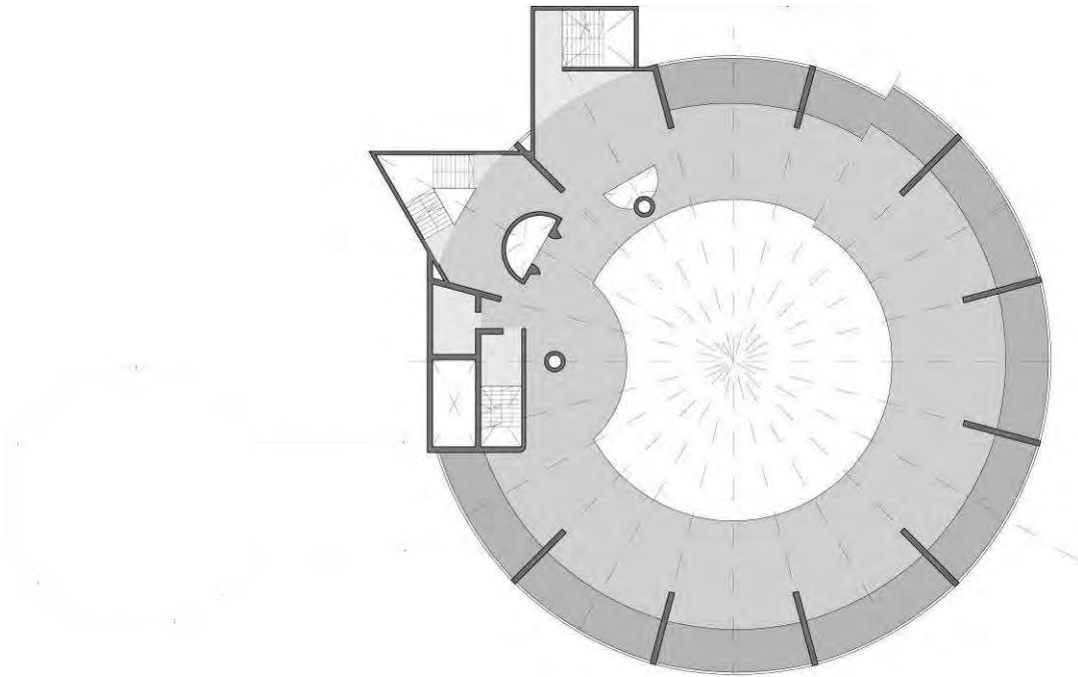


**Fig. 3.7.10** Nivel 3

E 1 2 6 10

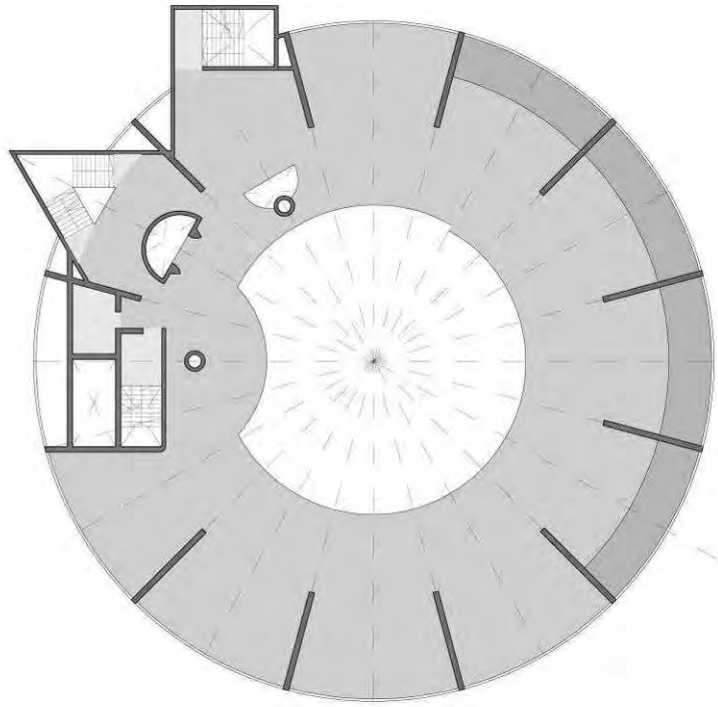


**Fig. 3.7.11** Nivel 4

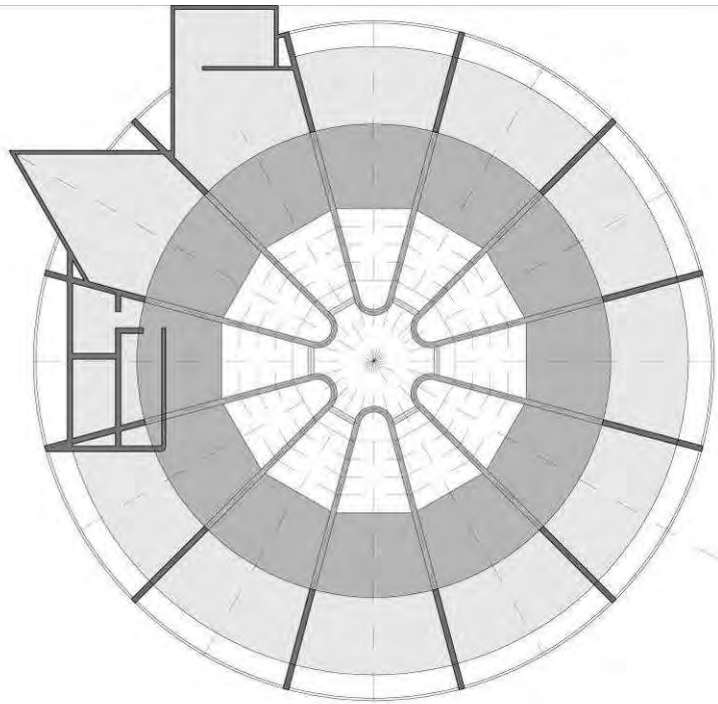


**Fig. 3.7.12** Nivel 5

E 1 2 6 10

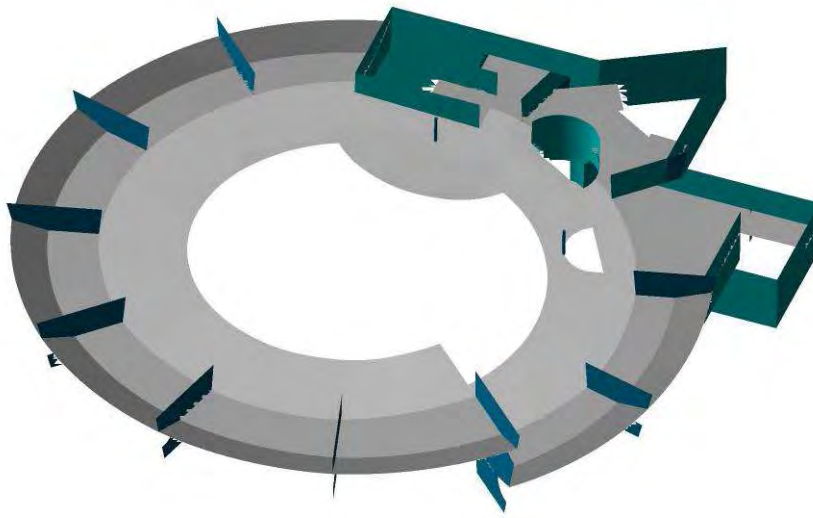


**Fig. 3.7.13** Nivel 6

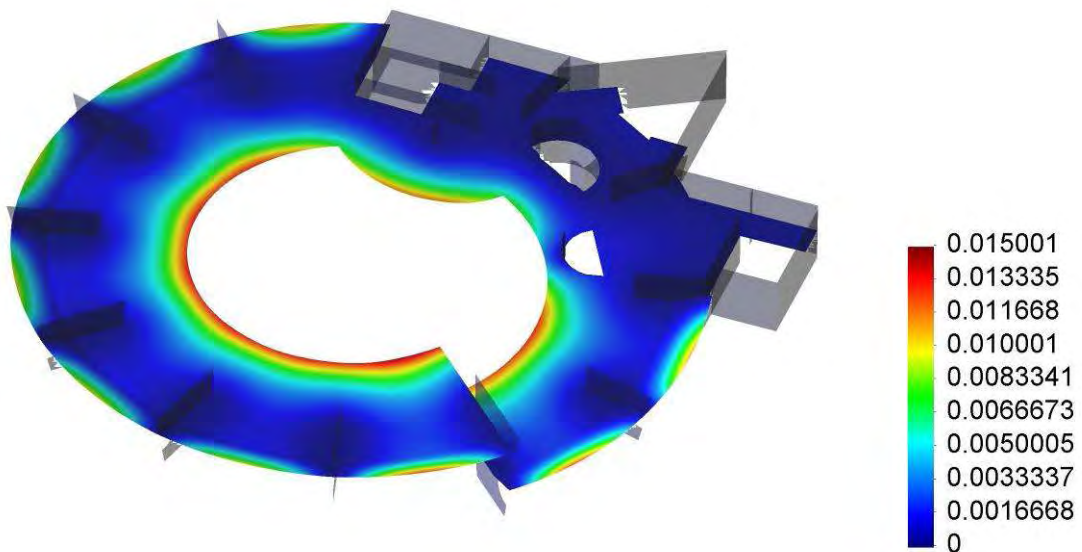


**Fig. 3.7.14** Cubierta

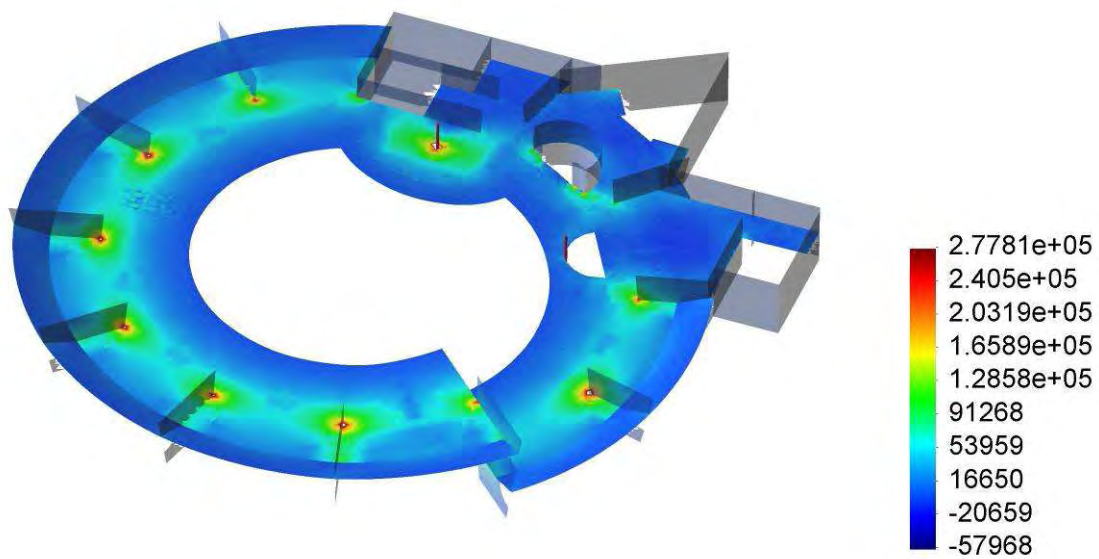




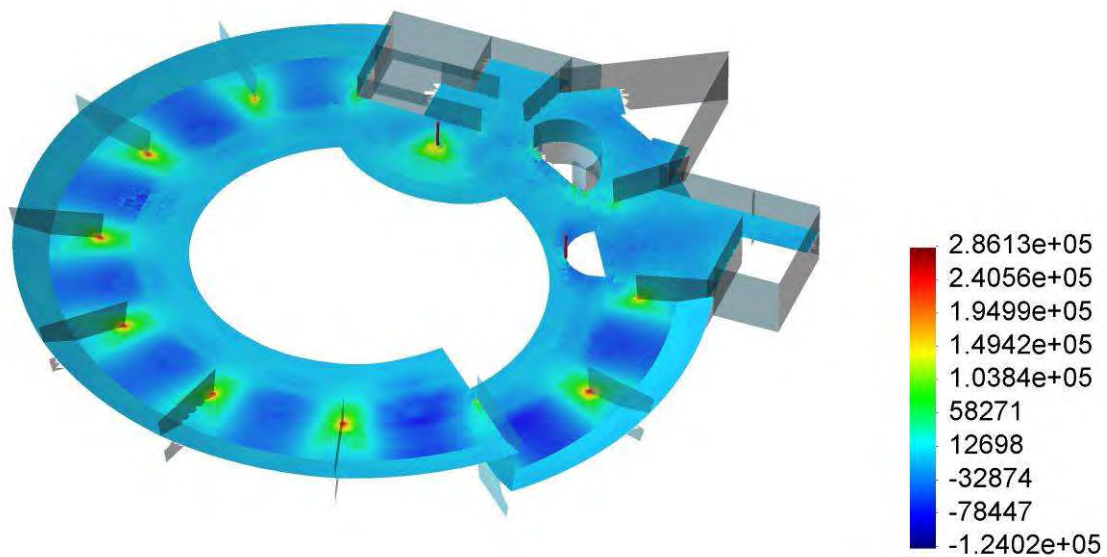
**Fig. 3.7.15** Modelo de una planta tipo, sin considerar las rigideces de fachada y barandilla.



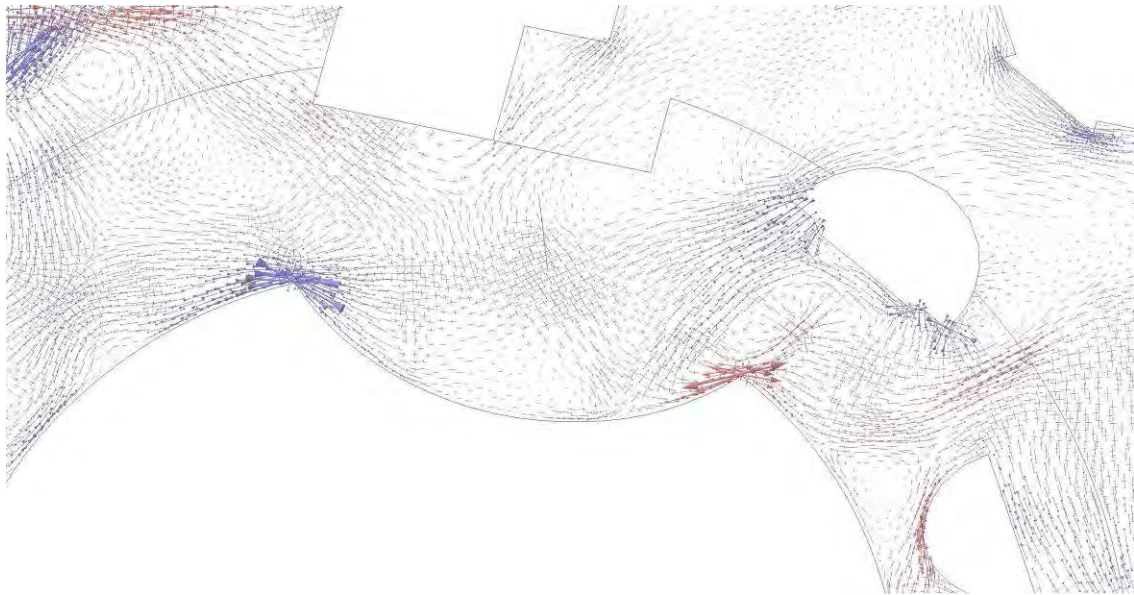
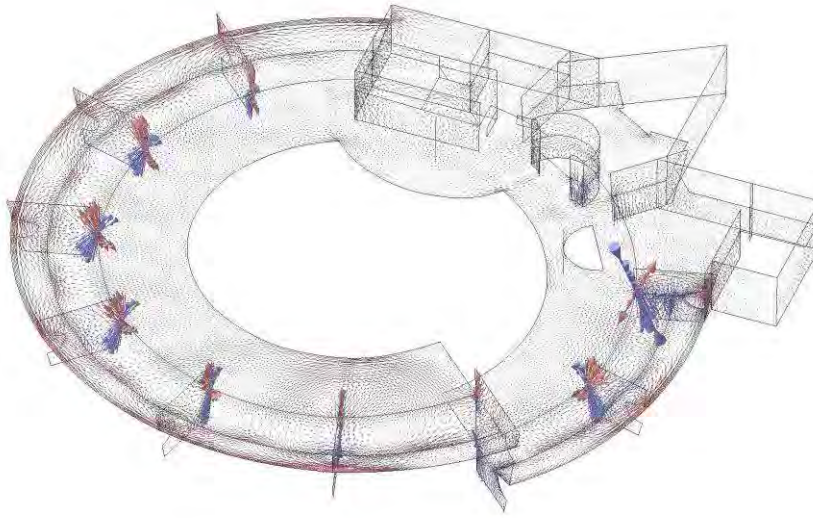
**Fig. 3.7.16** Deformaciones verticales. Del mismo modo que en la versión de 1952, las máximas deformaciones de la rampa se producen en el borde interior. En este caso, el valor de flecha instantánea máxima es de 1,5cm debido a la consideración de una sección radial de canto variable, de 39cm en el perímetro a 11cm de espesor en el borde interior. El valor máximo de deformación se produce en la zona opuesta al núcleo, que en la versión definitiva queda más extendido y complejo que en la versión de 1952 (Valores en m).



**Fig. 3.7.17** Momentos radiales, producidos por el efecto del voladizo hacia el interior, con una concentración máxima en el extremo interior de las pantallas de soporte perimetrales (Valores en N.m/m).



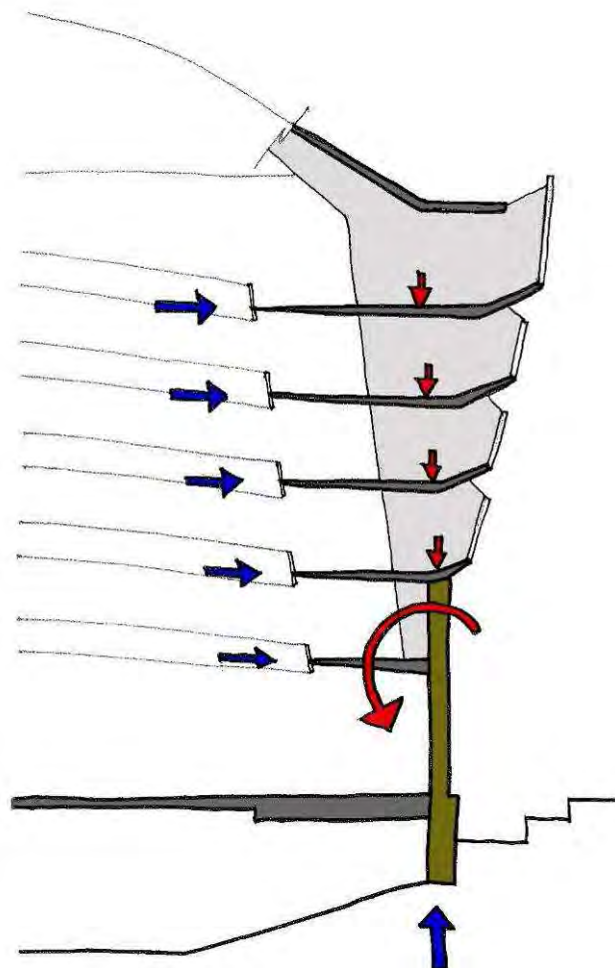
**Fig. 3.7.18** Momentos tangenciales, coincidiendo el punto de valor máximo negativo con el máximo radial, en el extremo interior de las pantallas. Polivka analizó de manera particular mediante fotoelasticidad el enlace entre la rampa y las pantallas en este punto (Valores en N.m/m).



**Fig. 3.7.19** Disposición de las líneas isostáticas, donde se aprecia que en el borde interior de la rampa se produce el mismo efecto de bielas de tracción y compresión que en los modelos de 1952 y anteriores, aunque en este caso de una forma muy tenue.

A nivel de sección, la estructura se basa en el soporte de la rampa sobre las pantallas radiales. Mediante el mecanismo de empotramiento descrito anteriormente [Fig 3.4.4], cada nivel se descarga en el soporte, acumulando éste, en su intersección con el cilindro de la base, tanto la suma total de acciones verticales como el momento de vuelco acumulado de todos los voladizos [acciones en rojo, Fig.3.7.20]). Dada la dificultad de materializar un empotramiento eficaz en este punto, la estabilidad del sistema se consigue gracias a la compensación con la sección simétrica, de manera que la base del cilindro acaba por asumir únicamente la reacción vertical [reacciones en azul, Fig. 3.7.20].

Este mecanismo, como se ha dicho anteriormente, tiene cierto paralelismo desde el punto de vista mecánico, con el sistema de columnas dendriformes del edificio administrativo de la Johnson o los soportes inclinados del Centro Cívico Point Park de Pittsburgh [Fig. 2.6.4].



**Fig. 3.7.20** En sección, cada nivel de la rampa se empotra en las pantallas radiales [gris] que nacen del cilindro de la base [marrón]. Esta unión, incapaz de asumir el momento de vuelco acumulado por los voladizos, se materializa como una articulación, siendo indispensable para la estabilidad del conjunto el efecto circular de la rampa, compensándose el desequilibrio de forma simétrica.





### 3.8 La cubrición del espacio central

La cubierta del espacio central, que forma el gran lucernario, se configura mediante doce vigas que convergen hacia el centro sin llegar a unirse. Las vigas de canto de hormigón, coinciden con la posición de los soportes inferiores, siendo éstas en realidad una transformación de cada una de las pantallas. Para evitar la confluencia de los doce ejes en un punto, Wright utilizó el recurso de agrupar las vigas de dos en dos mediante un arco, enfatizando así la similitud del conjunto a una cúpula, a la vez que utilizó el mismo recurso formal derivado de la colocación de las pantallas radiales [Fig. 3.8.4].

Esta solución, no obstante, no apareció hasta los últimos retoques del proyecto. En todas las versiones anteriores a 1956, la cubierta del espacio central se había basado en la utilización del tubo de pirex. La estructura de la cúpula se configuraba, desde la Modern Gallery en 1946, mediante un entramado de círculos de acero tangentes entre sí formando una superficie continua [Fig. 3.8.1] Esta estructura no representaba un problema estructural demasiado complejo ya que las dimensiones no sobrepasaban los 30m de diámetro. Sin embargo, el cerramiento mediante tubo de pirex, utilizado ya por Wright en el edificio administrativo y la torre de investigaciones de la Johnson Wax, suponía un coste demasiado elevado para la situación.<sup>184</sup>

De este modo Wright se vio obligado a proponer una cubierta más económica, resuelta mediante vidrios planos, habituales en el mercado de la construcción de los años cincuenta. Hay que decir que la obsesión de Wright por ciertas soluciones constructivas le llevó en ocasiones a sacrificar el correcto funcionamiento en favor de una imagen determinada. Este fue el caso de los lucernarios entre columnas fungiformes del edificio administrativo Johnson, donde hubo que reemplazar el tubo de pirex por vidrios planos al cabo de poco tiempo de su inauguración<sup>185</sup>. En esta ocasión la situación económica no le dio la oportunidad de materializar la gran cúpula con el peculiar material de tubo de vidrio, debiendo recurrir a otras soluciones constructivamente más económicas.

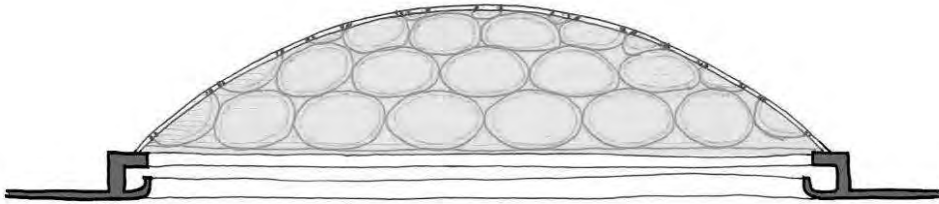
Sin embargo, la búsqueda de alternativas llevó a Wright hacia una solución posiblemente más integrada con el resto del edificio, donde la estructura principal, en su coronación, se plegó sobre sí misma para formalizar la entrada de luz superior. Antes de esta última propuesta, Wright había dibujado una cúpula formada por la continuación de las nervaduras de la estructura cada 30° formando casetones, con una disposición que recordaba al Panteón [Fig. 3.8.2]. A pesar de seguir la pauta de las pantallas, el aspecto resultaba ser demasiado rígido, por lo que fue desestimada.

---

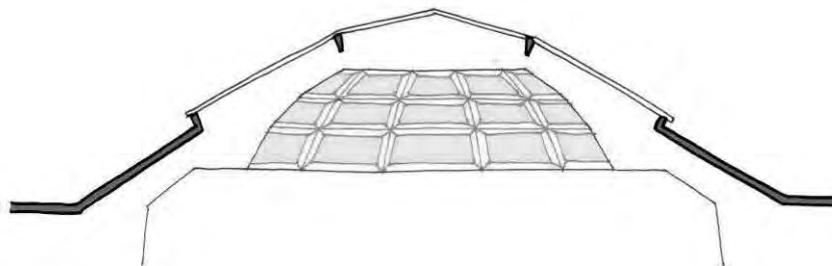
<sup>184</sup> CASTRO CHICOT, José Ramón. *Frank Lloyd Wright y el Guggenheim Museum*. Tesis doctoral. ETSAB. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona 2000, pág. 227.

<sup>185</sup> SACRISTE, Eduardo. *Frank Lloyd Wright, "Usonia"*. Ed. CP 67, Buenos Aires 1976

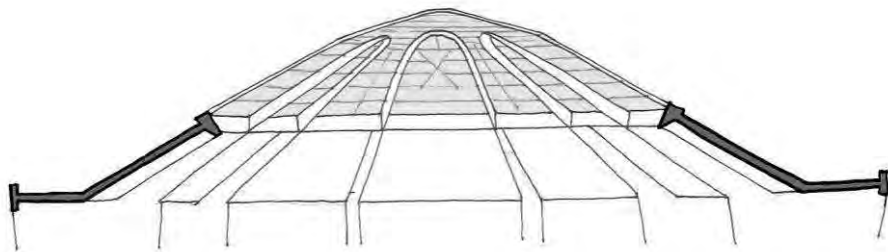
Anecdóticamente, la cubierta acristalada de la escalera helicoidal de los Museos Vaticanos, construida en 1932, tiene una configuración que recuerda en cierto modo al último planteamiento de Wright.



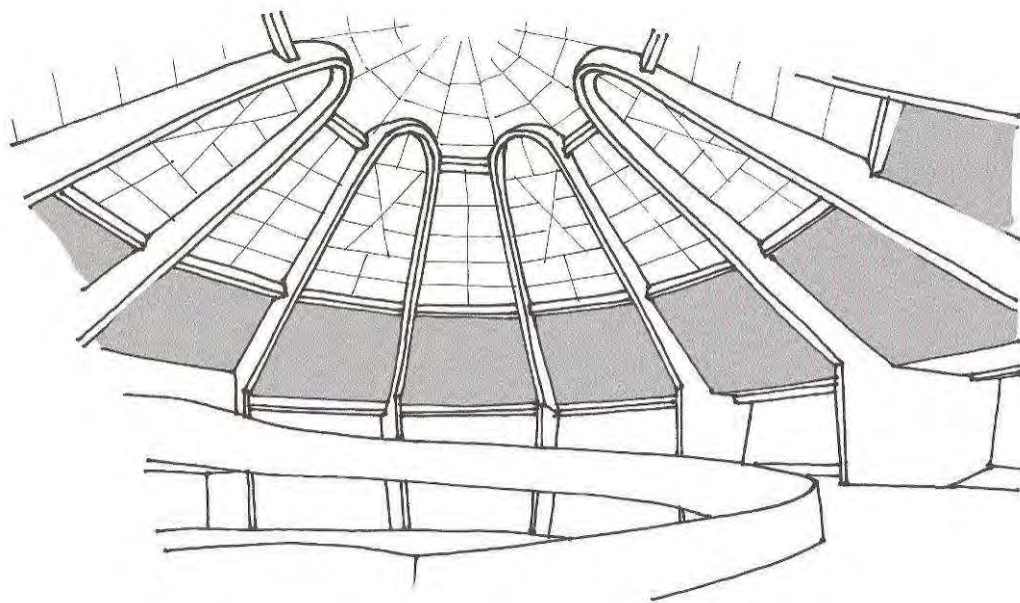
**Fig. 3.8.1** 1946 Propuesta para la Modern Gallery en 1946. Esta configuración del lucernario, a partir de una cúpula realizada mediante un entramado de círculos y tubos de pìrex, se mantuvo en la propuesta de 1952, cuando aparecieron en la planta las pantallas radiales de soporte.



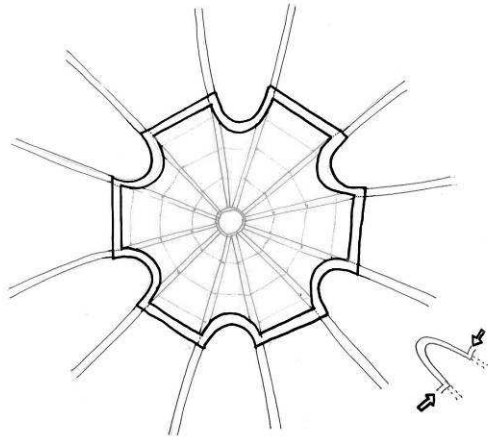
**Fig. 3.8.2** En septiembre de 1956, con el proyecto ya definido casi como el que posteriormente se construyó, el lucernario del espacio central reconoció el orden radial de las pantallas, formalizándose la cúpula como un sistema de nervios radiales y horizontales que recuerdan a la cúpula del Panteón. Se eliminó el tubo de pìrex como solución de cerramiento y se substituyó por piezas de vidrio plano.



**Fig. 3.8.3** En la versión definitiva, las nervaduras de la cúpula se fusionan con cada una de las pantallas, uniéndose dos a dos mediante un arco de  $30^\circ$  antes de su intersección en la clave.



**Fig. 3.8.4** En la visión interior desde la planta superior se aprecia la forma de transición entre las pantallas y las vigas del lucernario. Al no confluir todas las vigas en la clave, el equilibrio de la cúpula se resuelve a través del círculo de descarga, de forma análoga a la del funcionamiento global de la estructura.



**Fig. 3.8.5** En el “óculo” que forma la clave, al no ser un círculo continuo, se producen flexiones importantes en el tramo curvado, unión entre vigas.



**Fig. 3.8.6** El lucernario de la escalera helicoidal de los Museos Vaticanos recuerda en su forma al del Guggenheim. En este caso la geometría es un octógono en lugar del dodecágono de Wright. Desde el punto de vista mecánico, sin embargo, el funcionamiento es completamente diferente.

### 3.9 El proceso constructivo: barandilla y fachada gunitadas

Como se ha ido viendo hasta el momento, la complejidad del planteamiento estructural y su análisis precede a la dificultad del proceso de construcción. Polivka era consciente de ello desde el primer momento<sup>186</sup>, por lo que intentó contar con la opinión de la Compañía Corbetta, de New York, especialistas en la construcción de estructuras de hormigón. La opción de considerar como secundaria la función estructural de barandillas y fachada no eximía su ejecución, lo cual suponía un reto también a nivel constructivo. El hormigón resultaba ser el material estructural y de cerramiento más apropiado para los fines formales de Wright, pero la realización de estos elementos suponía un grado de complicación superior al habitual para las estructuras realizadas con este material.

Como figura en los planos de construcción de 1956, el espesor de las fachadas es de 5" [12,7cm] y el de la barandilla interior de tan solo 3" [7,62cm]. Estos espesores difícilmente pueden ejecutarse "in situ" mediante un sistema de doble encofrado que garantice una correcta ejecución. Espesores menores de entre 15cm y 20cm son ya problemáticos debido a la alta probabilidad de que aparezcan coqueras importantes. De este modo, un grueso de menos de 15cm, formando superficies poligonales de hasta 4,80m de altura en la parte superior, resultaba imposible de ejecutar correctamente mediante encofrados convencionales. Polivka pensó que la manera más apropiada de realizar estos elementos era utilizando la técnica del proyectado de hormigón contra una superficie rígida. En la casa Morris, cuyo proyecto desarrolló desde 1948, con un problema similar aunque a menor escala, Polivka propuso un sistema de gunitado sobre paneles rígidos aislantes, lo que, a diferencia de un cerramiento de hormigón convencional, permitía reducir el peso de la fachada y mejorar su comportamiento térmico, reduciendo así el coste total de ejecución:

*Creo que se puede conseguir un considerable ahorro utilizando paneles aislantes resistentes tipo "Sonotherm" como solución adecuada para gunitar, con la cual tengo la experiencia de un edificio en Berkeley. Utilicé el mismo sistema en mi garaje hace ya varios meses, donde he realizado también otros experimentos. La fotografía adjunta muestra la lámina que forma el techo de 16 pies [4,87m] de luz, para la cual el espesor se redujo a un mínimo de 1 ¼" [3,17cm] para demostrar hasta donde se puede llegar reduciendo considerablemente las cargas muertas. El peso total del techo (16' x 18' [4,87m x 5,48m]) es de sólo 4.500# [2.041Kg] en comparación con los 15.000# [6.805Kg, en el caso de ser una losa de 10cm de espesor] de una típica estructura de hormigón.<sup>187</sup>*

Este método constructivo, sin embargo, limita las posibilidades resistentes de los elementos ejecutados de esta forma. El reducido espesor, juntamente con las propiedades del compuesto entre el panel y el hormigón, minimizan su rigidez y por

---

<sup>186</sup> Carta de Polivka a Mr. Corbetta del 24 de noviembre de 1946. Apartado 3.3.

<sup>187</sup> Polivka Papers. Folder 1.04\_38. Fragmento de la carta de Polivka a Wright a propósito de la Casa Morris.

tanto su papel dentro del funcionamiento global del conjunto. En un edificio doméstico como era la casa Morris, este aspecto podía no ser de crucial importancia, debido a las dimensiones totales de la estructura. Pero en la estructura del museo, al ser las dimensiones de los elementos mucho mayores era necesario utilizar un sistema alternativo que garantizase su correcta ejecución. Por otro lado, se planteaba la cuestión de la unión de los elementos gunitados con el resto de la estructura encofrada y vertida de manera convencional. En el caso de la fachada, esta es una prolongación hacia el exterior de la losa de la rampa y por tanto podría resultar relativamente sencillo dar continuidad a la armadura y al hormigonado. Por otro lado la fachada quedaba unida a la estructura en la cara exterior de cada una de las pantallas de soporte. Sin embargo, en la barandilla interior, la unión con el borde de la losa se realizó puntualmente mediante conectores de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro, ejecutándose a posteriori como un elemento de acabado.

De la observación de las fotografías y del detalle de los planos constructivos se deduce que el gunitado, en lugar de realizarse contra un sistema de paneles, se realizó desde el interior del edificio contra un encofrado en la parte exterior. Este encofrado, por cuestiones de facilidad constructiva, se dispuso de forma poligonal, cada  $10^\circ$  y posteriormente, con el hormigón ya endurecido, se limaron las aristas para simular una curva continua. Para la construcción de la barandilla también se utilizó el mismo método, gunitando desde el interior del atrio contra un encofrado a modo de paramento. Hay que recordar que las 3" de espesor [7,62cm] difícilmente podrían haberse hormigonado con garantías mediante un sistema doble de encofrado.

Wright consiguió así una integración total entre elementos constructivos a través de la utilización del hormigón, tuviesen o no una función resistente, haciendo difícil trazar una línea de separación entre estructura, cerramientos y arquitectura.



**Fig. 3.9.1** Ejecución de la losa del techo del sótano, que finalmente se realizó plana y no en forma abovedada como había insinuado Wright en las versiones anteriores. La disposición radial de la armadura indica una lógica de aparente simetría radial de la estructura.



**Fig. 3.9.2** En detalle, puede observarse una concentración del armado en la zona del centro de la circunferencia, en este caso en la cara inferior de la losa. Hay que señalar que la luz entre apoyos en este punto es de más de 18,5m, diámetro de la circunferencia que recoge los seis pilares del sótano, de los cuales puede verse el armado en primer plano.





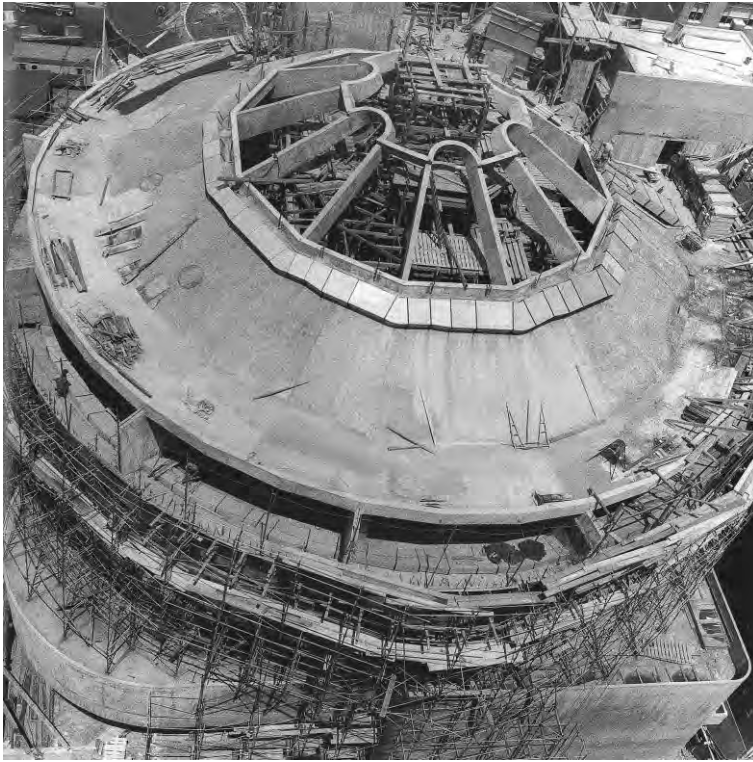
**Fig. 3.9.3.** El muro que forma el cilindro de la planta baja y primera nace de los pilares del sótano que delimitan la sala de actos. De este modo, el muro también tiene la función de una gran viga pared entre pilares, permitiendo la entrada de luz a la planta sótano a través de un patio inglés lateral. La intersección entre los pilares y el cilindro puede considerarse como una región “D” puesto que el gradiente de tensiones es muy alto alrededor del apoyo.



**Fig. 3.9.4**

En las plantas tipo, el mecanismo de soporte de la espiral responde al patrón expuesto en los apartados anteriores, empotrado en el perímetro a través del sistema de pantallas radiales, cuya dimensión aumenta con la altura para formar planos trapezoidales en alzado.

Como se observa, la ejecución de fachadas y barandillas no fue simultánea a la losa de la rampa, lo que demuestra su función estructural secundaria.

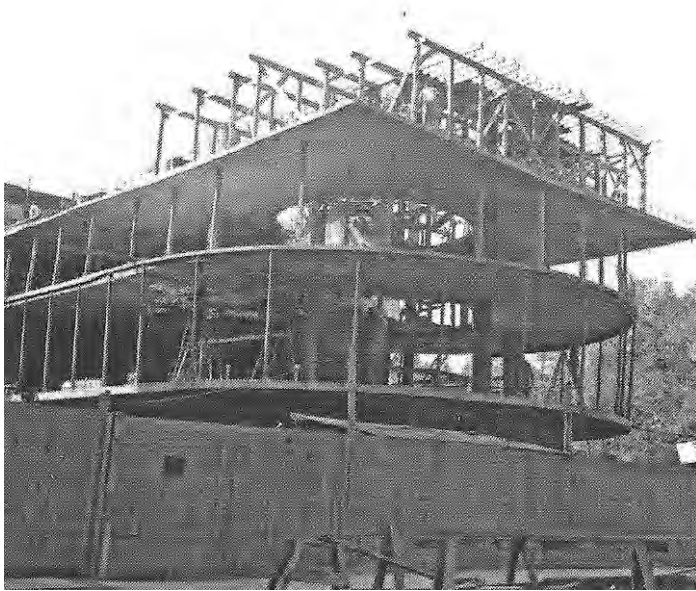


**Fig. 3.9.5-6** El gran lucernario, cubierta del espacio central, se configuró a partir de la transformación de las pantallas perimetrales en jácenas de canto que confluían en el centro. La peculiaridad es que, antes de interseccionar en el centro, se agrupan dos a dos, mediante un arco, configurando un óculo central en la singular bóveda.





**Fig. 3.9.7** El edificio monitor es, conceptualmente, una réplica a menor escala del edificio principal, donde las plantas en voladizo se sustentan en cinco pilares y el núcleo, en ambos casos con forma lenticular.

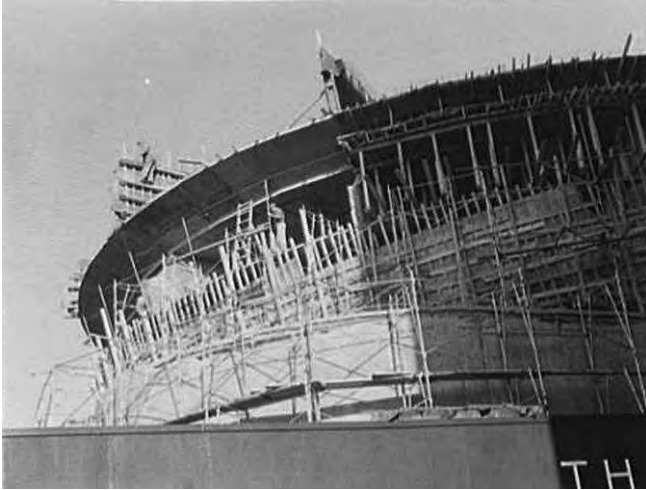


**Fig. 3.9.8** El mecanismo de apoyo de los voladizos en el edificio monitor es semejante al de la rampa principal, con la diferencia que los soportes, en este caso, en lugar de situarse en el perímetro exterior se ubican en el interior (Caso 3 del método expuesto en la Fig. 3.4.8).

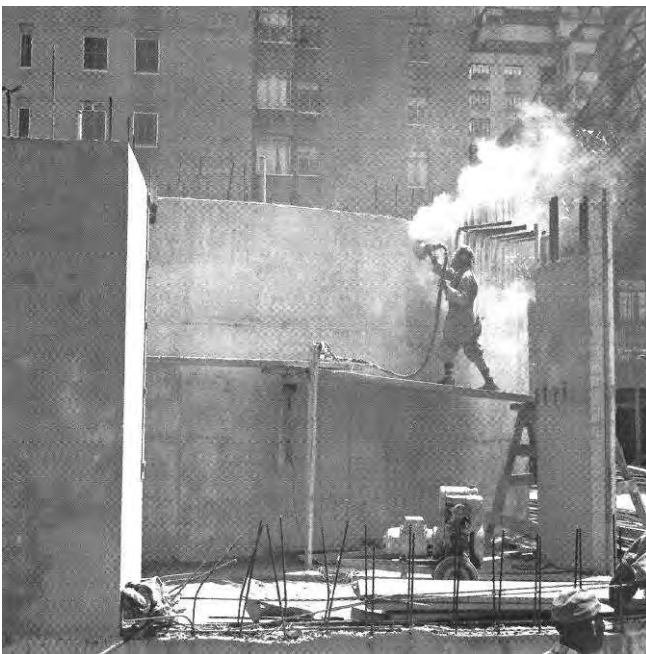
La longitud de los voladizos es de 2,5m, acentuándose en las esquinas de la planta cuadrada hasta 5,7m en la diagonal del cuadrado.



**Fig. 3.9.9** Las fachadas de hormigón gunitado se fueron ejecutando a posteriori que los forjados. La necesidad de fijar el encofrado inclinado sobre el que se proyecta el hormigón, obligó a este desfase en el orden de ejecución de elementos.



**Fig. 3.9.10** La ejecución de las fachadas se realizó mediante la proyección de hormigón sobre un encofrado inclinado. De esta manera, únicamente se encofró la cara exterior, de forma poligonal cada 10°, sobre la que se gunitaba desde el interior.



**Fig. 3.9.11** Una vez desencofrado, se pulieron las aristas de la superficie poligonal para dar continuidad a la superficie, formando una curva continua.



**Fig. 3.9.12** El acabado final de los muros (planta sótano en la foto) y de las fachadas fue el de una superficie continua, acorde con el planteamiento unitario de Wright.



# IV

## Conclusiones

---



#### **4.1 Análisis de la estructura del museo en relación a su arquitectura**

A lo largo del recorrido realizado, desde la función formal de la estructura en la arquitectura en general hasta el caso particular de la estructura del Guggenheim Museum, se ha puesto de manifiesto que cuestiones que a priori parecen de carácter exclusivamente técnico pueden llegar a tener una repercusión formal de tanta importancia como para condicionar desde el punto de vista arquitectónico el resultado final, de forma muy significativa.

La utilización del hormigón en la construcción del museo, cuestión que como hemos visto estuvo durante un tiempo en crisis, está de acuerdo con los planteamientos generales de la arquitectura de Wright. Por otro lado, como se ha expuesto, las posibilidades formales de este material también están íntimamente vinculadas a los métodos de análisis utilizados. Cuanto más compleja es la geometría del elemento estructural, más sofisticada debe ser la forma de abordar su estudio. Actualmente el método de análisis mediante elementos finitos y sus aplicaciones computacionales permite afrontar de manera directa, sin demasiadas simplificaciones, todo tipo de problemas, tengan o no una cierta lógica estructural. Esta cuestión se ve reflejada en la arquitectura actual donde en ocasiones se abusa de la capacidad casi ilimitada de abordar cualquier tipo de problema, sacrificando la lógica estructural y de los materiales para poder favorecer una imagen predeterminada. Sin embargo, antes de que los ordenadores permitiesen implementar de forma operativa la teoría de elementos finitos, la resolución de los problemas de diferentes superficies necesariamente pasaba por la aplicación manual de la teoría de láminas y placas, desarrollada principalmente por Timoshenko y otros, para lo cual resultaba imprescindible ajustar el problema a unos patrones de forma, condiciones de contorno y situaciones de carga determinadas. En el caso de la estructura del Guggenheim, su evolución manifiesta una clara determinación formal y arquitectónica del edificio a través de su estructura. Desde los primeros planteamientos, alejados de la solución de rampa continua, pero muy próximos a la solución estructural final, se ha puesto de manifiesto que la transformación, motivada por los requerimientos programáticos o los conflictos entre Wright y la Fundación, se ha ido guiando a través de los elementos de su estructura. Al igual que en muchos otros edificios de Wright, en este caso la estructura ha sido el catalizador del gran logro de su arquitectura.

De los análisis realizados mediante diferentes modelos simplificados de discos, cerrados, abiertos o formando espirales, se pueden extraer conclusiones interesantes aplicables a la estructura definitiva. Durante la gestación del proyecto, se siguió el mismo proceso de verificación. Polivka necesariamente, debía “simplificar” sus modelos numéricos de manera que éstos fuesen abordables. Pero, desde los diferentes casos teóricos hasta la realidad del Guggenheim, el proceso de simplificación resultaba ser tan profundo que requería la realización de ciertas pruebas que corroborasen la idoneidad del método. Con esta intención Polivka realizó varias maquetas que se analizaron en laboratorio con dos objetivos:

- Confirmar que la teoría de placas, en concreto la de un disco plano, aplicada a la espiral de una planta independiente, era factible.



- Estudiar en detalle, mediante modelos fotoelásticos, los puntos con gradientes tensionales acusados.

Las conclusiones de los primeros ensayos fueron que la teoría de placas era aplicable al caso particular de las rampas del Guggenheim. Polivka realizó numerosas mediciones de deformaciones de un tramo de la rampa para compararlo con los resultados obtenidos analíticamente mediante la aplicación de la formulación disponible. En los modelos presentados en esta tesis se pone de manifiesto las siguientes cuestiones:

- Las plantas pueden estudiarse de manera independiente ya que no hay efecto favorable o penalizador por el hecho de superponer varias plantas. Para el análisis es indiferente el número de plantas.
- El hecho de que el anillo sea abierto (tridimensional) en lugar de plano resulta ser un efecto favorable respecto al disco plano, por lo que la aplicación de la formulación de la teoría de láminas añade un grado de seguridad extra a la estructura.
- Respecto a la referencia de una losa en voladizo sin curvatura en planta, el momento de empotramiento en el borde exterior disminuye proporcionalmente a la reducción del diámetro total. Cuanto menor es el diámetro exterior mejor es el comportamiento del conjunto debido a la contribución de la rigidez en sentido tangencial.

La voluntad de Polivka era la de encontrar un método genérico que le permitiese realizar aproximaciones a diferentes situaciones geométricas, utilizando como variables principales los dos diámetros, interior y exterior. Este método genérico resulta ser el expuesto por Timoshenko en su teoría de placas, tal como se muestra en el apartado 3.4.1, que tuvo que retocar para adaptarlo al módulo de elasticidad del hormigón. Polivka siempre pensó en una estructura formada por discos abiertos (cada nivel de la rampa), empotrados en su perímetro exterior y no en voladizo a partir del núcleo, como se podría interpretar de las primeras propuestas, ni como un gran resorte. Esto se puede afirmar en base a sus escritos, donde le explicó a Wright que había encontrado un método genérico que le permitía abordar el problema para cualquier dimensión de la planta.

La materialización del empotramiento en el perímetro exterior de la rampa se formalizó mediante la sucesión de unas pantallas dispuestas radialmente cada 30°. El voladizo de la rampa hacia el interior es siempre de la misma dimensión. Sin embargo, hacia el exterior el ancho de la rampa va aumentando en sentido ascendente. Esto se traduce en que la longitud de las pantallas radiales es mayor en los niveles superiores, formando una geometría trapezoidal en alzado. De hecho, estos soportes trapezoidales arrancan del nivel de la planta primera, de manera que de este punto hacia abajo la envolvente del edificio es un cilindro. Es difícil materializar un empotramiento en la unión entre el cilindro de la base y las pantallas por lo que resulta ser una articulación. Esta situación de aparente inestabilidad consigue ser eficaz gracias al comportamiento global de la estructura, donde, a través de la rampa unas pantallas se equilibran con las opuestas, siguiendo el mismo concepto de estabilidad de las columnas del edificio Johnson. Esta es la forma mediante la cual, Wright se aproxima al concepto de “tenuity” y de

integración total entre elementos, reforzado por la estructura del lucernario central que termina de unificar los diferentes elementos estructurales con el espacio interior.

En el modelo de la versión definitiva de la estructura se han incorporado los pormenores que particularizan los casos simples anteriores. En la zona del núcleo, debido a una pérdida de continuidad hacia el interior del voladizo por la ubicación de los huecos, fue necesaria la colocación de dos potentes pilares con una repercusión formal considerable dentro del espacio interior. El efecto de empotramiento perimetral mediante las pantallas radiales se desvirtúa en la zona del núcleo, haciendo necesaria la aparición de los pilares. De estos dos pilares, de los cuales Polivka hablaba en sus escritos ya desde un principio, el que quedó finalmente frente al núcleo soportando el balcón hacia el interior, es el de mayor importancia resistente. El otro pilar parece ser heredado de las opciones estructurales anteriores [Figs. 3.2.5-6] cuando el eje del balcón interior coincidía con el del núcleo. En la versión de 1956, el eje del balcón y el del núcleo se desplazaron 30°, dejando como una cuestión exclusivamente formal el mantenimiento de este segundo pilar.

En la secuencia de propuestas desde 1943 hasta la definitiva, el interés principal es el de mostrar la continuidad de la voluntad arquitectónica de Wright. En la primera versión de plantas planas hexagonales, a pesar de ser radicalmente diferente a las posteriores, se insinuaba de forma explícita cual sería el sistema estructural definitivo, mediante soportes dispuestos de forma radial, dejando el borde interior libre de soportes. Desde esta versión hasta la incorporación de Polivka al proyecto, no aparecieron soportes en ninguna de las propuestas, por lo menos a nivel de planta tipo. La voluntad de continuidad del espacio interior chocaba contra la necesidad de colocar algún tipo de soporte. En la maqueta de la Modern Gallery presentada en 1946 aparecen pequeños pilares [Fig. 3.2.8] (seguramente porque la propia maqueta los requería), cuestión que puso a Wright en contra de sus colaboradores estructurales y propició sus declaraciones a propósito de la capacidad de los ingenieros en general. Unos soportes cerca del borde interior van en contra de la idea de continuidad de Wright, pero hasta ese momento ni Wes Peters ni Mendel Glickman habían encontrado la forma de resolverlo. Polivka cautivó a Wright a partir de este punto y desde 1946 apostó por una concepción de la estructura acorde con las intenciones del arquitecto, más en línea de concebir toda la rampa como una gran lámina en espiral. Hacia 1947-48 Polivka ya estaba trabajando en una solución al problema, que fue describiendo en la correspondencia mantenida con Wright. Sin embargo, los planos de la propuesta de ese momento no reflejaban todavía los doce soportes perimetrales. ¿Acaso Wright no acababa de descartar la posibilidad de eliminar cualquier tipo de soporte?. El análisis de la opción del disco como un gran voladizo empotrado en el núcleo demuestra la inviabilidad de esta opción y Polivka, que es coherente en todas sus descripciones y análisis desde el principio, finalmente consiguió que la propuesta de 1952 reflejase un planteamiento estructural posible, que conceptualmente pasaba de la concha (shell) al nautilo (lamina rigidizada).

La realización constructiva y estructural de todos estos planteamientos, se ha podido comprobar que, en realidad, es bastante más sencilla que lo que históricamente se

ha considerado. En el edificio del Guggenheim Museum su estructura se ha simplificado hasta llegar al esquema de un anillo empotrado en su perímetro exterior, en voladizo hacia el interior. Al igual que en el caso de la Casa de la Cascada, donde se también se ha sobrevalorado la función resistente de las barandillas, la incógnita que se ha mantenido es si la fachada en el perímetro exterior y la barandilla interior contribuyen sustancialmente a la rigidez de la estructura. En el caso de la barandilla del borde interior, el hecho de ser de hormigón inevitablemente aumenta la rigidez de la estructura en este punto, aunque como se ha podido corroborar, su aportación no es relevante dado que predomina mucho más el vuelo que el efecto “tijera” de la barandilla. En cuanto a la fachada, puesto que su altura y espesor es mayor que el de la barandilla pudiendo actuar como una viga de gran canto, produce un efecto de rigidización importante en el perímetro exterior aunque de cara al comportamiento global de la lámina tampoco es relevante. Un aumento en la rigidez tangencial del borde exterior no supone una mejoría sustancial en el comportamiento del voladizo interior. Por otro lado, la discontinuidad de la fachada para configurar el lucernario le impide en cualquier caso ser un apoyo eficaz en el borde externo.

Las imágenes del proceso constructivo reflejan estas conclusiones sobre la contribución de barandilla y fachada. La rampa se ejecutó de forma independiente a los otros dos elementos, considerados más como acabados que como estructura, aunque se construyesen con el mismo material. Nuevamente, la diferenciación entre estructura y cerramientos ha quedado difusa, resultando este planteamiento coherente con todos los proyectos anteriores de Wright.

La solución definitiva para la cubierta acristalada del espacio principal consigue encajar con todo el discurso expuesto. La estructura del lucernario culmina la estructura dando continuidad a las pantallas de soporte, que se pliegan sobre sí mismas. De entre todas las soluciones planteadas, a pesar de que esta surgió por una necesidad económica, no sólo resolvió eficazmente el problema económico sino que dio una solución formal completamente integrada con el resto de la estructura.

Para el edificio anexo, monitor, se adoptó una solución estructural que conceptualmente tiene mucho que ver con la de la rampa principal. El disco del espacio principal, empotrado en su perímetro (casos 9 y 10), se transformó en un disco apoyado sobre un soporte central, como los forjados de la torre de investigaciones de la Johnson Wax (casos 3 y 8). En esta ocasión, en lugar de materializarse mediante un núcleo cilíndrico, la formalización se realizó a través de seis pilares de forma lenticular, dispuestos cada 60°. Estos pilares se maclan en el sótano con un soporte cilíndrico único, de la misma manera que las pantallas trapezoidales nacen del cilindro base del edificio principal. Se utilizó así el mismo recurso formal y estructural para ambas partes del Museo.

Tal como predijo Wright – *pasarán más de cien años y ellos aún la examinarán y representarán* – el tiempo ha demostrado que el Guggenheim Museum ha sido estudiado desde diversos puntos de vista y que, en cualquier caso, las diferentes aproximaciones pasan necesariamente por la contextualización de esta obra dentro del conjunto de edificios proyectados o construidos por Wright. Los principios de la arquitectura de Wright se han ido gestando a lo largo del conjunto de su obra y,

como se ha demostrado, en su mayoría están íntimamente ligados a los planteamientos de la estructura en cada caso. La estructura en sus edificios adopta desde el principio una función que va más allá de la simple función de soporte. Desde la manifestación del material estructural, tanto acero como hormigón o madera, hasta la generación de los espacios a partir de las diversas tipologías estructurales aplicadas, puede afirmarse que todos los proyectos tienen como denominador común el hecho de que la estructura es un elemento fundamental en sus edificios, integrado e indisoluble del resto de cuestiones arquitectónicas.

Como muestra de ello, se ha intentado diseccionar a lo largo del trabajo la mayor parte de la obra de Wright, agrupando sus obras bajo un criterio predominantemente estructural, tanto atendiendo a criterios tipológicos como del uso de materiales. Esta clasificación se resume de la siguiente manera:

- El voladizo es el denominador común al resto de propuestas, tanto en edificios desarrollados en vertical como horizontal. Es el mecanismo estructural a través del cual se consigue la conexión del interior con el entorno, la proyección del espacio hacia el exterior. En las casas de la pradera la resolución es rudimentaria, pero efectiva y contundente para la intención. Con la evolución de la arquitectura, en edificios de más envergadura, el sistema constructivo también evolucionó y se sofisticó, aproximándose en coherencia al planteamiento unitario de su arquitectura, habitualmente a través del hormigón.
- Estructuras generadas a partir de la repetición de un patrón, a menudo un patrón de voladizo. Las columnas dendriformes resultan ser un voladizo en todas direcciones, con un único soporte central, donde el espacio se genera a partir de la repetición de la unidad básica estructural. Los diferentes mecanismos utilizados para la estabilidad del conjunto se manifiestan también en el espacio interior.
- La evolución de la torre como tipología estructural: Las propuestas de torres realizadas por Wright manifiestan de manera particular la evolución de su arquitectura. Así como en los edificios a pequeña escala pronto consiguió desmarcarse de los planteamientos de la Escuela de Chicago, en los edificios en altura, con una clara importancia de la componente estructural, le resultó más difícil. Es justamente a través de la estructura donde consiguió “liberarse” y encontró la coherencia mediante la combinación del voladizo de hormigón junto con un potente núcleo.
- La disposición de edificios en espiral, aunque no es uno de los grupos con mayor número de ejemplos, contiene una serie de hitos a lo largo de la obra que, fundamentalmente porque culmina con el edificio del museo, merece una mención aparte. Inicialmente la rampa era una cuestión eminentemente práctica, que permitía la accesibilidad al automóvil, elemento que forma parte de la idiosincrasia americana. Desde el punto de vista formal y constructivo, se resolvió de una manera práctica, apoyándose como elemento secundario sobre una gran cúpula. En las propuestas posteriores la rampa comenzó a adquirir autonomía

constructiva y estructural, en coherencia con su uso, pasando a ser la estructura del edificio y el motivo principal.

En cuanto a la utilización de los materiales estructurales básicos, la división está clara entre la utilización del acero y del hormigón:

- La utilización del hormigón armado como material estructural ha permitido a Wright la integración de los diferentes elementos de su arquitectura. Desde una primera propuesta a finales del siglo XIX hasta la construcción del Guggenheim, el hormigón ha ido asumiendo cada vez de manera más clara un papel tanto estructural como formal. Las dos líneas de utilización se basan, por un lado en sus posibilidades de industrialización y por otro en la capacidad de integrar función estructural con diferentes formas y acabados. Para Wright, este material poseía la característica básica de su arquitectura orgánica.
- La utilización del acero siguió inicialmente de forma rutinaria las tipologías habituales en los edificios de comienzos del siglo XX, próximas al entramado. Sin embargo Wright en su búsqueda de la identidad propia de cada material, encontró en el acero una de las cualidades estructurales que más valoraba, el concepto "*tenuity*", cuyo significado tiene que ver con la ductilidad mecánica del material y su capacidad para trabajar a tracción. Si Wright hubiese vivido algunos años más, posiblemente sus obras se habrían decantado hacia nuevos planteamientos basados en este concepto. Ejemplos de esa tendencia son la Torre de la Milla o el Pabellón Belmont Racetrack.

El edificio del Guggenheim contiene todos los tipos anteriores. El tema del voladizo se manifiesta de forma continua a lo largo de todo el desarrollo de la rampa. En este caso el voladizo no intenta proyectarse hacia el exterior como una prolongación del espacio interior hacia el entorno natural, sino que por la ubicación urbana del edificio Wright se decantó por la inversión de este recurso hacia el espacio interior. Por ese motivo, cualquier tipo de soporte en el borde interior de la rampa hubiese ido totalmente en contra del planteamiento de Wright.

La generación del espacio mediante el mecanismo de repetición de un módulo se expresa también en el Guggenheim a nivel de los elementos estructurales con una aparente simetría radial. En cuanto a pavimentos y otros elementos constructivos, Wright recuperó la pauta de modulación ortogonal en lugar de radial.

La sala principal del museo es el mejor ejemplo de planteamiento en espiral, llegando a ser aquí la rampa tanto un elemento funcional, de recorrido como de expresión formal y estructural. Todo esto queda unificado mediante el denominador común del hormigón, tanto para la propia estructura como para fachadas, barandillas y otros elementos constructivos, de manera que se le otorgó al conjunto la unidad indisoluble que Wright deseaba. Como opinión particular del autor, se considera una fortuna que la opción de estructura mediante entramado de acero no llegase a progresar, cuestión que se estima en parte meritoria a Polivka.

## 4.2 Las aportaciones de Jaroslav J. Polivka

Es evidente que el Guggenheim tal y como lo conocemos ahora es deudor de las aportaciones de Polivka, no sólo en el sentido práctico de resolver los pormenores de su estructura, sino fundamentalmente por el planteamiento de la misma y lo que ésta representa en el conjunto del edificio. Así como es difícil separar en la arquitectura de Wright la estructura del global del edificio, las aportaciones realizadas por Polivka también se difuminan en cierto modo dentro de todo el proceso de trabajo de Wright. Es importante hacer hincapié en el carácter fuertemente dominante de Wright, que en ocasiones podía eclipsar a sus colaboradores. Polivka era consciente de este hecho y durante los últimos años de su vida reivindicó su aportación, aunque sin demasiado éxito, frente a la crítica arquitectónica del momento.

Desde el primer contacto entre ambos a propósito del museo, Polivka se desmarcó de la práctica habitual de los ingenieros de estructuras, basada en la aplicación de sistemas entramados de pilares y vigas siendo conocedor de las posibilidades laminares del hormigón. Esa visión diferente de la estructura es lo que despertó en Wright el interés por trabajar con él. El proyecto del museo se basaba en un planteamiento estructural de continuidad espacial donde los sistemas de entramado, más tradicionales, no se ajustaban a los requerimientos formales de Wright. Polivka era conocedor de la naturaleza del hormigón armado y pretensado como material con posibilidades mucho más amplias que la estrictamente para formar retículas. Wright había ido demostrando durante diferentes obras, desde la construcción del Templo Unitario en 1910, su interés por el material y su capacidad por concretar sus aspiraciones arquitectónicas. Pero el proyecto del museo tal como se planteaba en 1946 excedía las posibilidades conocidas hasta el momento y sobre todo la capacidad de la mayor parte de los ingenieros de estructuras para abordar un problema de esas dimensiones.

En una de las primeras respuestas de Polivka sobre la estructura de la rampa, éste propuso un dimensionamiento concreto, una lámina de seis pulgadas de espesor para resolver la rampa en espiral, a falta de una verificación de este espesor mediante la realización de los ensayos con maquetas. Esta es una visión directa del resultado final, al margen de las particularidades de las versiones intermedias, se mantuvo hasta la construcción y permitió que la imagen sin soportes interiores que Wright deseaba se pudiese llevar a cabo.

La mayor parte de las aportaciones que Polivka realizó a la arquitectura de Wright se concentran en soluciones con estructura de hormigón. La torre de investigaciones del edificio Johnson es, junto con el Guggenheim, uno de los dos únicos ejemplos construidos. La estructura de la torre forma parte de la tipología de edificios en altura, pero como hemos visto, la concepción de la misma estaba íntimamente ligada a la del museo, a través del voladizo. En las otras colaboraciones, especialmente en el Rogers Lacy Hotel y la casa Morris, el tema del voladizo resultó ser fundamental, y se resolvió mediante una estructura de hormigón fuera de los límites convencionales, por lo que Wright requirió del soporte de Polivka. El puente Butterfly, aunque no se trataba de una estructura propiamente en voladizo (por lo menos en sentido longitudinal, no así en el

transversal), sin embargo se basó en la aplicación de las características del hormigón para la construcción de puentes, donde Polivka tenía una amplia experiencia. Los casos del Belmont Racetrack Pavilion o de la torre de la Milla, implicaron la utilización de sistemas atirantados de cables, más allá de los límites propios del hormigón.

La cuestión es que Wright requería de las herramientas para que sus intenciones pudiesen materializarse en las propuestas de mayor envergadura y, en ese sentido, Polivka resultó ser el apoyo necesario, principalmente al potenciar los valores de su arquitectura a través de la estructura y sus materiales.

Esta visión resulta común a otras figuras de la época, como Eduardo Torroja, con quien Wright tuvo contacto a través de Polivka. Los edificios proyectados por Torroja resultaban tener como punto en común con muchas de las propuestas de Wright donde la caracterización de la arquitectura se realizaba a través de la estructura. Polivka además realizó una difusión de la obra y pensamiento de Torroja en Estados Unidos, traduciendo el texto “Razón y ser de los tipos estructurales”.

*Mí distinguido amigo: gracias por el interés que se ha tomado en la edición de mi libro, el título del cual bien podría ser “The Philosophy of Structural Design”<sup>188</sup>. La idea del libro es llamar la atención de ingenieros y arquitectos sobre la importancia de elegir cuidadosamente el tipo de estructura a adoptar antes de tomar la decisión del diseño particular y, también, comentar varios aspectos del tema de manera fácilmente inteligible. No tengo ningún deseo de ir a argumentos matemáticos ni a problemas de cálculo, pero trato de hacer que el lector aprecie intuitivamente el fenómeno tensional y el problema de los esfuerzos en edificios como un aspecto integral de diseño. También intento indicar cómo la naturaleza de los materiales influencia el tipo de estructura, el método de construcción, etc... He redactado ya la mitad del libro, pero estoy demasiado ocupado y no sé cuándo podré acabarlo...<sup>189</sup>*

Esta carta de Torroja dirigida a Polivka en 1950 pone de manifiesto el interés de éste por la obra del ingeniero español. La idea de integrar en el diseño del edificio el comportamiento de su estructura y sus materiales era común tanto a Torroja como a Polivka y Wright. El edificio debía reconocer el carácter y planteamiento de su estructura y, a su vez, ésta debía servir a la arquitectura caracterizándola en la proporción que la misma requiera.

Es destacable que Torroja sugiriese la redacción de un texto sobre estructuras sin el soporte de argumentos matemáticos, sino exclusivamente de carácter conceptual. Este aspecto, como se ha expuesto en todo el texto, evidencia la necesidad de valorar también este tipo de cuestiones, al margen del detalle de resolución matemática de los diferentes tipos de análisis. En este sentido, Torroja enfatizó las cuestiones cualitativas de la estructura, aparte de la necesidad de cuantificar esfuerzos y tensiones, lo cual no se pone en duda.

---

<sup>188</sup> “La filosofía del diseño estructural” finalmente publicado en Estados Unidos como “*Philosophy of Structures*”, University of California Press, Los Angeles, 1958. En España se publicó en 1956 con el título de “*Razón y ser de los tipos estructurales*”

<sup>189</sup> Polivka Papers. Folder 1.07 “*What is like to work with Wright*”

En conclusión, la extensa correspondencia entre Wright y Polivka demuestra que hubo una estrecha colaboración entre ambos. La contribución del ingeniero a la obra de Wright merecía una consideración especial, cuestión que Polivka persiguió hasta su muerte sin demasiado éxito. En su etapa europea había demostrado su talento abordando la resolución de problemas fuertemente vinculados a los aspectos formales de la estructura, pero respecto a su etapa colaborando con Wright, éste nunca hizo reconocimiento público de sus colaboradores e incluso en trabajos como el de Butterfly Wings Bridge, atribuible en gran parte a la contribución de Polivka, Wright se preocupó por promocionarlo como propio. Esta situación, salvo raras ocasiones (como en los casos de Freyssinet, Maillart, Nervi o Torroja, por ejemplo), ha sido habitual en la arquitectura.





### 4.3 Líneas de continuidad

El desarrollo de este trabajo abre nuevos caminos de investigación relacionados con la arquitectura de Wright. Como se ha comentado, a pesar de la gran importancia de su obra dentro de la arquitectura actual, gran parte del material original de sus proyectos no ha sido publicado todavía. La última exposición retrospectiva sobre Wright mostró parte de este material todavía inédito y ha dado pie a que se amplíen los numerosos trabajos sobre su arquitectura desde nuevos puntos de vista, como puede ser el urbanístico. No obstante, otras fuentes como son los documentos de Polivka en la Universidad de Buffalo, cuenta con un numeroso material original que permite aproximarse a la obra de Wright desde nuevos puntos de vista. Es el caso del presente trabajo de investigación, donde se ha utilizado una parte de estos documentos, especialmente los relacionados con el proyecto y construcción del Guggenheim Museum. Sin embargo, existen textos no investigados a fondo, relacionados con otros proyectos fruto de la colaboración entre Wright y Polivka. Es el caso del Butterfly Wings Bridge, cuya promoción parece que fue debida al empeño de Polivka en trabajar junto a Wright en un proyecto así. Polivka, entre otras actividades relacionadas con la ingeniería y la investigación en el campo de las estructuras de hormigón, era un reconocido proyectista de puentes, utilizando el hormigón como material principal. Su especial sensibilidad por las cuestiones formales de las estructuras le hizo pensar que una colaboración entre él y Wright para proyectar un puente de hormigón al sur de la Bahía de San Francisco pensando que podría resultar una empresa de éxito. Polivka provocó activamente el interés de Wright hacia esta propuesta y se encargó de promocionarlo con las autoridades responsables de la construcción de la infraestructura. Los escritos que ponen esto de manifiesto se encuentran entre los papeles de Polivka y son del mismo nivel e interés que los relacionados con el Guggenheim Museum. Por desgracia el puente no llegó a construirse, ni en este emplazamiento ni en otras ubicaciones donde Polivka intentó que progresase la propuesta, como en Bagdad. Pero a pesar de esto, puede considerarse de gran interés de cara a descifrar nuevas claves en cuanto a la colaboración entre arquitectos e ingenieros, entre estructura y arquitectura o referente a la función formal de la estructura, motivo principal de este trabajo.

En esa línea, se puede relacionar también la arquitectura orgánica de Wright con las formas estructurales en la naturaleza, fuente de inspiración en muchas ocasiones de sus proyectos. Existen algunos trabajos ya realizados respecto a la lógica estructural de diversos elementos presentes en la naturaleza, tanto el mundo animal, vegetal o mineral. Podría llegar a ser interesante, incluso para ampliar este trabajo, establecer una relación entre las formas estructurales naturales y algunos modelos estructurales expuestos en la segunda parte, como láminas, caparazones, modulaciones geométricas, etc...

Al igual que los otros grandes maestros de la arquitectura del siglo XX, Le Corbusier y Mies van der Rohe, Wright ha influido de manera importante en la evolución de la arquitectura. Le Corbusier sentó las bases de una nueva visión, desde la escala del urbanismo hasta los detalles en la manera de habitar la arquitectura. Por su obra prolífica, desde el Movimiento Moderno hasta las

últimas grandes obras de hormigón, su arquitectura ha tenido seguidores en aspectos genéricos y en cuestiones formales, quizás más irrelevantes, pero en general es indiscutible que la arquitectura actual no se entendería sin la aportación de Le Corbusier.

En el caso de Mies, citándolo ahora de forma muy superficial, marcó las tendencias preestablecidas por la Escuela de Chicago, planteando la arquitectura a partir del entramado o la retícula estructural que es la base formal y organizativa de su arquitectura.

La obra de Wright, incluso ya desde principios del siglo XX, ha contado con seguidores que se sienten deudores de sus planteamientos. El término “arquitectura orgánica” puede tener lecturas más superficiales, asociado a la utilización de formas próximas a la naturaleza, pero, en un significado más profundo está relacionado con la manera de interactuar las diferentes partes de la arquitectura y sus materiales. Entender la organicidad de la arquitectura de Wright, en uno de sus aspectos, significa comprender la relación indivisible entre la estructura y la arquitectura de sus edificios. Esta es quizás la cuestión más influyente en arquitecturas posteriores, herederas de su pensamiento.

De este modo, puede resultar de especial interés el profundizar en la influencia de la obra de Wright en la arquitectura posterior, no tanto desde un punto de vista formal, más superficial, sino en relación a los planteamientos estructurales. Como se ha visto, esto en muchos casos es de crucial importancia a la hora de caracterizar la arquitectura. Como ejemplo, vienen directamente a la memoria los hypars de Félix Candela, la Estación de Atocha de Rafael Moneo o las gasolineras de Norman Foster, así como numerosos ejemplos íntimamente ligados al planteamiento estructural del edificio Johnson. Bruce Goff desde un punto de vista formal, próximo a lo orgánico. Pier Luigi Nervi o Ricardo Morandi, y posteriormente Sergio Musmeci, pueden relacionarse con Wright a través de la búsqueda de expresividad mediante la forma de la estructura. En concreto, el puente sobre el río Basento en Potenza puede considerarse el heredero materializado del puente Butterfly Wings de Wright, en una versión sofisticada.

Pero las formas orgánicas influenciadas por Wright no solo se manifiestan de forma mimética. También la arquitectura de Eero Saarinen o Jørn Utzon tiene que ver con los planteamientos de Wright sobre la continuidad espacial y la indisolubilidad de entre la arquitectura y la estructura. En una aproximación más sutil, la casa de Utzon en Mallorca tiene cierta relación con las casas californianas de Wright, construidas con el sistema block.

La relación de ejemplos en este sentido, relacionando la arquitectura de Wright con herencias posteriores a través de los elementos estructurales, puede ser muy extensa y dar lugar a nuevos trabajos dentro de esta línea sobre los aspectos cualitativos de las estructuras. La clasificación sobre el papel formal de la estructura, expuesta en la primera parte, puede ampliarse muy extensamente, dando lugar a numerosos trabajos que ayuden a reconocer la importancia de la estructura dentro de la arquitectura, como una herramienta básica y motor de la

misma. Parece sugerente la posibilidad de plantear una visión de la historia de la arquitectura vista a través de la estructura.

Del mismo modo que Peter Carter ha expuesto ya su visión sobre la obra de Mies desde el punto de vista de la estructura de sus edificios, puede resultar interesante realizar esta aproximación a la obra de otros grandes maestros. Es el caso de Kahn y su relación con Komendant que ya se ha descrito recientemente, pero queda por explorar la obra de Le Corbusier, que desde la estructura de sus edificios se presupone un análisis tan complejo como el de la propia evolución de su obra, desde el Estilo Internacional hasta la utilización del hormigón en los últimos proyectos.





*Estimado Dr. Polivka. ¿Por qué no se acerca por aquí a vernos? Será bienvenido y me gustaría hablar con usted!*

# Anexo A

**Los escritos de Jaroslav J. Polivka**

---

---

<sup>190</sup> Polivka Papers. Folder 1.02\_01. Primera carta de Wright a Polivka en 1946, invitándole a ir a Taliesin para hablar de la Modern Gallery.

La imagen corresponde a una de las visitas de Polivka a Taliesin en Arizona. Polivka Papers. Photo 3.125

El autor de esta Tesis Doctoral ha considerado oportuno añadir los siguientes textos como anexo al trabajo, ya que, por un lado exponen aspectos fundamentales de la relación entre Wright y Polivka y sobre todo para hacer público este material casi desconocido. El autor de los dos primeros es el propio Polivka y en el último caso, se trata de una entrevista hecha a Polivka poco antes de la finalización del Guggenheim.

La traducción ha intentado ser lo más precisa posible, de manera que se pudiese percibir el tono o contenido crítico de las palabras de Polivka, reivindicando el mérito propio de las aportaciones realizadas a la obra de Wright. En los últimos años de su vida, incluso después de la muerte de Wright, Polivka quiso recuperar un cierto protagonismo en su papel junto a Wright. Es probable que la fuerte personalidad de Wright no le hubiese permitido atribuirse justamente su contribución. De este modo, se dirigió a diferentes editores de revistas de arquitectura ofreciendo su exposición de los hechos y llegando a conseguir una entrevista en la Revista *Arts Magazine* hacia 1956.

El primer texto, *What it's like to work with Wright?*<sup>191</sup>, fue escrito por Polivka a modo de biografía sobre su colaboración con Wright y recoge fragmentos de la correspondencia mantenida entre ambos. Este escrito lo remitió a diferentes editores aunque probablemente no fuese publicado íntegramente<sup>192</sup>.

Polivka demuestra por un lado su admiración hacia Wright al mismo tiempo que reclama un reconocimiento sobre las aportaciones que él realizó a su arquitectura. La buena estima que gozaba de Wright le enorgullece e intenta que ésta sea participada por la opinión pública del mundo de la arquitectura y la ingeniería. Polivka utiliza fragmentos de la correspondencia que había mantenido con Wright, especialmente en lo que se refiere al desarrollo del proyecto del museo, como ilustración.

Se hace referencia a la compilación de 97 hojas donde Polivka plasmó el desarrollo de su trabajo y de las cuales sólo se ha podido tener acceso a algunos borradores, así como a las referencias escritas que el mismo Polivka hace de ellas. Estos borradores han permitido desgranar cuestiones referentes al planteamiento teórico de la losa en espiral, expuestas en el apartado 3.4. (Métodos de análisis de láminas).

También se recogen comentarios referentes al encuentro entre Wright y Eduardo Torroja en Taliesin en 1950, de donde, según Polivka, surgió la idea del famoso texto de Torroja, *Razón y ser de los tipos estructurales*. El trabajo de Polivka durante los años junto a Wright no sólo se limitó a la resolución de los problemas estructurales y sus aportaciones a la arquitectura, sino que también realizó un trabajo más sutil, de fondo, consistente en provocar ocasiones o escenarios donde Wright pudiese desarrollar sus ideas. Ahí se entiende la insistencia de Polivka en la utilización del hormigón para el Guggenheim o el empeño puesto en la promoción de la propuesta para el puente Butterfly Wing.

---

<sup>191</sup> *¿Cómo es trabajar con Wright?* Polivka Papers, folder 1.07

<sup>192</sup> Barry Muskat hace referencia al texto en su Tesis Doctoral "*Engineering the Organic, an investigation into the Collaboration of Jaroslav Joseph Polivka and Frank Lloyd Wright*"



El segundo texto, *Aesthetic Bridges*<sup>193</sup> es un borrador que Polivka elaboró para un artículo referente a la importancia formal de la estructura de los puentes. En concreto, Polivka trabajó junto a Wright, casi durante la totalidad del proceso del Guggenheim, en el proyecto del Butterfly Wings Bridge, desarrollado íntegramente mediante hormigón armado, postensado o prefabricado, como alternativa a los modelos más clásicos de puentes de acero. El uso del hormigón en este tipo de infraestructura, con una componente estructural mucho más importante que en un edificio, suponía el reto exprimir al máximo la capacidad plástica del material. El criterio o pauta de diseño no era aleatorio, buscando formas más atractivas, sino el resultado de un análisis de la naturaleza resistente del material, en la línea de los escritos y obra de Eduardo Torroja. Por un lado este proyecto resulta ser un buen ejemplo del término “tenuity”, expuesto anteriormente, donde las partes se integran formando un conjunto unitario. La transición entre elementos se realiza de manera suave, acompañando a las leyes naturales propias del material y al mismo tiempo definiendo la forma de la estructura, que caracteriza la imagen resultante.

Polivka se apoya en la importancia formal que una infraestructura de este tipo tiene en relación con el entorno natural donde se implanta. En realidad la crítica no exclusivamente a la belleza de la opción de acero construida, sino sobretudo a la motivación estrictamente económica que la ha originado. En cuanto a las ideas orgánicas de Wright, resulta de una nobleza muy superior una forma inspirada en las leyes de la naturaleza y no en la optimización económica de la solución según criterios de la época. Como dice Polivka en el texto, la estrechez de miras de este último planteamiento no contempla una cuestión relevante como es el coste del mantenimiento de la estructura durante su vida útil.

En definitiva, tanto en este texto como en otros del mismo tipo<sup>194</sup> Polivka pone de manifiesto la cuestión principal que une su trabajo con el de Wright: la integración entre estructura y arquitectura, o el papel formal de la estructura.

Finalmente, después de diversos intentos de Polivka por manifestar su contribución a la arquitectura a través de la estructura, consigue que le realicen una entrevista en la revista *Seven Arts Magazine*<sup>195</sup>. Este texto, *Technocracy and the Engineer*<sup>196</sup>, escrito por Patricia Patridge<sup>197</sup> en 1956, se presenta en clave poética sobre el papel de la ciencia y su influencia en el arte. En concreto aborda el papel de la estructura dentro de la arquitectura. Se expone el concepto de “organicidad” como una integración entre las partes (estructura, instalaciones, construcción...espacio), de la misma manera que en un ser vivo todas las partes están relacionadas, en la nueva arquitectura los elementos se funden entre sí para

---

<sup>193</sup> *La estética de los puentes*. Polivka Papers, folder 1.05\_43-48

<sup>194</sup> Hay numerosos escritos de Polivka sobre este tema, así como correspondencia entre Polivka y las autoridades, defendiendo la solución del Butterfly Wings Bridge. No se han incorporado a este trabajo ya que por sí solos pueden dar pie a otro estudio sobre la relación Wright-Polivka y la arquitectura orgánica, tomando como eje de discusión este puente.

<sup>195</sup> La revista *Seven Arts Magazine*...

<sup>196</sup> *Tecnocracia y el ingeniero*. Polivka Papers, folder 2.5

<sup>197</sup> Patricia Patridge periodista crítica de arte.

configurar la arquitectura. Como ejemplo de este fenómeno, se ilustra el artículo con obras de Polivka y de Polivka en colaboración con Wright.

En concepto, se expone la visión integradora de Wright y Polivka y sobre todo, aunque casi al final de su vida, sirve como justo reconocimiento público de las aportaciones realizadas por Polivka.



## A.1 What it's like to work with Wright? <sup>198</sup>

### Introducción:

Mr. Hunter Hughes, editor de la revista mensual profesional "Consulting Engineer", sabiendo que Frank Lloyd Wright, el gran maestro de la arquitectura, me ha invitado recientemente a asistirle en otro de sus espectaculares edificios sin precedentes estructurales, me solicitó que hiciera un repaso de mis trabajos anteriores para este genio. Considero esta sugerencia una ocasión oportuna para expresar mi gran admiración por el poder creativo de Wright y mi agradecimiento por la inspiración que ha supuesto en mi actividad profesional como ingeniero consultor estructural.

### Admiración desde hace medio siglo:

Es conocido que la arquitectura de Frank Lloyd Wright no estaba completamente reconocida en este país a principio de siglo y, desde entonces, transcurrieron varias décadas antes de que recibiera encargos para construir edificios oficiales. Sin embargo, su original expresión en el arte y la arquitectura encontró desde hace ya medio siglo un gran número de admiradores en los países europeos, no sólo de arquitectos, ingenieros y expertos en arte, sino también por los estudiantes de esas materias. Recuerdo muy bien cuán impresionados quedamos mis compañeros en la Universidad de Praga y yo por los revolucionarios diseños de Wright publicados en libros y revistas europeas. Nunca pude olvidar la espectacular Casa Dana, en especial la escultura de un rascacielos, erigido por la "arquitectura Moderna" personificada como una hermosa mujer, creada por el conocido escultor Richard Bock, estirándose graciosamente hacia el cielo junto a la torre de Wright. Recordaba esta impresión durante los últimos años cada vez que oía o leía que Frank Lloyd Wright estaba principalmente interesado en diseñar casas y mansiones, afirmación que jamás pude creer, especialmente cuando llegué a los Estados Unidos y tuve la afortunada oportunidad de conocer a Wright y trabajar para él. ¿No es acaso un misterio que la Tower Lady, publicada en 1910-1911 en Berlín, Alemania, en un libro titulado "*Frank Lloyd Wright ausgeführt bauten*"<sup>199</sup> haya sido realmente la materialización del sueño del Maestro de la Torre de la Milla, tan popular hoy en día y para la cual estoy investigando en estos momentos respecto a la eliminación del peligro de oscilación? Mi condiscípulo Antonin Raymond, uno de los

---

<sup>198</sup> Polivka Papers. Folder 1.7

<sup>199</sup> "*Frank Lloyd Wright construido*"

arquitectos líderes en U.S. se hizo tan entusiasta del trabajo de Frank Lloyd Wright que escapó hacia América después de su graduación y afortunadamente trabajó para él en Tokio, en el Hotel Imperial a prueba de terremotos. Actualmente está asociado con Rado en New York y Tokio donde recientemente han levantado su propio edificio.

Afortunado encuentro doce años atrás:

Yo no fui tan afortunado como mi viejo amigo Antonin. Conocí personalmente a Frank Lloyd Wright tan solo hace doce años, cuando él había finalizado su original diseño para el Museo de Arte Guggenheim en New York. Como él dijo "*...el diseño ha hallado el destino habitual para una gran idea... Las reacciones han variado desde el espanto a la entusiasta aprobación. El principal obstáculo a afrontar parecía que era la gran rampa que sigue la espiral logarítmica: la superficie sólida continua del suelo, girando alrededor de un gran espacio central... prolongándose hacia la gran cúpula de vidrio. Desde este espacio se pueden apreciar mejor la majestuosidad, comodidad y atmósfera del edificio. Con este concepto de forma, el edificio se expande en una corriente de luz solar, iluminando la gran rampa desde el interior así como logrando una franja de luz natural del exterior*". Sin embargo, en aquel momento se interpusieron algunas dificultades al ingenioso concepto de Frank Lloyd Wright. La seguridad de este tipo estructural sin precedentes, lámina de forma espiral, había sido cuestionada y se colocaron pilares interiores cerca del borde cóncavo de la rampa para garantizar la seguridad. Wright estaba ansioso por liberar el espacio interior de esos pilares (tal como fueron construidos en la primera maqueta del edificio), y obtener una estructura con forma de resorte que, como él dijo, pudiera saltar hacia el cielo si fuese atacada por una bomba H y descender intacta a la tierra. La solución a este asunto fue la afortunada oportunidad de iniciar mi trabajo para Wright. En aquel momento me confesé francamente incapaz, y tampoco ningún ingeniero del momento lo hubiera sido, de resolver este problema teórico. Este tipo de lámina no había sido investigado antes y no había análisis estructural ni pruebas de comprobación para garantizar la seguridad completa de esta estructura sin precedentes. Cualquiera que conociese la persistencia de Frank Lloyd Wright y la justificada obstinación en sus principios comprenderá cómo él explicaba y defendía su original concepto del edificio, oponiéndose a las "mejoras" sugeridas por algunas autoridades. En sus memorias, al final de 1945 en Nueva York, él explicó:

*"... La democracia demanda este tipo de edificios. Lo que ya no puedas obtener en una iglesia deberías conseguirlo aquí: la salud, vitalidad y belleza de la imaginación humana... Yo tomé esta idea básica de los templos piramidales sirios con rampas*

*exteriores ascendiendo en espiral. Finalmente decidí que tales "zigurats" son pesimistas porque eran piramidales, por lo que di la vuelta a mi edificio para expresar puro optimismo" (fig. 2).*

Después de recopilar toda la información necesaria en Taliesin West, un paradisíaco lugar donde Wright con su familia y estudiantes viven y trabajan desde diciembre hasta mayo de cada año, trasladándoles a Taliesin cerca de Spring Green, Wisconsin. Yo me incorporé a ese sólido y atractivo proyecto, aunque siento que no pude permanecer en aquel maravilloso entorno durante mucho más tiempo. Le escribí así el 4 de mayo de 1946:

*"Mi mujer y yo estamos muy impresionados por el maravilloso lugar, bonita y confortable arquitectura, pacífico e inspirador ambiente. Por encima de todo disfrutamos de la acogedora atmosfera creada por su carismática personalidad así como la detallista Mrs. Wright y su familia. Le enviaré regularmente informes en relación al progreso del trabajo de la Modern Gallery en New York al que estoy dedicado..."*

Desde que Frank Lloyd Wright me pidió que trabajase en otro espectacular proyecto, como por ejemplo en la Research Tower Building para S.C. Johnson & Son, Inc, en Racine, Wisconsin, el Lacy Hotel en Dallas, Texas, tuve que interrumpir mi actividad docente en la Universidad de California, Berkeley, donde había sido invitado como investigador asociado en 1939, y dedicar mi tiempo completo a ese interesante y honorable trabajo. El progreso de mi trabajo queda bien evidenciado en la correspondencia. El 5 de junio de 1946 escribí a Mr. Wright:

*Le remito los resultados de las investigaciones preliminares sobre la parte principal de la estructura de la Modern Gallery en Nueva York. Después de algunas reflexiones decidí abordar el problema primero teóricamente y posteriormente verificar los resultados obtenidos con ensayos en maquetas. Ni los ensayos ni las pruebas por sí solas proporcionarían bases fiables para el diseño. Una lámina de seis pulgadas asumiría todas las fuerzas internas (radial, tangencial, momentos de torsión y cortantes). Sin embargo, una losa de espesor tan reducido es extremadamente flexible y aunque las deformaciones considerables no afecten a la seguridad de la estructura, pueden crear vibraciones alarmantes. Se están preparando las maquetas para ensayarlas y las pruebas mostrarán en qué medida el análisis teórico puede ser aplicado a la estructura sometida a estados de carga más complejos y bajo la consideración de las dimensiones reales. El método de análisis que se utilizará será parecido al método tratado en mi artículo titulado "Análisis experimental de tensión de puertas hidráulicas en los astilleros Kaiser, Richmond, California", que será presentado en el congreso anual de la Sociedad para el Análisis Experimental de Tensiones en Buffalo, en la mañana del 24 de junio de 1946. Lamento no haber sido capaz de quitarle esto de encima antes, pero como usted*

sabe, este ha sido un hueso duro de roer. Durante este mes podré investigar la cimentación para la Tower Building of S.C. Johnson & Son, Inc. Racine, Wisconsin...

Debo señalar que la principal razón de mi empleo en la Universidad de California fue mi especial interés en el análisis experimental de tensiones y, que en ese momento, 1939, el profesor Howard Eberhart y yo, bajo la guía del profesor Raymond E. Davis, director del Laboratorio de Ingeniería de Materiales, habíamos organizado el nuevo laboratorio de fotoelasticidad, donde nosotros realizamos varias investigaciones en materia estructural.

El análisis experimental de tensiones para el Museo Guggenheim fue realizado con cuatro maquetas sometidas a una carga proporcional y se tomaron cerca de 5.000 medidas de deformaciones elásticas con una precisión de 1/10.000 de pulgada. El método de determinación de tensiones a partir de sus deformaciones fue desarrollado y, en base a esos resultados, encontramos un método de corroboración teórica involucrando diferentes factores, de tal manera que se podría emplear un método simplificado para diferentes espesores de lámina y soluciones estructurales. Los resultados de todas estas investigaciones incluyendo una compilación de detalles estructurales, resumidos en 97 hojas de gran tamaño (fig. 3 a 14, como ejemplo), las cuales eran derivadas gradualmente a Frank Lloyd Wright para su diseño final. Cito algunas de las cartas de acompañamiento.

Re: *The Modern Gallery, Nueva York, 17 de junio de 1946.*

Adjunto le envío 12 páginas de informe respecto a los ensayos realizados en maquetas representando la típica rampa espiral del edificio de exposiciones. Los resultados presentados en esos modelos demuestran que su concepción de la rampa alabeada en espiral con el borde interior cóncavo es segura (como yo había previsto y así manifesté a su yerno Wes Peters), como se demuestra por lo siguiente:

1. La rampa alabeada en espiral tiene substancialmente mayor rigidez y, su máxima deformación se reduce un 40% aproximadamente. La curvatura tangencial de la rampa proporciona a la placa el valor característico de una lámina, reduciendo así la intensidad de los momentos flectores y consecuentemente las deformaciones.

2. El borde interior cóncavo de la rampa es otro factor que aumenta la rigidez y la capacidad portante de la losa.

3. Los apoyos creados por dos columnas circulares huecas funcionan como refuerzo añadido de la rampa, especialmente en la proximidad de dichas columnas.

Adjunto fotos que muestran el resultado de los ensayos a las que seguirán fotos a mayor escala. Se están preparando los datos para el diseño final...

25 de junio de 1946.

Páginas revisadas de la 1 a la 17 y páginas de la 18 a la 32, enviadas por separado.

Los pilares de apoyo de la rampa espiral son la clave del diseño completo y estoy añadiendo al informe previo sobre mi idea de cómo se puede resolver este problema estructural. He especificado en las páginas 31 y 32 el espesor variable de la losa la cual me parece satisfactoria. El resultado de máxima deformación se calculó bajo la asunción de una sobrecarga de uso de 100PSI<sup>200</sup> [488,24Kg/m<sup>2</sup>] cubriendo la totalidad de la superficie, incluso el borde cóncavo y sin tener en cuenta el factor de reducción por la acción del voladizo a partir del límite de la losa más allá de los soportes de la estructura. La situación es bastante extrema y exagerada, ya que no es muy probable que unas 3.500 personas puedan concentrarse en una de las plantas al mismo tiempo. En vista de estos factores, la deformación actual de la parte más desfavorable de la rampa (frente a los ejes) se espera que sea del orden de 1 ½ pulgadas [3,80cm] lo cual puede considerarse dentro de los límites razonables y aceptables. Estoy preparando una maqueta de detalle del encuentro para ensayarla mediante fotoelasticidad, ya que el método habitual de diseño no se puede aplicar en este tipo de elementos estructurales. También le enviaré fotografías de la maqueta n°4 en breve tiempo.

Las personas que han estado en contacto con Frank Lloyd Wright durante bastante tiempo son conscientes de que responde las cartas muy brevemente y solamente con referencias a los puntos importantes más urgentes. A menudo puede esperarse una o dos frases. En muchos casos el contacto a larga distancia se mantiene por telegramas. Esta respuesta tan breve de Wright, que data de 27 de junio de 1946, respondió a las cartas anteriores:

Mí querido Dr. Polivka: Hemos estado esperando las páginas del informe y éstas acaban de llegar. La tesis ha sido interesante y puede ser posible incorporar sus sugerencias. Sinceramente suyo, Frank Lloyd Wright.

Mi respuesta data del 27 de julio de 1946:

Gracias por su telegrama del 11 de julio. Le envío por separado la propuesta del método de análisis simplificado de rampa formando espiral el cual se puede aplicar con alguna variación de diámetro exterior y anchura. Este método confirma con precisión los resultados obtenidos en los ensayos de maquetas.

---

<sup>200</sup> Pounds per Square Inch, Libra por pulgada cuadrada



Y después de recibir mis facturas parciales por la Modern Gallery y la Johnson-Wax Research Tower, el telegrama que me fue enviado data del 1 de julio de 1946:

*El asunto que me ha enviado es muy interesante y de mucho valor para nosotros... Frank Lloyd Wright.*

En ese momento, en ocasión de mis repetidas visitas a Taliesin West, Wright comenzó a trabajar en el espectacular Hotel Roger Lacy en Dallas, Texas. Él tenía en mente muros exteriores 100% de vidrio el cual naturalmente debe ser aislante acústico y térmico. Me alegró poder recomendarle el vidrio "Thermolux" inventado a principio de los cuarenta por el Dr. Piero Modigliani, propietario de una gran fábrica de vidrio en Leghorn (Livorno, Italia), un revolucionario tipo de vidrio el cual, aparte de las propiedades anteriormente citadas, es altamente difusor de la luz. En 1934 hice una minuciosa investigación referente al estudio de mejoras de todas esas excelentes propiedades sin precedentes, y se publicaron extractos e informes de mi investigación en varios idiomas. Posteriormente fui capaz de utilizar específicamente este vidrio en varios edificios, como por ejemplo en el Pabellón de la Exposición Internacional de Artes y Oficios en Paris en 1937, en el Nuevo Museo de la Técnica en Praga, en el Museo de Arte de Praga, en un mercado de grano en Róterdam, Holanda en 1938 y otros. El vidrio Thermolux, también se llamó vidrio Artfiber, ha sido utilizado en base a este trabajo de investigación en muchos países europeos en edificios de reputación, como por ejemplo en la Biblioteca Nacional y en la estación de ferrocarril de Florencia, en varios edificios universitarios en Roma y Bolonia, el Agricultural en Milan, en edificios industriales en El Vaticano, Roma, el edificio comercial de Robinson & Cleaver, Ltd, Londres en y muchos otros. Es también otra aplicación la iluminación única sin sombras y la protección de pinturas valiosas. Esta última propiedad se utilizó en varias galerías de arte, como en los Uffizi en Florencia y en la galería Myslbek en Praga.

Dejé en Taliesin-West varias de mis publicaciones de este vidrio para próximos estudios y el 29 de julio de 1946, recibí el siguiente telegrama desde Taliesin, Spring Green, Wisconsin:

*Documentación referente al aislamiento del vidrio utilizado en Europa bajo su supervisión se ha extraviado. Sea tan amable de enviar información similar. Contemplamos utilizarlo en un hotel para Dallas. Frank Lloyd Wright.*

Envié a Frank Lloyd Wright el 30 de julio de 1946 un nuevo juego de mi trabajo, con informe especial del vidrio Thermolux y su particular aplicación para el edificio del hotel de Dallas, el cual podría ser de interés para los arquitectos colaboradores de Wright que hubiesen encontrado problemas similares.

Es comúnmente conocido que una ventana en un edificio con un solo panel de vidrio normal, no importa si se utiliza un vidrio de doble o simple espesor, tiene un efecto sobre la disminución del aislamiento térmico del edificio. La conductividad térmica de dichos vidrios se cuantifica en 4.8 BTU/hora<sup>201</sup> [5.064 Julios/hora], para una pulgada de espesor y 1°F [0,55°C] de temperatura de diferencia entre las dos caras. La conductividad térmica de un ladrillo ordinario es aproximadamente la misma, sin embargo en muros comunes su espesor es de 30 a 160 veces más grueso que la lámina de vidrio. El vidrio Thermolux consiste en dos láminas de vidrio transparente, de cualquier espesor o calidad, con una lámina de fibras de vidrio de 1/16 a 1/8 pulgadas [1,6mm a 3,2mm] de espesor intercalada, uniformemente tejidas en las máquinas del Dr. Modigliani. La fibra de vidrio de extrema calidad, aproximadamente 1/10 de un cabello humano, puede tener diferentes colores y puede obtenerse una superficie de color como una pintura mural. Las cámaras tienen pequeñas celdas de aire que incrementan considerablemente el aislamiento acústico y térmico. El vidrio Thermolux difumina la luz y elimina el resplandor. La intensidad de luz reducida (aproximadamente un 40% tras el panel) se restituye en mayor profundidad donde, puede creerse o no, es mayor que la iluminación con vidrios transparentes. Mi ensayo en el Nuevo Museo de la Técnica en Praga probó que la luz diurna en habitaciones de aproximadamente 50 pies [15m] de profundidad tuvo aproximadamente 100% mejor iluminación en el centro donde el vidrio Thermolux fue utilizado en ventanas comparado con la iluminación con vidrio transparente. El coeficiente medio de transmisión calorífica del vidrio transparente, 1,10 BTU [1.155 Julios] es cerca del doble que el del vidrio Thermolux, 0,54BTU [570 Julios]. El promedio de aislamiento a la radiación solar del vidrio Thermolux es de un 65%, mientras que el del vidrio transparente es del 15%. El coeficiente de absorción acústica del vidrio Thermolux es 0,39 en comparación con 0,08 del típico yeso o con 0,50 de pesados telones.

El informe se acompañó de tablas, diagramas y gráficos, haciendo especial referencia a la aplicación para Frank Lloyd Wright. Él nunca había oído nada antes acerca de este vidrio y buscó tener un ejemplo del panel tipo: "Las unidades rómbicas de vidrio de mayor tamaño son de 9'6" x 4'9" [290cm x 145cm]. Todas las demás unidades se subdividen en cinco partes. Será necesaria una enorme cantidad. ¿Podría enviar una muestra para enseñársela al cliente?", citando su carta del 29 de agosto de 1946. Organicé una visita del Dr. Modigliani a Taliesin y la muestra que se requirió aún puede verse hoy en la oficina de Wright en Taliesin West. Desafortunadamente, Roger Lacy, el millonario del petróleo, falleció antes de poder tomar la decisión de construir su bonito hotel.

---

<sup>201</sup> British Thermal Units

El coste estimado para la Modern Gallery en New York sobre la base del diseño original para el cual hizo una importante y considerable labor Wesley Peters, el yerno de Frank Lloyd Wright, arquitecto e ingeniero con mucho talento, fue de cerca de 2 millones de dólares.

La lucha con las dificultades para obtener la aprobación indispensable del departamento de edificación llevó tiempo y los costes de construcción se iban incrementando. Los detalles estructurales debían revisarse para mantener los costes dentro de los límites que Solomon Guggenheim tenía pensados. La decisión final de Guggenheim era continuamente pospuesta y Wright dudaba en completar sus planes. Por este motivo me envié una carta el 9 de agosto de 1946:

*Estimado Polivka: por ahora no quiero incurrir en más gastos de los que usted ya ha cargado en mi cuenta. Indudablemente lo que usted ha hecho (y hará) me será de gran ayuda cuando el nuevo Museo sea construido. Nosotros estamos esperando la oportunidad de construirlo. Pero si usted por ahora se inclina en continuar adelante con el trabajo, no dude que será útil más adelante y la correspondiente compensación será convenida. Sinceramente suyo.*

*Frank Lloyd Wright.*

Confieso que en aquel momento cometí el error de solicitar a Mr. Wright que continuara con los pagos de mis honorarios según lo acordado, sin darme cuenta de las dificultades y sin apreciar como se debería el verdadero honor de trabajar para tal genio. Mi respuesta, fechada el 16 de agosto de 1946 fue:

*Le agradezco su amable carta del 9 de agosto. Encuentro gran satisfacción en sus palabras a cerca de que el trabajo que he realizado y que haré para la Modern Gallery en New York, será de gran ayuda para usted. Espero y confío en que este hermoso edificio sea construido en un futuro muy cercano, no sólo como un monumento eterno hacia su ingenio, sino también como testimonio histórico de que la población americana finalmente se da cuenta de que las tremendas proezas en todos los campos de las ciencias y técnicas, generalmente reconocidas como protagonistas en todo el mundo, deben ser extendidas al arte moderno y la arquitectura. América no tiene necesidad de tomar prestados o imitar los principios europeos de la arquitectura moderna, tal como mucha gente quiere creer. Estuve siguiendo esas corrientes en Europa durante las pasadas cuatro décadas y encontré, por el contrario, que las lógicas, sólidas y progresistas características de la arquitectura moderna europea, están ampliamente influenciadas y fecundadas por sus vigorosas e indisolubles ideas. Por supuesto, yo no sólo estoy "inclinado" (como usted dice) a continuar el trabajo, sino deseoso y orgulloso de realizarlo... Fue usted muy considerado al decir que me enviará un cheque pronto. Ciertamente lo apreciaría, ya que*

*podría hacer buen uso de él, justamente ahora (nuestra hija vino recientemente de Europa y vive con nosotros, y hace un mes Helen, la mujer de nuestro hijo mayor Jan, que estudia Ingeniería Civil en Columbia y espera graduarse el año próximo tras estar cinco años en la armada de U.S. tuvo gemelos). En pocos días le enviaré un completo estudio de la cimentación de la Johnson's Research Tower Building, y también un debate y verificación más a fondo respecto de la rampa alabeada en espiral del Museo de Arte de New York. Me parece que todas estas cuidadosas investigaciones son y serán necesarias para convencer a los ingenieros del Departamento de Construcción de que la estructura es sólida y segura...*

Frank Lloyd Wright pensaba que no era necesario un análisis tan completo con corroboración empírica. Mi creencia firme era que este tipo estructural sin precedentes requería, igualmente, pruebas de seguridad y economía también sin precedentes. El número de páginas, de 20x30 pulgadas [50,8cm x 76,2cm], que contenían los resultados condensados de mis investigaciones, iba creciendo (a más de 97), como puede verse en mi carta del 9 de octubre de 1946:

*En una carpeta separada le envió las páginas 51 a 64 del análisis perteneciente a la Modern Gallery en New York. Espero completar el estudio este mes y enviarle los resultados de todas mis investigaciones de forma que puedan ser valoradas por el Departamento de Construcción en caso de requerirse. La parte principal serán los resultados de las maquetas de prueba. Realicé un cuidadoso análisis teórico porque encontré que algunos cálculos y fórmulas publicados referentes a problemas similares eran erróneos. Algunos autores han confirmado los errores y erratas en sus libros y documentos...*

Justo al comienzo de mi investigación estuve considerando como una muy buena alternativa económica un esqueleto de acero para la estructura, soportando la lámina de hormigón armado y por consiguiente eliminando los costosos andamios y encofrados (método utilizado originalmente por mi profesor de ingeniería de puentes Joseph Melan). Me enorgulleció escuchar que Wright estaba a favor de este método constructivo y le escribí a su cuñado Wes (William Wesley Peters, a cargo de este proyecto) el 15 de octubre de 1946:

*He recibido su carta del 10 de octubre y estoy encantado de oír que Mr. Wright está preparando ya los dibujos finales para la Modern Gallery y que está a favor de su esqueleto estructural de acero, soportando placas de hormigón ligero de acuerdo con mi sugerencia original, según los dibujos nº5 y nº16. Es posible que bajo las condiciones de trabajo que hay en New York, este tipo de estructura fuera más económica. Mi análisis original de la rampa de hormigón monolítico está basado en la teoría de ma-*

*llas curvadas (telarañas) que es igualmente aplicable a una malla estructural consistente en barras radiales y tangenciales...*

Mis siguientes informes, hasta la página nº 81, fueron enviados a Wright el 29 de noviembre de 1946. Entonces yo tenía que ir a New York para contactar con Board of Appeal y averiguar si el permiso de obras podría concederse en base a mis análisis estructurales empíricos y teóricos. Informé a Frank Lloyd Wright en mi carta del 19 de enero de 1947:

*Acabo de volver de New York (ayer por la tarde) y tuve una reunión con Mr. Murdock, jefe de Board of Standard and Appeal en New York y quedó muy satisfecho de oír qué progresista era en New York el Departamento de Construcción. Aprobarán cualquier tipo de estructura si la fortaleza y seguridad de la misma está suficientemente probada por experimentados ingenieros... Hablando a cerca de la complejidad e intrincación de la estructura, tengo en cuenta las dificultades estructurales que tienen que hacer frente los ingenieros para superar las eternas leyes de la naturaleza con las torpes herramientas de las matemáticas y mecánica aplicada, lo que llamamos "análisis estructural". Nunca alcanzaremos y realizaremos la sublime y simple solución del Creador.*

*"Preparando los dibujos finales para la Modern Gallery en New York, debemos tener resueltos los últimos detalles típicos. No importa si el sistema de la rampa es simplemente de hormigón armado o mediante un esqueleto de acero embebido en el hormigón, será necesario disponer refuerzos postensados con el fin de prevenir fisuras e incrementar la resistencia de la estructura. Estoy pensando en un nuevo tipo de refuerzo pretensado el cual se ha desarrollado muy recientemente, concretamente el método del Dr. F. von Emperger, patentado el 2 de septiembre de 1941, U.S. P.L. Nº 2,255,022. Emperger, el cual fue mundialmente reconocido como el padre del diseño moderno del hormigón (miembro honorífico del American Institute y doctor honoris causa de varias universidades americanas) murió en 1942. Yo estuve asociado con él en Viena hace bastantes años. Su método de pretensado tiene muchas ventajas, como el ahorro de una considerable cantidad de acero de alta calidad caro, mayor uniformidad y facilidad de pretensado, relativa pequeña cantidad de refuerzos típicos adicionales, mejor hormigón sin fisuras, todas las propiedades para garantizar durabilidad de la estructura...*

Se habló sobre la construcción del Museo con Solomon Guggenheim y al mismo tiempo tuve la impresión de que la decisión final del promotor había sido continuamente pospuesta. Entre tanto, Frank Lloyd Wright estaba trabajando en otro espectacular proyecto y buscó darme la oportunidad de nuevo de discutir los problemas estructurales con él. Me llamó el 21 de julio de 1947 y me invitó a ir a Taliesin en Wisconsin. Hasta ese momento estuve

muy ocupado con otros proyectos y con mi primera propuesta para el segundo cruce de la bahía de San Francisco, le pregunté por teléfono cuanto tiempo esperaba que trabajase allí "A su conveniencia - ilimitada - y traiga de nuevo a su mujer". Mi respuesta fue:

Me alegró oír su vigorosa voz esta mañana a las siete en punto y le envié el siguiente telegrama: GRACIAS POR SU AMABLE INVITACIÓN. MRS. POLIVKA Y YO VOLAREMOS A MILWAUKEE O MADISON EN UNOS DÍAS DEPUES DE ORGANIZAR MI TRABAJO AQUÍ. SIGUE UNA CARTA. Su llamada fue un poco repentina y tengo que organizar el trabajo aquí. Trabajar con usted fue siempre una gran emoción para mí. Le agradezco su amabilidad de sugerir encargarse de todos los gastos de viaje y estancia para Mrs. Polivka y yo mismo, así como los \$10 diarios para dietas. Esto último parece ser bastante desestimado, pero su confianza de que esta cuestión de trabajo pueda considerarse más adelante, elimina inmediatamente cualquier duda y vacilación, especialmente en vista de su creencia de que mi trabajo no requerirá más de 2-3 horas por día. Las últimas semanas estuvieron aquí de vacaciones nuestros hijos y nietos de New York y Washington. Estuvimos muy felices, pero fue extenuante para nuestros nervios y bolsillo. Sólo el viaje de ida y vuelta cuesta unos \$450 para dos personas y estaríamos altamente agradecidos que me adelantase \$500 más o menos, a fin de mantener vivo mi entusiasmo.

Le escribí otra carta a Wright el mismo día:

Acompaño algunas notas revisando mi idea para el nuevo puente de la Bahía de San Francisco y estaría encantado de discutir las con usted. Presiento que el nuevo puente puede necesitar su genial creatividad para llegar a ser la apoteosis democrática entre arquitectura e ingeniería. Me permito citar la carta del Departamento de California de Trabajos Públicos, Sacramento, fechada el 22 de febrero de 1947:

"Apreciado Dr. Polivka: Me interesó mucho su carta del 14 de febrero de 1947, adjuntando discusión y planos que muestran su idea de un nuevo paso para la Bahía de San Francisco, donde propone un arco de hormigón. Como ha indicado en su discusión, siempre nos gusta probar cuestiones nuevas y diferentes, siempre que por supuesto, puedan ser justificadas y tengan el apropiado procedimiento. No obstante, su propuesta es tan extraordinaria que nos ha dejado estupefactos. Puede ser que los 3.200 pies [975m] de luz puedan construirse, pero personalmente preferiría alcanzar ese extremo de longitud por pasos y no saltando de repente. Su plan propuesto es muy interesante y queremos que sepa que apreciamos su interés por esta cuestión.

Con especiales saludos personales,

Muy sinceramente suyos,

*C.H. Purcell, Ingeniero Jefe, Puente de la Bahía de San Francisco-Oaklang.*

*F.W. Panhorst, Ingeniero de Puentes."*

*Su opinión será altamente valorada.*

Esta fue la primera vez que me dirigí a Frank Lloyd Wright para proponerle una colaboración, y la historia completa de este puente, el cual podría costar aproximadamente \$150 millones menos que los \$400 millones de la propuesta oficial actual, es la segunda parte de este artículo<sup>202</sup>.

En relación con la carta de Mr. Purcell, en ese momento Director de Obras Públicas, y Mr. Panhorst, Ingeniero de Puentes del Estado de California, quiero mencionar que E. Freyssinet, el famoso ingeniero de puentes, demostró en sus diseños anteriormente citados, las posibilidades de construir arcos incluso de 5.000 pies [1.524m]. Les di las referencias en planos enviados a Purcell-Panhorst (Dibujo n° 10 con fecha 12 de febrero de 1947).

Vinieron nuevos proyectos y me siento apenado por no haber dedicado más tiempo al trabajo de Mr. Wright. Estas son las explicaciones en mi carta del 25 de octubre de 1947:

*Me complació tener noticias de usted el 20 de octubre... He estado bastante ocupado durante los últimos meses, hice un interesante trabajo para la Union Ice and Storage Co. diseñando un almacén de 165 x 1000 pies [50m x 305m] para la compañía Almacenadota en la ciudad de México, almacenes en Caracas y Maracaibo, Venezuela, una fábrica en Panamá y un puente de 610m (2.000 pies) de luz en El Salvador. Además estoy haciendo una continua investigación en nuevos problemas estructurales para la General Mills, Inc. relacionado con interesantes ensayos en nuestro Laboratorio de Ingeniería de Materiales, en la Universidad de California...*

Pero el Gran Maestro no me olvidaba. Me invitaba una y otra vez, cosa que le agradezco en mi carta del 11 de enero de 1948.

*Recibí su carta del 19 de diciembre de 1947, que me fue reenviada a New York. Gracias por su invitación a parar en mi viaje de vuelta desde México en su hermoso lugar. Mrs. Polivka y yo nos marchamos de Washington mañana y, de acuerdo con nuestro plan, llegaremos a Phoenix, Arizona, el 24 de enero a las 8:00 p.m. Sería bueno si pudiésemos encontrar a Mr. Masselnik en la estación.*

*Con los mejores deseos para usted y su familia, sinceramente  
suyo,*

---

<sup>202</sup> Parece ser que hace referencia al artículo "Aesthetics Bridges" que se muestra en el apartado siguiente.

*J.J. Polivka.*

Eugene Masselnik ("Gene") es el secretario jefe de Wright muy eficiente, que tiene gran admiración y devoción por su Maestro, de lo contrario no hubiese sido capaz de asistirle durante 28 años (1957), y esto significa mucho. Hay sólo otro veterano Jack Howe, arquitecto e ingeniero con talento, que trabajaron juntos en Taliesin durante 26 años, naturalmente además de Wes (la "estrella" Wesley William Peters), el yerno de Wright.

He estado siempre muy disgustado cuando mi otra actividad profesional se ha interpuesto con citas con Mr. Wright. En ese momento tuve que escribirle, el 7 de febrero de 1948:

*Una vieja canción alemana dice: ... sie konnten nicht zueinander kommen... das Wasser war zu tief... ( no podían entrar juntos... el agua era demasiado profunda) y fue entonces en ese momento, cuando pospuse dos veces mi llegada a Taliesin West. Fue muy amable por parte de Mr. Masselnik esperar en la estación de Phoenix hasta las dos de la mañana... Desde que una tormenta de nieve en México nos dejó resfriados, fue muy razonable que Gene nos avisase.*

*Hasta ahora estaba preocupado y quiero discutir dos cuestiones con usted:*

*1. Se me requirió por parte del representante del gobierno de Lebanon a asistir a un arquitecto local en el diseño de un nuevo Palacio de Justicia y otros edificios oficiales. Le sugerí a usted para ser el arquitecto, colaborando conmigo como ingeniero estructural junto con el arquitecto de Lebanon, que con su conocimiento de las condiciones locales es indispensable. Si usted está de acuerdo, podría escribir al representante para que le visite en Taliesin West.*

*2. Desde hace cerca de dos años, estoy trabajando en una conveniente casa de bajo coste, dos y tres habitaciones, utilizando métodos y materiales económicos. Una serie de casas podrían construirse ahora para demostrar las ventajas esperadas. Usted ha realizado varios estudios de casas similares y me pregunto si podríamos utilizar algunas de sus ideas para este propósito.*

*El total de nuestro viaje al Este, Miami y hasta México, ha sido muy interesante y le explicaré en algún momento más sobre nuestras experiencias.*

No fue necesario traducir en esta carta la cita de la canción alemana, ya que Mr. Wright conoce suficientemente esta lengua. Su primer libro europeo, publicado hace ya medio siglo, fue impreso en Alemania y a menudo en sus conferencias utilizaba algunas típicas y características palabras alemanas, tales como "Geist" (genio) cuando estaba hablando sobre arquitectura



orgánica ("*geistreich*"), la última vez el 26 de abril de 1957, en el Wheeler Hall de la Universidad de California, Berkeley.

Se encuentra "Lieber Meister" (Querido Maestro) en todos sus libros cuando habla de Sullivan. A Wright, como excelente músico, le gustaban los mejores compositores alemanes y austriacos, especialmente Beethoven y Bach. Sin embargo su elevado desarrollado sentido de la originalidad le llevo a menudo por su propio camino. Mi esposa y yo nunca olvidaremos las impresionantes tardes, cuando se levantaba después de cenar en su área privada, y tocaba el piano en su bonito e inmenso salón y comenzaba a interpretar sus propias fantasías musicales entrelazadas con creativa imaginación.

Revisando la segunda parte de esta carta, estaba pensando en sus ideas expresadas en el libro "*When Democracy Builds*" ("*Cuando la democracia construye*"), especialmente perteneciendo a las casas de elevada economía con abundante luz, aire y sol, combinado con libertad y frescura de vida. Este fue el primer libro que yo recibí de Wright, con la halagadora dedicatoria "*A Polivka - un afortunado encuentro- Frank Lloyd Wright 1946*". Admito francamente, fue una suerte para mí. En mi vida tuve la fortuna de estar en estrecho contacto profesional con varias personalidades destacadas, como Le Corbusier, Robert Maillart, Adolf Loos, Augustin Mesnager, Charles Rabat, E. Freyssinet, August Perret, F. Emperger, F. Klokner, Antonin Raymond, Richard Neutra, A. Ángel, Eric Mendelsohn, E. Torroja, D.B. Steinman, P.W. Hables, Julian Clarence Levi, Raymond E. Davis y muchos otros y, después de veinte años de actividad profesional, creo que he tenido la más alta inspiración de mi trabajo gracias a mi profesor Joseph Melan y a Frank Lloyd Wright. Y de lo que estoy más orgulloso es que Wright nunca dudó en expresar su pleno reconocimiento de mi trabajo, como lo demuestra la dedicación de su libro antes mencionada, la cual fue repetida en varias ocasiones. Cuando recibí uno de sus últimos libros con la dedicación "*Al buen doctor Polivka - con estima - Frank Lloyd Wright, 1957*" le agradecí añadiendo "*Afortunadamente usted es un hombre muy saludable y no necesita doctor*"

Entonces estaba sumergido en un emocionante trabajo, sin embargo la construcción del Museo de New York, se retrasaba mes a mes. Mi creencia era que los arquitectos de New York estaban fuertemente en contra del diseño de Frank Lloyd Wright, no solo por su revolucionario concepto sino también por sus críticas a la arquitectura de New York. Todavía su carta del 5 de noviembre de 1948 parecía optimista:

*Vamos a seguir adelante el próximo invierno con el trabajo del Museo y la casa Morris en San Francisco, juntamente con muchas otras cosas y, si usted no está comprometido y hacemos un arreglo razonable para ayudarle, esperamos entonces hacerlo.*

*Sinceramente, Frank Lloyd Wright*

Mi respuesta del 8 de noviembre de 1948:

*Recibí su carta del 5 de noviembre con la buena noticia de que va a continuar adelante con el trabajo del Museo y la Casa Morris en San Francisco el próximo invierno, juntamente con muchas otras cosas. Mis mejores felicitaciones. Sabe cuan entusiasta soy de trabajar con usted y ciertamente haré todo lo posible para aprovechar esta oportunidad. Estoy siguiendo continuamente el trabajo en Maiden Lane en San Francisco y fui informado que el Sr. Morris está esperando a Wes aquí dentro de dos semanas. ¿Puede usted estar aquí también o preferiría tener una conversación conmigo en Spring Green?*

En ese tiempo, Mr Wright visitó varias veces San Francisco a propósito de algunos consejos de redacción de edificios en el área de la bahía, especialmente la residencia Morris en Ocean Cliff cuya torre bucea en el Océano Pacífico, para la cual yo fui el ingeniero estructural. En esta ocasión discutí con él mi propuesta original para el segundo cruce de la Bahía [de San Francisco], y acordamos someter al *State Legislatute Committee* (Comité de Legislatura Estatal) la nueva propuesta en concordancia con las nuevas ideas de Wright. Nuestro diseño se completó en Taliesin West y, por primera vez mi nombre apareció también en los planos y los informes anejos. Nuestro diseño, en ese momento, principios de 1949, podría ahorrar 100 millones de dólares de dinero público. La historia completa es muy interesante y se discutirá en la segunda parte de este artículo.

En uno de mis viajes a Taliesin, en abril de 1949, llevé el libro de Eduardo Torroja sobre sus estructuras de hormigón armado diseñadas y construidas desde 1926 a 1936, antes de que fuese profesor de la Universidad de Madrid. Torroja, uno de los ingenieros y arquitectos líderes en el mundo, con un gran número de distinciones y premios internacionales, diseñó muchas estructuras espectaculares conocidas por todos los ingenieros progresistas, como por ejemplo el Frontón Recoletos, el puente de hormigón sobre el Esla, el arco para ferrocarril con mayor luz (683 pies - 208,17m), llegando a ser en 1941 director del Laboratorio Central de Materiales y, más tarde, director del Instituto Técnico de la Construcción y el Hormigón en Madrid. Admiré el trabajo de Torroja desde que visité España por primera vez en 1932 y, más tarde, cuando estaba al cargo de algunas consultas para la nueva Universidad de Madrid. Estuve en contacto con él desde la finalización del puente, arco sin precedentes, sobre el río Esla, 1942 (destruido por la Guerra Civil en España) y recibí de él todos los detalles para informar mis artículos y libros sobre puentes de hormigón de grandes luces. El libro sobre el trabajo de Torroja, ampliamente ilustrado, impresionó mucho a Frank Lloyd Wright, tanto que le generó interés en conocer al profesor Torroja. Yo organicé su

vuelo directo desde Madrid a Taliesin West el 21 de abril de 1950, con dos miembros de su Instituto, el ingeniero Nadal y el Arquitecto Lucini. Ya en mi carta del 27 de marzo de 1950, sugerí a Torroja escribir un libro para su publicación en América y este asunto se discutió con Wright durante su agradable visita en Taliesin, en compañía de otros invitados, donde se me permitió invitar a tan interesante reunión a Roger Corbetta de New York, presidente de Corbetta Constructions Co. con su esposa, y a Douglas Haskell, editor de Architectural Forum. También en esta ocasión fui capaz de organizar conferencias de Torroja en varias universidades (Instituto de Tecnología de California, Pasadena; Universidad de California, Berkeley). Torroja disfrutó mucho su viaje a los Estados Unidos, tal como expresa en su carta del 31 de mayo de 1950:

*Querido amigo mío: De vuelta a mi país después de mi muy placentera estancia en los Estados Unidos, el principal recuerdo que ha quedado en mi mente es el del delicioso tiempo que pasé en San Francisco, así como las múltiples atenciones que ha tenido conmigo. Será realmente un gran placer para mi devolvérselo aquí en España y espero que algún día su mujer y usted mismo podrán venir y visitar este país.*

*He aprendido muchas cosas de gran valor y hecho muchas amistades agradables en su maravilloso país, pero créame, no lo valoro tanto como el tipo de amistad que han demostrado hacia mi, y me he sentido tratado como uno más de la familia. Por favor, transmita a Mrs. Polivka mis mejores felicitaciones y permítame asegurarle que puede contar conmigo siempre que haya alguna cosa que yo pueda hacer por usted.*

*Sinceramente suyo.*

*Eduardo Torroja*

Siguiendo mi sugerencia, Torroja empezó a escribir el libro para publicarse primero en los Estados Unidos, como afirma en su carta del 28 de julio de 1950:

*Mí distinguido amigo: gracias por el interés que se ha tomado en la edición de mi libro, el título del cual bien podría ser "The Philosophy of Structural Design"<sup>203</sup>. La idea del libro es llamar la atención de ingenieros y arquitectos sobre la importancia de elegir cuidadosamente el tipo de estructura a adoptar antes de tomar la decisión del diseño particular y, también, comentar varios aspectos del tema de manera fácilmente inteligible. No tengo ningún deseo de ir a argumentos matemáticos ni a problemas de cálculo, pero trato de hacer que el lector aprecie intuitivamente el fenómeno tensional y el problema de los esfuerzos en edificios como un aspecto integral de diseño.*

---

<sup>203</sup> *"Razón y ser de los tipos estructurales"*

*También intento indicar cómo la naturaleza de los materiales influencia el tipo de estructura, el método de construcción, etc... He redactado ya la mitad del libro, pero estoy demasiado ocupado y no sé cuándo podré acabarlo...*

De la correspondencia con Torroja y Frank Lloyd Wright, me gustaría citar algunas frases de mi carta a Wright del 8 de agosto de 1950:

*Bienvenido a casa. Intenté contactar con usted en Inglaterra y Suiza, por cable y carta para transmitir el humilde recordatorio de Torroja de no olvidar parar en España como su invitado y ver los monumentos de la vieja arquitectura (Alhambra y otros). El profesor Torroja fue ahora a Mallorca para sus vacaciones. Me envió el manuscrito de su nuevo libro "The Philosophy of Structural Design" en cual le sugerí que publicase primero en los Estados Unidos. Acabo de volver de una conferencia de todo el día organizada por los ingenieros de la Armada U.S. donde ha sido discutido un nuevo puente cruzando el estrecho de San Pablo, entre Point San Pablo en Richmond y San Rafael (coste estimado 35 millones de dólares). Mi testimonio contuvo sugerencias para utilizar el bonito y económico puente Butterfly Wingtype (Tipo de alas de mariposa) en lugar del "jorobas de camello" de vigas de acero. El resultado de mi sugerencia será cuestionada. Hay varias fuerzas apoyando el poder de la industria del acero. Incluso el libro de Mrs. E. Mock "Arquitectura de puentes" podría no ser publicado sin el generoso dinero de la Industria del Acero. ¿Dónde está el Instituto Americano del Hormigón y la Asociación del Cemento Portland? ¿Podría apoyarme en sugerir a ambas organizaciones del hormigón para publicar un libro de puentes de hormigón y estructuras laminares bajo la temática de la arquitectura orgánica?*

La propuesta final para el puente de Richmond - San Rafael de la Toll-Bridge Authority se estimó, en 1950 en 43 millones de dólares. Me pareció anticuado y envié a las autoridades mi propio diseño siguiendo exactamente las determinaciones locales y materiales estructurales, sin embargo concebido en el principio de economía y estética. Aproximadamente 8 millones de dólares podían ahorrarse del dinero público (hoy en día, 1959, 35 millones de dólares), lo que fue confirmado por una de las compañías de puentes líderes en el mundo, bajo la asistencia de ingenieros de puentes de reputación internacional. Todas las sugerencias se lanzaron a la papelera y el puente se completó según su diseño original en 1956, por 72 millones de dólares. El Dr. Stephen C. Pepper, jefe del Departamento de Estética de la Universidad de California, Berkeley, llamó a este feo y costoso puente "uno de los mayores desastres estéticos".

Esto no debería suceder en el "Southern Bay Crossing" (cruce de la bahía sur). Recientemente, cuando el coste de este puente

propuesto por la Toll Bridge Authority se estima en 400 millones de dólares, empieza a despertar el interés de la propuesta de Wright, y varios senadores y asambleas están organizando comités para volver a esta bonita y permanente estructura la cual podría ahorrar hoy, como mínimo, 150 millones de dinero público (ver parte II<sup>204</sup>).

Podría escribir un libro sobre el tema de este artículo. Quiero concluir esta parte mencionando otro espectacular diseño de Frank Lloyd Wright en el que he tenido el privilegio de trabajar: El nuevo pabellón de deportes en Belmont, New York, para 80.000 espectadores. Volví a Taliesin West en febrero de 1957 y estoy luchando ahora con algunos problemas estructurales sin precedentes, bajo los consejos del Gran Maestro. Por ejemplo los 450.000 pies cuadrados [41.800m<sup>2</sup>] de cubierta de plástico sin soportes interiores. Este es otro proyecto en el que Wright me da crédito y reconocimiento total de cooperación. Las figuras son instantáneas tomadas en Taliesin West durante mis dos semanas de trabajo allí. De especial interés para mi, y estoy muy orgulloso de ello, la instantánea muestra la torre de una milla (1,6 Km.) de altura, "Illinois," (a compararse con la torre concebida por Frank Lloyd Wright medio siglo atrás, donde en una hoja adyacente figuran los nombres de varios ingenieros a quienes merece su respeto, como por ejemplo Roebling, Maillart, Torroja, Nervi, etc... y, modestia aparte, Polivka. En cualquier caso aprecio más este reconocimiento que mi Legión de Honor.

J.J. Polivka, "Stress analysis of fan arch bridge spanning 95m (312ft) by using double refraction in a glass model" Beton & Eisen, Berlin, 1917, N° 2 and 8.

J.J. Polivka, "Use of photoelasticity in analysis of hyperstatics structures", Proc. Of the Thirteenth Semi-Annual Photoelasticity Conferences, 1941.

J.J. Polivka, "Some stress relationships in photoelasticity", Proc. Of the Thirteenth Semi-Annual Photoelasticity Conferences, 1939.

J.J. Polivka, "Rigid frames without diagonals (The Vierendeel Truss)", Proc. of Am. Soc. of C.E., June 1941.

J.J. Polivka, "A more exact method of determining stresses from photoelasticity isochromatics and isoclinics", Proc of the Fifteenth Semi-Annual Eastern Photoelasticity Conference, MIT, Boston, 1942.

J.J. Polivka, "Analysis of gravity load stresses by photoelastic methods", Proc of the Sixteenth Semi-Annual Eastern

---

<sup>204</sup> Parece que se refiere al texto Aesthetic Bridges. Polivka Papes. Folder 1.5 43-48, traducido en el siguiente apartado.

Photoelasticity Conference, Institute of Technology, Chicago, 1942.

J.J. Polivka, "Puentes de concreto de gran claro", pp. 58, Mexico 1948.

J.J. Polivka, "Le beton traslucide", Paris - Bruxelles pp. 129, 1948.

J.J. Polivka, "Glass Thermolux - modern creation of the glass industry", pp 64, Mexico. Prague 1936, in several languages.

J.J. Polivka, "Glass, structural material tomorrow", Architectural Record, Febr. 1936.

J.J. Polivka, "Largest glass-crete roof permits high daylight illumination", Arch. Record, October 1939.

J.J. Polivka, "New test with Thermolux glass", Bratislava, 1938.<sup>205</sup>

---

<sup>205</sup> Polivka incluye al final del texto una relación de artículos escritos por él mismo como justificación de sus conocimientos científicos en el ámbito del análisis estructural.



## A.2 Aesthetic bridges

La mayoría de los puentes, una parte substancial de las comunicaciones, autopistas y carreteras, están contruidos dentro de las ciudades o en sus alrededores y deberían diseñarse de acuerdo con su entorno y como una contribución esencial a la belleza y atractivos de dichos lugares. La estética de un puente es, por lo tanto, muy importante; muchas veces más que su economía, especialmente en los casos en los cuales la belleza del puente crea condiciones que compensan los costes más elevados del mismo.

Desafortunadamente, la estética de un puente es, muchas veces, considerada como un factor secundario, excepto en la mayoría de los países europeos donde cualquier proyecto importante desde el punto de vista del interés público y de su financiación se selecciona sobre la base de un concurso público anónimo en el cual un jurado neutral elige el mejor diseño, no solo desde el punto de vista de los adelantos de la ingeniería y de los costos, sino también y esencialmente, desde la cuidadosa consideración de su belleza.

En este sentido, debemos referirnos a la idea central de la conferencia que presentó el Dr. Stephen C. Pepper, director del Departamento de Filosofía y Estética de la Universidad de California, Berkeley, en la convención del California Council of Architects, mantenida entre el 10 y 13 de Octubre de 1956 en el hermoso Parque Natural de Yosemite, en la cual el recientemente finalizado puente Richmond-San Rafael, que cruza la atractiva bahía de San Francisco, el segundo puente más largo de California y de un coste de 72 millones de dólares, fue criticado como uno de los mayores desastres estéticos. En su exposición el Profesor Pepper señaló el hecho de que muchas estructuras son solo instrumentos prácticos sin ningún atractivo estético o estéticamente despreciables. Citando literalmente: *"Estas estructuras pueden ser ofensivas a la vista en el caso de hallarse en un contexto de entorno en el cual están llamadas a ser hermosas. .... Una estructura no es un mero objeto físico con el cual estemos relacionados ni es la simple percepción de algo extraño y pasajero, sino que es un objeto de belleza total con el cual deberemos vivir año tras año. Para mantener y realzar la belleza del entorno natural, debemos tener siempre presente que los edificios y ciudades que serán contruidos no son meras acumulaciones de maderas y piedras ni tampoco "máquinas donde vivir", sino la organización de las percepciones y significados humanos y deberían tener una identidad distintiva. Por otra parte, entre las muchas cosas contra las cuales debemos prevenirnos y que necesitarían mucho espacio para ser retenidas, tenemos la amenaza del hombre testarudo y la del hombre imitador. Estas dos amenazas son serias, porque muchos de los hombres poderosos y ricos de nuestra sociedad se transforman*



en una u otra de ellas.... El testarudo<sup>206</sup> es el hombre excesivamente práctico y voluntarioso, que ha dedicado toda su vida a hacer dinero o a la política u otros menesteres absorbentes pero estrechos de miras. Este tipo de persona es una fuente de peligro para el futuro confort y belleza de nuestra comunidad, de una forma casi proporcional al éxito que han conseguido. Términos como "confort, belleza, arte, estética y similares son repulsivos a su naturaleza. Un ejemplo contemporáneo de la acción de un típico hombre testarudo es el puente elevado Richmond-San Rafael. Este puente es la típica construcción de una persona muy práctica. Incluso si algo menos horroroso pudiera haber costado algo más de dinero, debió haberse tenido en cuenta a la vista del costo que esta estructura ocasionará para la vista y los sentimientos de las generaciones venideras. Además, la Bahía de San Francisco es una de las grandes bellezas naturales del mundo..."

El Dr. Pepper no es el único ciudadano contribuyente que se atrevió a expresar públicamente su crítica desfavorable, tal como podemos ver en los siguientes editoriales del San Francisco Chornicle:

Septiembre 15, 1955:

Editor- El puente de Richmond-San Rafael será un recordatorio permanente para el contribuyente de lo que el Departamento de Obras Públicas<sup>207</sup> puede llegar a darnos en cuanto a puentes si se les permite actuar sin control. Realmente el puente luce como si alguien por ahí hubiese deseado el contrato para un puente elevado (roller coaster) y haya querido tener esta monstruosidad como ejemplo de maestría.

Prector Jones, San Francisco.

Editor- ¿No sería mejor que esa monstruosidad en el Norte de la Bahía, conocida como el puente Richmond-San Rafael, fuese llamada el Bactrian Bridge<sup>208</sup>?

---

<sup>206</sup> *hard-headed* en el original en inglés

<sup>207</sup> *Public Work Department* en el original en inglés

<sup>208</sup> Puente de la doble joroba



Puente Richmond-San Rafael<sup>209</sup>

*Septiembre 6, 1956:*

*Editor- En su artículo del 31 de Agosto, que describe la inauguración del nuevo puente Richmond-San Rafael he notado las siguientes omisiones y errores: .... Pero en mi opinión este puente es tal vez el más repulsivo puente jamás construido. No hay duda de que se han ahorrado muchos miles de dólares inclinando la pendiente hacia abajo en los espacios entre apoyos, pero el efecto final de esto es que el puente parece una línea retorcida de acero.*

*Parker E. Shaeffer, Wilpitas .*

*Septiembre 19, 1956:*

*Editor- El inconcebible puente Richmond-San Rafael será señalado por las generaciones futuras como un símbolo de una época de "prosperidad", en la cual la Nación dispuso de sumas sin precedentes para gastar y de una increíble ceguera para usarlas con sensibilidad. Será todo un hito histórico que a alguien se le haya permitido construir una estructura de 68 millones de dólares en esas localidades con semejante olvido de la belleza arquitectónica y del diseño.*

*W. H. Gelder, Berkeley.*

*Editor- Dos cartas en la edición del 15 de Septiembre critican el puente Richmond-San Rafael como una monstruosidad y un desperdicio del dinero de los contribuyentes. Señores, ustedes todavía no han visto nada. Esperen a ver la excéntrica propuesta para el cruce del Sur de la Bahía....*

*A. F. Sundquist, Redwood City.*

---

<sup>209</sup> La imagen no pertenece al artículo, pero se ha considerado oportuno incluirla para ilustrar este peculiar puente con estructura de acero.

Esta última carta se refiere al cruce de la Bahía de San Francisco por el sur, cuyo diseño por la Autoridad de Puentes de Peaje<sup>210</sup>, oficina de Berkeley, a la fecha está completado al 75%

Los costes para este puente están estimados en cerca de 275 millones de dólares. Además, este proyecto es altamente antieconómico comparado con la propuesta que Frank Lloyd Wright y el autor sometieron a consideración del Comité de Legislatura Estatal<sup>211</sup> en 1949, que ahorraría como mínimo 100 millones de dólares de los contribuyentes, tal como ha sido puesto en evidencia por Corbetta Construction Company, uno de los más grandes contratistas de hormigón de los Estados Unidos.

15 de Octubre de 1956 :

*Editorial- LA INGENIERÍA NO DEBERÍA IGNORAR LA ESTÉTICA-* La semana anterior, el Profesor Stephen Pepper de la Universidad de California, filósofo cuya especialidad es la estética, describió el puente Richmond-San Rafael y la propuesta de la Autovía Embarcadero como "desastres estéticos". Nosotros estamos de acuerdo con el punto de vista del Dr. Pepper. Lo triste de un desastre estético es que, a diferencia de un incendio o un terremoto, los efectos de un desastre estético no desaparecen pronto. Es una ofensa que se inflingirá durante generaciones. En el asunto del puente Richmond-San Rafael alguien cometió un error. Dos jorobas pueden estar bien para un camello afgano pero no son adecuadas en el medio de la Bahía. Además de construir un puente que es extremadamente feo, los ingenieros cerraron los laterales con paredes de planchas de acero sólido, impidiendo así a los usuarios disfrutar de una de las vistas más hermosas del mundo.

El área de la Bahía adquiere su carácter único por una serie casi interminable de panoramas distintos. Una desventaja de este tipo de estructura es que la fealdad es muy difícil de ocultar. El esqueleto de acero del "puente de dos jorobas" no se puede ocultar en un armario. Pero, como afirma el Dr. Pepper, puede servir a un propósito muy útil. Será un recordatorio perpetuo de que debemos modificar nuestra ingeniería mediante la

---

<sup>210</sup> *Toll Bridge Authority*, en el original

<sup>211</sup> *State Legislature Comite*, en el original

consideración de los aspectos estéticos en lugar de modificar la estética de nuestro entorno natural mediante la ingeniería.

El autor ha seguido los problemas de los puentes de la Bahía de San Francisco desde 1939 cuando fue contratado por la Universidad de California como investigador en Ingeniería Civil, estando desde entonces verdaderamente interesado en contribuir a la solución de difíciles problemas relacionados con esas estructuras. Cuando el Cuerpo de Ingenieros del Ejército lo invitó a remitirle su opinión acerca de la propuesta preliminar para el puente Richmond-San Rafael (carta del 7 de julio de 1950 del Coronel F. S. Tandy, District Engineer,) sus comentarios fueron los siguientes:

1. El puente que se propone construir será una contribución esencial para el futuro desarrollo del Gran San Francisco y las ciudades y áreas cercanas a la Bahía.

2. Se esperaba que este nuevo desarrollo hubiese tenido lugar teniendo en cuenta los modernos principios de planificación urbana en las mas diversas áreas, para crear un grupo de comunidades más grande, más habitables, cultas y prósperas. Estos principios también podrían haberse expresado en el diseño de este puente. El boceto expuesto al público muestra un puente que desdichadamente carece de todas las características que identifican a un puente hermoso, como se demuestra en el informe "Prize Bridges, 1928-1948" publicado por el Instituto Norteamericano de Constructores de Acero (American Institute of Steel Construction). Estos puentes "doble joroba de camello" ya habían sido diseñados 30 o 40 años atrás.

3. Los avances de la construcción moderna han generado un desenfrenado crecimiento de los extravagantes y obsoletos puentes de celosía de acero, que permanecen como devastadoras manchas de nuestros paisajes. Las nuevas formas del hormigón, más consideradas con el medio ambiente, han llegado para tomar el lugar de las anteriores. Con ellas, no solo es posible obtener grandes economías sino también alcanzar una belleza verdadera que está negada a las viejas formas. Un mayor acercamiento a la Naturaleza se hace posible para el hombre. Crecen rápidamente formas más científicas y artísticas para los puentes modernos. La construcción de puentes con grandes luces tiene que obtener las ventajas de las grandes economías, prestaciones y belleza de los diseños que son posibles ahora gracias al progreso científico del hormigón armado.

4. El mantenimiento incesante siempre añade pesados incrementos al coste de construcción que, si fuesen correctamente capitalizados, casi duplicarían el coste original del puente en 50 años. Poca gente es consciente de que los puentes construidos totalmente en acero tienen una vida limitada, cerca de 25 años

de promedio, y que nuestros Bay Bridge y Golden Gate Bridge devendrán obsoletos y deteriorados después de 60 años, mientras que los puentes de hormigón correctamente diseñados y construidos perdurarán por siglos con costes de mantenimiento despreciables.

5. El Butterfly-Wing Bridge sometido al Comité Legislativo del Estado como propuesta para el cruce del Sur de la Bahía, diseñado en hormigón armado, pretensado y prefabricado, ahorraría alrededor de 100 millones del dinero de los contribuyentes, tal como fue estimado y confirmado por Corbetta Construction Co de Nueva York, una compañía que ha estado en contacto con la construcción de los puentes más grandes en Estados Unidos, como por ejemplo el George Washington Bridge, el Whitestone Bridge, el Triboro Bridge y otros.

6. El diseño básico de los puentes importantes no debería continuar siendo un monopolio de las autoridades estatales. De acuerdo con los principios de la democracia profesional, debería darse la oportunidad a los arquitectos e ingenieros de exponer sus ideas en un concurso público, tal como se hace en muchos otros países para beneficio de la economía y de la estética."

Estos principios del autor han sido remitidos a otras autoridades, comités, consejos, grupos e individuos, como la Division of San Francisco Pay Toll Organization, encabezada por Mr. Norman Raab, el Departamento de Obras Públicas, Srs. C.H. Purcell, G.T. McCoy y F.W. Panhorst, etc. De las muchas discusiones y respuestas el autor pudo finalmente concluir que hay pocas probabilidades para la realización de sus ideas y que solo será considerado el puente de acero para la construcción.

Este ha sido un desafío interesante y el autor decidió remitir a las autoridades sus ideas provenientes del progreso de la ingeniería, la estética y la economía, incluso en el caso de que el material estructural a utilizar fuese el acero.

Las características esenciales de varios tipos de este diseño competitivo se muestran en la figura 3 y después de una cuidadosa investigación económica la alternativa 2b<sup>212</sup> fue la elegida para la propuesta que se envió en junio de 1951 a la Autoridad de Puentes de Peaje y otros comités para su estudio. Naturalmente es imposible evaluar la estética de una estructura con la misma exactitud que sus costes, a pesar de que también las estimaciones económicas hechas por especialistas pueden diferir considerablemente de los costes de construcción reales. El puente Richmond-San Rafael es uno de estos casos. La estimación inicial de la Autoridad de Puentes de Peaje fue de alrededor de 43 millones de dólares, incluyendo los costes de

---

<sup>212</sup> En el texto original de Polivka no figuran estas imágenes.

subestructura, el puente de acero, pavimentos y miscelánea, aproximaciones, así como gastos de ingeniería, administración, asuntos legales, contingencias y derechos de paso. La propuesta final de diseño del autor, elaborada en colaboración de un ingeniero líder mundial en la ingeniería de puentes arrojó una estimación de costo de solo 35 millones de dólares, sobre las mismas bases de cálculo. A pesar de que esta estimación fue verificada por una empresa especializada en este tipo de cálculos para puentes similares, el cauteloso informe del autor asegura solo un ahorro de 5 millones, los cuales hubiesen sido mucho mayores después de 6 años de constantes incrementos de precios. El coste del puente terminado, con la plataforma inferior incluida ha sido de 72 millones, cerca del doble de lo que se había estimado seis años antes.

Tiene un interés especial comparar el diseño del puente finalmente erigido con el que atravesaba el Rhin entre Duisburg-Ruhrort y Homberg diseñado y construido en 1904, medio siglo antes, y que fue destruido durante la Segunda Guerra Mundial. Este puente era muy similar al de Richmond-San Rafael, excepto en las horriblas ondulaciones o jorobas (ver artículo del Dr. Hans Sisvers, *Der Stahlbau*, Enero 1953). Un nuevo puente fue diseñado y construido no hace mucho tiempo atrás; cumpliendo naturalmente con los principios establecidos en otros países, como se ha mencionado antes, sobre la base de un concurso público. El estilo de puente ganador demostró claramente que el diseño de 50 años de antigüedad (el estilo de doble joroba de camello que tiene el puente Richmond-San Rafael) no resulta ser un buen logro, ni económica ni estéticamente. Este nuevo tipo de puente fue de una gran inspiración para el autor respecto a su propia concepción.

El cruce del Norte de la Bahía de San Francisco fue un gran problema durante muchos años. Una de las propuestas más racionales entonces era una combinación del tráfico a través de la Bahía mediante una barrera de agua salada<sup>213</sup>, lo que hubiese mejorado notablemente las características del suministro de agua en California. Paralelamente un mayor número de vías circulación se podrían haber construido a un coste muy inferior que el de un puente. El autor defendió esta solución y fue mantenido como ingeniero consultor por la organización líder, la California Water Transit and Defense Projects, Inc. habiendo diseñado varias alternativas para este proyecto combinado, una de las cuales se muestra en la página 4. La sección típica de la barrera para 8 vías de tránsito es de 250ft [76,2m] de ancho. El aspecto en el canal es el de un puente superpuesto de hormigón armado, con una luz de 600ft [182,88m] y una estructura de dos niveles. El mismo tipo de puente se utiliza para las

---

<sup>213</sup> Saltwater barrier: Barreras construidas en zonas de desembocadura de ríos para evitar la progresión del agua salada hacia el interior. Suelen aprovecharse como vías de circulación elevadas sobre el agua.

aproximaciones. El problema del tránsito rápido se resolvió en 1952 por medio del monorraíl (Fig. 5), una idea que ahora está teniéndose en cuenta para toda el área de la Bahía.

Nosotros esperamos que el caso del puente Richmond-San Rafael sea una seria advertencia en el futuro y que la estética de puentes y cualquier otra construcción de uso público sea mucho más valorada. Además del profesor Stephen C. Pepper, también la valiente crítica de Mr. William Wuster debe mencionarse. Mr. Wuster, decano de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de California, Berkeley, la universidad más grande de los Estados Unidos, envió una carta muy cortés al Sr. Raab de la Autoridad de Puentes de Peaje el 16 de Octubre de 1956, en la cual expresaba sus dudas acerca del diseño del nuevo puente y también su esperanza de que las futuras estructuras de California pudiesen tener el beneficio de una verdadera colaboración entre todos los profesionales involucrados en las mismas. El Profesor Wuster piensa que "...ningún arquitecto haya podido invertir una gran parte de su tiempo en el diseño de este puente porque, si hubiese sido así, este no tendría el aspecto que tiene. En mi carta al Sr. Raab me refiero a este aspecto como una "calamidad visual"."

La única debilidad de todas estas críticas es que las mismas fueron expresadas después de que uno de los puentes más caros se haya terminado de construir. Esta "calamidad visual" no hubiese ocurrido si las autoridades responsables hubiesen accedido a algunas sugerencias enviadas por el autor.

### A.3 Technocracy and the Engineer

Nuestra época está plagada de portentos. Impulsados por la ciencia estamos literalmente impulsados hacia el futuro. Incluso ahora los estrechos límites de la Tierra dan paso a un espacio exterior tan extenso que nadie puede ni adivinar siquiera sus límites. Día a día las cosas conocidas cambian de forma, desaparecen, dando paso a nuevas maravillas. Nunca como ahora la vida ha sido tan rápida, concentrada y regulada.

Por encima de todo, nuestra civilización está sometida a una nueva organización. Ineludiblemente, dicha organización está acompañada con la estructura basada en las máquinas sobre las que nos posamos. Nunca más desafiaremos a las máquinas ni buscaremos limitarlas ni intentar escapar de ellas. Porque hoy sabemos que: No Hay Vuelta Atrás. Realmente, esos nuevos descubrimientos científicos comprenden una gran variedad de desarrollos revolucionarios, mucho mayor que en toda la historia anterior de la raza humana. Es imposible detener la marea de este rápido avance. Un nuevo mundo está formándose.

Animado por el crecimiento, el mundo actual pivota sobre el eje del cambio. Junto a este cambio épico hace acto de presencia su nueva arquitectura. Debajo de mecanizaciones y de nuevas libertades... debajo del acero y en espacios cerrados por acero...descansa la nueva provincia de la arquitectura. Forjada por el arsenal de una tecnología sin precedentes, marcha codo con codo junto a los descubrimientos científicos. Nuestros edificios son parte de la vida misma, cambiando constantemente de propósitos y de métodos. Esas nuevas formas de las edificios son, a su manera, visualizaciones del pensamiento de nuestro tiempo: un pensamiento nunca divorciado de las tecnologías. En lo inmediato es la mayor fuente de una era totalmente nueva para la construcción. Y el mundo ansía esta nueva arquitectura, con sus raíces hondamente enterradas en la ciencia exacta de los ingenieros.

En esta época tenemos una manera muy especial de observar las construcciones. El hábito de nuestra visión actual ve más allá del aspecto exterior, va al interior de esos *organismos*, que el aspecto exterior oculta y protege. Sus esqueletos, sean de madera, piedra, hormigón o acero... el ordenamiento de las formas y los espacios dentro del mismo... incluso las venas mecánicas que los alientan con calor, electricidad y agua... todo ello entra en nuestra aprehensión de una construcción moderna.



En este tiempo son esenciales tanto su forma como lo son los arreglos de la configuración exterior, la disposición de los planos, el color, texturas y siluetas de los muros. Es esta idea de un orden orgánico la que señala el comienzo de una nueva era para la arquitectura, basada en las nuevas tecnologías.

En conexión con esto es interesante leer el siguiente fragmento: "... ya "esos ingenieros" en sus concepciones estructurales raramente están guiados por las leyes eternas de la Naturaleza. Tome por ejemplo las telarañas (telas de araña) que deberían estudiarse por un ingeniero para resolver importantes problemas de diseño de redes bi- y tridimensionales y de puentes en suspensión...."

Estas son las palabras del Dr. J. J. Polivka, ingeniero consultor de estructuras de Berkeley, California. Es un extracto de una carta del ingeniero a su amigo, Frank Lloyd Wright. Entre los edificios mejor conocidos de los que el Dr. Polivka ha sido el arquitecto está el Grain Exchange Building en Rotterdam, de hormigón y cubierta de vidrio, destruido en la Segunda Guerra Mundial y reconstruido recientemente. Actualmente es el ingeniero estructural del revolucionario Guggenheim Museum de Frank Lloyd Wright en Nueva York y la mayor referencia en la Torre de la Investigación de Johnson, en Racine, Wisconsin

Siendo una autoridad en diseños de estructuras complejas, estructuras de láminas y placas, puentes, edificios industriales y en nuevas aplicaciones de materiales estructurales, el Dr. Polivka ha estado involucrado en las actividades de ingeniería durante más de tres décadas. A lo largo de toda Europa, un gran número de trabajos de ingeniería y estructuras están asociados a su nombre. Puentes y edificios industriales en Suiza, Italia, Francia, Bélgica, Holanda y otros lugares llevan el sello de la técnica del Dr. Polivka. Sus clases y conferencias acerca de los nuevos materiales estructurales y los nuevos principios estructurales en París y Londres han tenido una influencia de muy largo alcance en la construcción contemporánea. En el último invierno ha sido profesor visitante en la Universidad de Stanford y por primera vez el curso titulado *Architectural Structures*<sup>214</sup> fue incluido en el currículo del Departamento de Arquitectura de dicha Universidad.

La reputación del Dr. Polivka como arquitecto e ingeniero de puentes de hormigón y edificios de hormigón y cristal está extendida por todo el mundo. Junto con Frank Lloyd Wright, es el autor de la propuesta para el Butterfly-Wing Bridge en la Bahía

---

<sup>214</sup> Estructuras arquitectónicas

de San Francisco. Nos afirma que este diseño, sería de mayor duración, más barato y simple de construir que las estructuras de acero que se han propuesto. Además, y esto resulta un punto muy importante para Mr Wright, este diseño facilitaría la expansión en diversas direcciones de tal manera que "la gran ciudad tendría una descentralización moderna y correcta".

La belleza es un elemento muy importante para los diseñadores Wright y Polivka, quienes piensan que las estructuras de hormigón son más simples y adecuadas al entorno natural que las formas antiguas. Al menos dos puentes serían viables con el gasto de cualquiera de los otros proyectos. Ambos puentes añadirían una belleza tranquila a la gran ciudad de San Francisco y a las comunidades del Este de la Bahía.

No puede haber una negación de la potencia de las nuevas formas de las construcciones así como al rápido reconocimiento de la belleza inherente de los mismos por parte del público contemporáneo. Para estas formas que contienen la fuerza del futuro podemos afirmar: ni la mera edad es el criterio ni la acumulación de materias la sustancia de la belleza. Para las mentes contemporáneas, la modernidad de los diseños incluye la posibilidad de una belleza que contenga un mayor significado. Y nosotros estamos despertando a esta nueva realidad.

Estos edificios que hoy nos cautivan contienen un elemento de descubrimiento, de expectativa. Esta utilización de nuevos materiales y técnicas, acero, hormigón, paneles de vidrio, instalaciones hechas con máquinas, agita nuestra imaginación. Nuestro interés sigue sus orígenes y los desarrollos hacia nuevos propósitos. Más aún, nuestra atención queda detenida en ellos.

¿No están los habitantes de nuestras ciudades mirando continuamente las masas crecientes de los nuevos edificios? Cada vez más sentimos la fascinación proveniente de esas estructuras. Estas estructuras empujan nuestra imaginación: pocos ven posible escapar de ese momento de maravilla a la vista de algún esqueleto recién levantado, algún puente, alguna torre o incluso alguna calle que de alguna manera cambia bajo nuestra mirada.

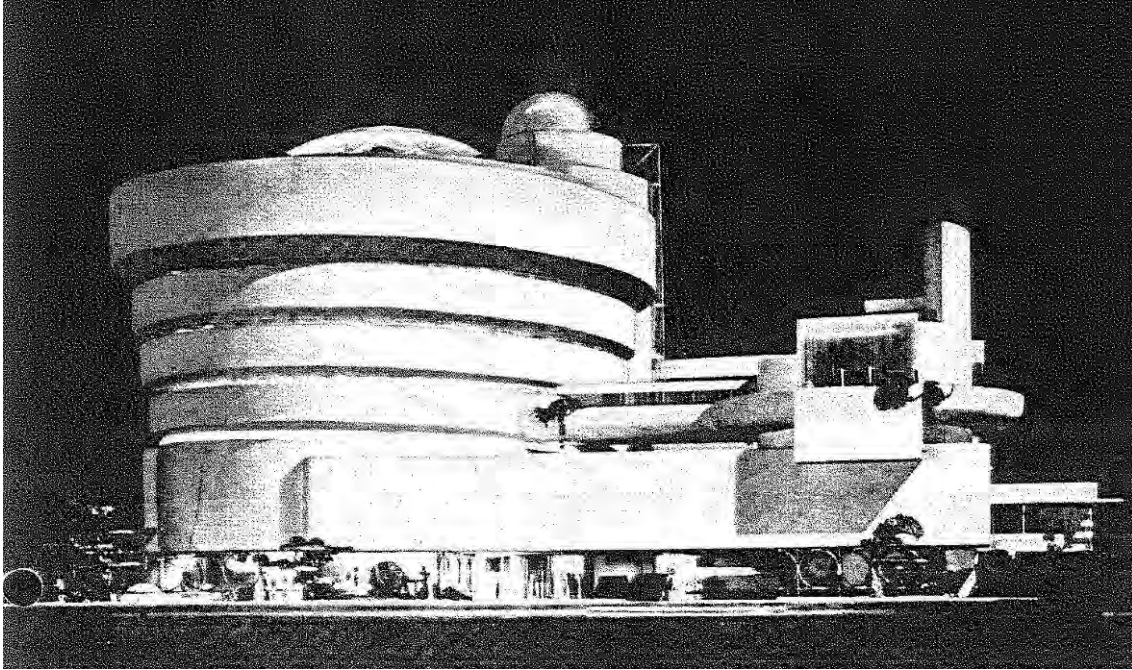
Y es aquí, en su desnudez, durante el proceso de construcción, que la pura belleza de la ingeniería puede apreciarse. En la estricta honestidad de su anatomía de acero y hormigón, permanecen como símbolos del mundo que viene. De una fuerza honesta y pura, esas estructuras denotan unidad, dirección y solidez. Inmediatamente revelan las maravillas de la manipulación del espacio por el ingeniero contemporáneo... de

esos nuevos espacios, cerrados por delgadas membranas colgadas de marcos metálicos. Esta es la consecuencia del poder de la ingeniería moderna, un importante medio del complejo arte de la arquitectura.

Por encima de todo, esas estructuras exhiben, en sus formas, eventos e intereses más amplios que los contenidos entre sus muros. Sostienen frente a nosotros, como a través de un espejo, nuestra siempre ascendente idea de la sociedad humana en sí misma como teniendo una calidad orgánica. Con creciente claridad vemos el principio de la arquitectura como un arte expresivo, relevante para la genuina cultura de este tiempo.

Este reconocimiento gana impulso a medida que nuestra época crece con una mentalidad más moderna. De una carta que envió el Dr. Polivka a Frank Lloyd Wright hace unos 5 años atrás citamos lo siguiente: *"...hallo una gran satisfacción en sus palabras de que el trabajo que yo he hecho y haré para la Modern Gallery de New York será de gran ayuda para usted. Yo espero y tengo confianza en que este bello edificio sea erigido en un futuro muy cercano, no solo como un eterno monumento a su inventiva sino también como un testimonio histórico de que el liderazgo de la ciencia y técnica norteamericanas se han extendido también al Arte y la Arquitectura."*

Hoy los trabajos de la Modern Gallery en New York han comenzado y aguardamos el día de su finalización. Erigida por el pensamiento y sentimiento de nuestro tiempo, con las grandes ideas creativas y técnicas de sus diseñadores, su rol vital continuará a través de los años, incluso en la Ciudad del Mañana. Nuestra fe y nuestra ciencia se hallan en ella. Sobre estos cimientos han sido construidas las tradiciones de todas las grandes arquitecturas.



*Maqueta del Guggenheim Museum.*

*Una visión de los edificios más atrevidos de la carrera de Frank Lloyd Wright. La inusual estructura comprende ocho niveles de rampa enrollados en forma de espiral longitudinal. Al Dr. Polivka le fue encargado, por el afamado arquitecto, realizar el análisis estructural del revolucionario edificio, donde la parte principal está formada por múltiples rampas de hormigón armado, coronado por una cúpula de vidrio. El intrincado diseño incluye un análisis meticuloso corroborado mediante modelos experimentales de análisis tensionales, basado en aproximadamente 5.000 tomas de medidas de deformaciones.*



# **Anexo B**

## **Bibliografía**

---



## B.1 Bibliografía sobre Frank Lloyd Wright

- BROOKS PFEIFFER, Bruce  
KRENS, Thomas  
*The Solomon R. Guggenheim Museum*  
Guggenheim Publications.  
New York 2001
- BROOKS PFEIFFER, Bruce  
*Frank Lloyd Wright*  
Frank Lloyd Wright Foundation,  
Scottsdale, Arizona 1991  
Traducción de José García Pelegrin,  
Köln 1994 Ed. Taschen
- BROOKS, H.Allen  
*Wright y la destrucción de la caja.*<sup>1</sup>  
Del libro Frank Lloyd Wright. Edición a  
cargo de José Ángel Sanz Esquide,  
Barcelona 1990 Ed. Stylos
- CASTRO CHICOT, José Ramón  
*Frank Lloyd Wright y el Guggenheim*  
*Museum*  
Tesis doctoral. ETSAB. Universidad  
Politécnica de Cataluña.  
Barcelona 2000
- DAL CO, Francesco  
*Il tempo e l'architetto. Frank Lloyd*  
*Wright e il Guggenheim Museum*  
Ed. Electa, Milano 2004
- FRIED, H.  
*Aus dem Lebenswerke eines Architekten*  
Alemania 1926
- FRAMPTON, Kenneth  
*Modernization and mediation: Frank*  
*Lloyd Wright and the impact of*  
*technology*  
Artículo del catálogo de la exposición  
sobre Wright en el MOMA en 1994:  
Frank Lloyd Wright, Architect
- HITCHCOCK, Henry-Russell  
*Frank Lloyd Wright y la tradición*  
*académica de principios de la década de*  
*1890.*  
Del libro Frank Lloyd Wright. Edición a  
cargo de José Ángel Sanz Esquide,  
Barcelona 1990 Ed. Stylos
- HOFFMANN, Donald  
*Frank Lloyd Wright, Louis Sullivan*  
*and the skyscraper*  
Dover Publications, Mineola New York  
1998
- LIPMAN, Jonathan  
*Frank Lloyd Wright and the Johnson*  
*Wax Buildings*  
Ed. Rizzoli, New York 1986
- LEVINE, Neil  
*Frank Lloyd Wright: proyectar en*  
*diagonal.*  
Del libro Frank Lloyd Wright. Edición a  
cargo de José Ángel Sanz Esquide,  
Barcelona 1990 Ed. Stylos
- LEVINE, NEIL.  
*“La creación de una comunidad a partir*  
*de la cuadrícula. El plano de manzana*  
*de cuatro casas y el origen de la casa de*  
*la pradera de Wright”.*  
Fragmento del libro Frank Lloyd  
Wright editado con motivo de la  
exposición del 50 aniversario del  
Guggenheim y de su muerte. 2009
- LEVINE, NEIL.  
*The Architecture of Frank Lloyd*  
*Wright*  
Princeton University Press, New Jersey  
1996
- MUSKAT, Barry A.  
*Engineering the Organic, an*  
*investigation into the Collaboration of*  
*Jaroslav Joseph Polivka and Frank*  
*Lloyd Wright.*  
Tesis doctoral Universidad del Estado  
de New York en Buffalo. 2000

---

<sup>1</sup> Los títulos subrayados son los que se referencian explícitamente a lo largo de la tesis



- QUINAN, Jack  
*"L'ingegneria e gli ingegneri di Frank Lloyd Wright."*  
 Casabella, abril 1988. Págs. 42-53
- ROWE, Colin  
*La estructura de Chicago.*  
 Del libro Frank Lloyd Wright. Edición a cargo de José Ángel Sanz Esquide  
 Ed. Stylos, Barcelona 1990
- SACRISTE, Eduardo  
*Frank Lloyd Wright. "Usonia"*  
 Ed. CP 67, Buenos Aires 1976
- SCULLY, Vincent  
*Frank Lloyd Wright*  
 Ed. Bruguera, Barcelona 1961
- SCULLY, Vincent  
*Frank Lloyd Wright y la estrofa de los sueños.*  
 Del libro Frank Lloyd Wright. Edición a cargo de José Ángel Sanz Esquide,  
 Barcelona 1990 Ed. Stylos
- TREIBER, Daniel  
*Frank Lloyd Wright.*  
 Ed. Akal. Madrid 1995
- TROMBETTI, Tomaso  
*Come è stato costruito il Guggenheim Museum di Frank Lloyd Wright*  
 Revista Casabella n° 760, noviembre 2007. pgs 48-61
- VV.AA.  
*Architectural Forum. Frank Lloyd Wright*  
 Enero 1946.
- VV.AA.  
*The Making of the Modern Museum. Frank Lloyd Wright*  
 Guggenheim Museum Publications 2009
- VV.AA.  
*Frank Lloyd Wright*  
 Catalogo de la exposición Frank Lloyd Wright 23 de mayo 2009 – 14 de febrero 2010. Guggenheim Museum New York y Museo Guggenheim Bilbao. 2009
- VV.AA.  
*The Solomon R. Guggenheim Museum*  
 The Solomon R. Guggenheim Foundation, New York 1995
- WRIGHT, F.LL.  
*Frank Lloyd Wright Volume 1 (1887-1901)*  
 Prólogo de Bruce Brooks Pfeiffer.  
 Taliesin West 1986
- WRIGHT, F.LL.  
*Frank Lloyd Wright Volume 2 (1902-1906)*  
 Prólogo de Bruce Brooks Pfeiffer.  
 Taliesin West 1986
- WRIGHT, F.LL.  
*Frank Lloyd Wright Volume 3 (1907-1913)*  
 Prólogo de Bruce Brooks Pfeiffer.  
 Taliesin West 1986
- WRIGHT, F.LL.  
*Frank Lloyd Wright Volume 4 (1914-1923)*  
 Prólogo de Bruce Brooks Pfeiffer.  
 Taliesin West 1986
- WRIGHT, F.LL.  
*Frank Lloyd Wright Volume 5 (1924-1936)*  
 Prólogo de Bruce Brooks Pfeiffer.  
 Taliesin West 1986
- WRIGHT, F.LL.  
*Frank Lloyd Wright Volume 6 (1937-1941)*  
 Prólogo de Bruce Brooks Pfeiffer.  
 Taliesin West 1986
- WRIGHT, F.LL.  
*Frank Lloyd Wright Volume 7 (1942-1950)*  
 Prólogo de Bruce Brooks Pfeiffer.  
 Taliesin West 1986
- WRIGHT, F.LL.  
*Frank Lloyd Wright Volume 8 (1951-1956)*  
 Prólogo de Bruce Brooks Pfeiffer.  
 Taliesin West 1986

WRIGHT, F.LL.

*Autobiografía 1867-1944*

Traducción de José Avedaño. Ed. El croquis. Barcelona 1998

WRIGHT, F.LL.

*La ciudad viviente*

Compañía General. Buenos Aires 1961

WRIGHT, F.LL.

*The drawings of Frank Lloyd Wright*

Museum of Modern Art

Horizon Press, New York 1962

Prólogo de Arthur Drexler

WRIGHT, F.LL.

*Frank Lloyd Wright Writings (1894-1959)*

Taliesin West 1986

WRIGHT, F.LL.

*Frank Lloyd Wright ausgeführte*

Alemania 1910-11

WRIGHT, F.LL.

*"The Modern Gallery"*, Architectural

Forum, enero 1946. Pág. 82

## B.2 Bibliografía sobre teoría formal de las estructuras

- AGUILÓ ALONSO, Miguel.  
*“Invariantes estéticos de la Ingeniería Civil”*.  
Revista de Obras Públicas, octubre 2002. Págs. 59 a 68
- AGUILÓ ALONSO, Miguel  
*Estructuras para edificios singulares españoles*  
ACS Madrid 2008
- ALLEN, Eduard - ZALEWSKI, Waclaw  
*Form and Forces: Designing Efficient, Expressive Structures*  
Ed. John Wiley and Sons Ltd, United Kingdom, 2009
- ARAUJO ARMERO, Ramón  
*La arquitectura como técnica (1)*  
Ed. A.T.C. Madrid 2007
- BASEGODA, Buenaventura  
*“Tres titans del hormigón armado: Torroja, Freyssinet, Le Corbusier”*  
Revista de Obras Públicas, abril 1966. Págs. 241 a 254
- BECHER, Bernd - BECHER, Hilla  
*Typologies of Industrial Buildings*  
The MIT Press, Cambridge 2003
- BILLINGTON, David P.  
*The tower and the bridge. The new art of structural engineering*  
Princeton University Press 1983
- BONET CORREA, Antoni y otros  
*La polémica ingenieros-arquitectos en España: Siglo XIX*  
Colegio de Ingenieros de Madrid 1985
- BRUFAU, Robert  
*Entendre les estructures a l'edificació*  
Escola Sert. C.O.A.C. Barcelona. 2001
- BRUFAU, Robert  
*Apuntes de Estructuras I*  
Escuela de Arquitectura del Vallès. U.P.C. Barcelona. 1979-1998
- BRUFAU, Robert  
*Rehabilitar con Acero*  
Apta. Madrid. 2010
- BUCKMINSTER FULLER, Richard  
*Your private sky*  
Lars Muller Publishers. 1999
- CARDELLACH, FÉLIX  
*Filosofía de las estructuras*  
Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona 1970. 1ª ed. 1911
- CHARLESON, Andrew  
*La estructura como arquitectura. Formas, detalles y simbolismo*  
Ed. Reverté, Barcelona 2007
- CHURTICHAGA, Jose María  
*“La estructura veloz”*  
Revista Consejo Superior Colegios Arquitectos de España, marzo 2008.
- DREXLER, Arthur  
*Twentieth Century Engineering*  
The Museum of Modern Art, New York 1964
- DU SAUTOY, Marcus  
*Simetrías, un viaje por los patrones de la naturaleza*  
Ed. Acantilado 2009
- ENGEL, Heino  
*Sistemas de estructuras*  
Ed. Gustavo Gili, Barcelona 2002
- ESCRIG, Félix  
*Las grandes estructuras del Renacimiento y el Barroco*  
Universidad de Sevilla 2002
- FAIRWEATHER, Virginia  
*Expressing structure. The technology of large-scale buildings*  
Ed. Birkhäuser, Basel 2004
- FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, José Antonio.  
*“Lo ligero y lo barroco en la ingeniería de los años 30”*.  
Revista de Obras Públicas, junio 2000. Págs. 36 a 37

- FERNANDEZ TROYANO, Leonardo  
*“Arquitectos e ingenieros, historia de una relación”*  
 Revista de Obras Públicas, noviembre 2005. Págs. 45 a 54
- FORNIES, Lorenzo S.  
*“Del arquitecto filósofo al ingeniero constructor. Un debate sobre el Arte y la Ciencia en el Siglo XIX”.*  
 Revista de Obras Públicas, enero 1983. Págs. 29 a 31
- FRAMPTON, Kenneth,  
*“Studies in Tectonic Culture: The poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture”*  
 1995
- FRANCIS, A.J.  
*Introducing Structures*  
 Pergamon Press. 1980
- GATZ, Konrad – WIESCHEMANN, Paul G.  
*Edificios de hormigón*  
 Ed. Gustavo Gili. Barcelona 1969
- GORDON, J.E.  
*Estructuras o por qué las cosas no se caen*  
 Celeste Ediciones. Madrid 1999
- GUZMAN, Miguel de  
*Estructuras fractales y sus aplicaciones*  
 Ed. Labor. Barcelona 1993
- HUNT, Tony.  
*Tony Hunt’s Structures Notebook*  
 Oxford 1997
- JOEDICKE, Jurgen.  
*Estructuras en voladizos y cubiertas*  
 Ermes. Mexico DC 1967
- KORNACKER, Frank J.  
*“Structural design. The frame and floor structure. Design principle”.*  
 Parte III del libro *Floor-Ceilings and service systems in multi-story buildings.*  
 National Academy of Sciences – National Research Council., Washington D.C. 1955
- LIN, T.Y. – STOTESBURY, S.D.  
*Structural Concepts and Systems*  
 Van Nostrand Reinhold. 1988
- LYALL, Sutherland  
 Maestros de la estructura. Ingeniería en las edificaciones innovadoras  
 Ed. Blume, Barcelona 2002
- MACHIMBARRENA, Vicente.  
*“Arquitectura e ingeniería”.*  
 Revista de Obras Públicas, enero 1924. Págs. 17 a 21
- MAINSTONE, R.J.  
*Developments in structural form*  
 Penguin Books. 1983
- MANTEROLA, Javier.  
*“Arquitectos-Ingenieros. El futuro de los puentes”.*  
 Revista de Obras Públicas, junio 1997. Págs. 17 a 32
- MARGOLIUS, IVAN,  
*Architects + Engineers = Structures*  
 Wiley-Academy. London 2002
- MONEO, RAFAEL  
*“La llegada de una nueva técnica a la arquitectura, las estructuras reticulares de hormigón”.*  
 Ed. ETSAB. Monografía núm. 11. Barcelona, 1.976
- MIMRAM, Marc  
*Structures et formes. Étude appliquée à l’œuvre de Robert Le Ricolais*  
 Paris 1983
- NICOLÁS, Dora.  
*“Ingeniería y Arte. Vivir los tipos estructurales”.*  
 Revista de Obras Públicas, noviembre 1994. Págs. 55 a 65
- NERVI, PierLuigi  
*Aesthetics and technology in building: the charles eliot norton lectures, 1961-1962*  
 Harvard University Press  
 Cambridge Massachusetts , 1965

- PASTO, Daniel J. – JOHNSON, Carl R.  
*Determinación de estructuras orgánicas*  
Ed. Reverté cop. Barcelona 1981
- PETROSKI, Henry  
*To engineer is human. The role of failure in successful design.*  
St. Martin's press. New York
- RESAL, Jean.  
*“Consideraciones sobre la estética de las construcciones metálicas”.*  
Revista de Obras Públicas, enero 1919.  
Págs. 488 a 494
- RICE, Peter  
*Un ingeniero imagina.*  
Cinter divulgación técnica. Madrid 2009
- RUSKIN, JOHN,  
*Las siete lámparas de la arquitectura (The seven Lamps of Architecture)*  
Colección Tratados, Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia. 1989. Edición original Londres 1849
- SALVADORI, Mario  
*Why buildings stand up? The Strength of Architecture.*  
W.W. Norton & Co. New York 1990
- SALVADORI, Mario– LEVI, Matthys  
*Why buildings fall down? The Strength of Architecture.*  
W.W. Norton & Co. New York 1994
- SALVADORI, Mario – HELLER, Robert  
*Estructuras para arquitectos. (Structure in architecture)*  
CP67, Buenos Aires 1986
- SALVADORI, Mario – HELLER, Robert  
*Structural Design in Architecture (Diseño Estructural en Arquitectura)*  
Prentice Hall 1981
- SHODEK, Daniel L.  
*Structures*  
Prentice Hall. 1980
- SIEGEL, Curt  
*Formas Estructurales en la Arquitectura Moderna.*  
Compañía Editorial Continental. México. 1966
- TORROJA, Eduardo  
*Razón y ser de los tipos estructurales.*  
Instituto Eduardo Torroja. Madrid 1957
- TORROJA, Eduardo  
*Las estructuras de Eduardo Torroja.*  
Ministerio de Fomento. Madrid 1999
- WALTHER, René  
*Construire en béton, synthèse pour architectes.*  
Presses polytechniques et universitaires romandes. Paris 1993
- VIRGOLEUX, Michel  
*“Sobre la estructura y la arquitectura de los puentes”*  
Revista de Obras Públicas, diciembre 1995. Págs. 23 a 32
- VVAA,  
*L'art de l'ingénieur. Constructeur, entrepreneur, inventeur*  
Éditions du Centre Georges Pompidou. Paris 1997
- VVAA,  
*The Builders. Marvels of Engineering*  
National Geographic Society. Washington DC 1992
- ZANNOS, Alexander  
*Form and structure in architecture. The role of statical funtion*  
Van Nostrand Reinhold. New York 1987
- VV.AA.  
*Components and Systems: Modular Construction Design, Structure, New Technologies*  
Ed. Birkhäuser, Basel 2009

### B.3 Bibliografía sobre teoría de la arquitectura y monografías de arquitectos e ingenieros.

- AALTO, Alvar  
*The complete works*  
Ed. Birkhäuser, Basel 1985
- AGUILÓ ALONSO, Miguel y otros  
*Javier Manterola. Pensamiento y obra*  
Fundación ESTEYCO, Madrid 2004
- BANHAM, Reyner  
*La Atlántida de hormigón*  
Ed. Nerea, Madrid 1989
- BASSEGODA, Joan  
*Modernisme a Catalunya*  
Edicions de Nou Art Thor. Barcelona 1988
- BILLINGTON, David P.  
*Robert Maillart: Builder, Designer and Artist*  
Cambridge University Press,  
United Kingdom, 2008
- BILLINGTON, David P.  
*Robert Maillart's bridges*  
Princeton University Press, 1989
- BOESIGER, Willy – GIRSBERGER, Hans  
*Le Corbusier 1910-65*  
Ed. Birkhäuser, Basel 1967
- BUCCI, Federico  
*L'Architetto di Ford. Albert Kahn e il progetto della fabbrica moderna.*  
Milano CittàStudi 1991
- BUCKMINSTER FULLER, Richard  
*Your Private Sky*  
Lars Müllers Publishers, Baden 1999
- CARTER, Peter  
*Mies van der Rohe at Work*  
Ed. Phaidon. 1974. Reedición 2006
- CONRAD, Roland  
*Frei Otto, estructuras, estudios y trabajos sobre la construcción ligera*  
Edición a cargo de Francesc Albardané y Felix Candela. Ed. Gustavo Gili. Barcelona 1973.
- DIESTE, Eladio  
*Eladio Dieste, Frei Otto. Esperienze di architettura generazionia confronto.*  
Edición a cargo de Luca Gazzaniga. Skira. Milano 1998
- DIESTE, Eladio  
*Eladio Dieste. 1943-1996*  
Dirección general de Arquitectura y Vivienda. Sevilla-Montevideo 2001
- DREXLER, Arthur  
*Transformaciones en la arquitectura moderna*  
Ed. Gustavo Gili, Barcelona 1982
- FERNANDEZ ORDOÑEZ, José Antonio  
*Eduardo Torroja Ingeniero*  
Ed. Pronaos, Madrid 1999
- FERNANDEZ ORDOÑEZ, José Antonio  
*Eugène Freyssinet.*  
Ed. Grupo 2c, Barcelona 1979
- GAUDÍ, Antonio  
*Antonio Gaudí 1852-1926 Antología contemporánea.*  
Ed. Juan José Lahuerta. Madrid 2002
- GIRALT – MIRACLE  
Gaudí, la recerca de la forma  
Luweg editores, Barcelona 2002
- GIURGOLA, Romualdo  
*Louis I. Kahn*  
Ed. Gustavo Gili. Barcelona. 1992
- GLAESER, Ludwing  
*The work of Frei Otto and his teams 1955-1976.*  
Stuttgart Institut für leichte Flächentragwerke. 1977
- WALTER GROPIUS  
*Alcances de la arquitectura integral*  
Ediciones la Isla. Buenos Aires 1959
- HITCHCOCK, Henry-Russell  
*Arquitectura de los siglos XIX y XX*  
Ediciones Cátedra, Madrid 1985

- KAHN, Louis I.  
*The Construction of the Kimbell Art Museum*  
Skira Editore, Milan 1999
- KAUFMANN, Emil  
*De Ledoux a Le Corbusier. Origen y desarrollo de la arquitectura autónoma*  
Ed. Gustavo Gili, Barcelona 1982
- KOMENTDANT, August E.  
*18 años con el arquitecto Louis I. Kahn*  
Edición a cargo de Fernando Agrasar.  
Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia. 2000
- KULTERMANN, Udo  
*Kenzo Tange*  
Praeger Publishers, New York, 1970
- LE CORBUSIER  
*Hacia una arquitectura*  
Ed. Poseidón, Buenos Aires 1964  
1ª Edición *Vers une architecture*, 1923
- LE CORBUSIER  
*El espíritu nuevo en arquitectura. En defensa de la arquitectura*  
COAATM, Madrid 1983
- LE CORBUSIER  
*"Ciencia y Vida"*,  
Artículo publicado en 1960
- LEMOINE, Bertrand.  
*Gustave Eiffel*  
Ediciones Akal, Madrid 2002
- LOBELL, John.  
*Between Silence and Light: Spirit in the Architecture of Louis I. Kahn*  
Shambhala Publications, US 2008
- MENDELSON, Erich.  
*Amerika: Bilderbuch eines Architekten*  
Editorial Rudolf Mosse, Berlín 1926
- MIES VAN DER ROHE, Ludwig  
*Escritos, diálogos y discursos*  
COAATM, Madrid 1982
- MILNER, John  
*Vladimir Tatlin and the Russian Avant-Garde*  
Yale University Press, 1983
- NERVI, PierLuigi  
*Buildings, projects, structures 1953-1963*  
Praeger Publishers  
New York, 1963
- OTTO, Frei  
*Cubiertas colgantes*  
Edición a cargo de Francisco Folguera.  
Ed. Labor. Barcelona 1962.
- OTTO, Frei  
*Arquitectura adaptable*  
Ed. Gustavo Gili. Barcelona 1979.
- OTTO, Frei  
*Bionique architecture et constructions naturelles*  
Denges Delta et Spes. 1985.
- PALLASMAA, Juhani  
*Animales arquitectos : el funcionamiento ecológico de las construcciones animales*  
Fundación Cesar Manrique, Lanzarote 2003
- RAMÍREZ, Juan Antonio  
*Cómo escribir sobre arte y arquitectura*  
Ediciones del Serval, Barcelona 1996
- SERRAINO, Pierluigi  
*Saarinen*  
Ed. Tachen, Londres 2009
- STEADMAN, Philip  
*Arquitectura y naturaleza: Las analogías biológicas en el diseño*  
Ed. Blume, Madrid 1982
- SULZER, Peter  
*Jean Prouvé. Oeuvre complète Vol 1. 1917-1933*  
Birkhäuser Publishers for Architecture.  
Basel 2000
- SULZER, Peter  
*Jean Prouvé. Oeuvre complète Vol 2. 1934-1944*  
Birkhäuser Publishers for Architecture.  
Basel 2000

TORRES ARCILLA, Martha

*Puentes.*

Atrium 2002

VOSTELL, Wolf. – HIGGINS, Dick

*Fantastic Architecture*

Ed. Something Else, NY 1969.

VV.AA.

*Félix Candela. Arquitecto*

Ed Reverté, Madrid 1994

VV.AA.

*El Barroco. Arquitectura, escultura,  
pintura*

Ed Ullmann & Könemann, Colonia

2004

VV.AA.

*El Neoclasicismo y Romanticismo*

Ed Ullmann & Könemann, Colonia

2004

WAINWRIGHT, Stephen

*Diseño mecánico en organismos*

Ed. Blume, Madrid 1980

WITTFOHT, Hans

*Puentes. Ejemplos internacionales*

Ed. Gustavo Gili, Barcelona 1975

ZEVI, Bruno

*El lenguaje moderno de la arquitectura*

Ed. Poseidón, Barcelona 1978



#### B.4 Bibliografía sobre análisis y estructuras.

CARRILLO, Agustín – LLAMAS,  
Inmaculada  
*Maple V. Aplicaciones matemáticas  
para PC*  
Ed. Ra-ma. Madrid 1995

DIESTE, Eladio  
*Métodos de cálculo.*  
Dirección general de Arquitectura y  
Vivienda.  
Sevilla-Montevideo 2001

TIMOSHENKO, Stephen P.  
*History of Strength of Materials.*  
Dover Publications, Inc. New York

TIMOSHENKO, Stephen P.  
*Resistencia de Materiales Tomo I*  
Espasa-Calpe. Madrid 1957

TIMOSHENKO, Stephen P.  
*Resistencia de Materiales Tomo II*  
Espasa-Calpe. Madrid 1967

TIMOSHENKO, Stephen P.  
*History of Strength of Materials*  
McGraw-Hill Book Company. New  
York 1953

TIMOSHENKO, Stephen P. - YOUNG  
*Teoría de las estructuras*  
Urmo S.A. de ediciones. Madrid 1974

TIMOSHENKO, Stephen P. –  
WOINOWSKY-KRIEGER, S.  
*Teoría de placas y láminas*  
Espasa-Calpe. Madrid 1957

ORTIZ BERROCAL, Luis  
*Resistencia de Materiales*  
Ed. Mc Graham Hill. Madrid 2002

ORTIZ BERROCAL, Luis  
*Elasticidad*  
Universidad Politécnica de Madrid,  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
Industriales de Madrid. 1985

POLIVKA, Jaroslav J.  
*Analysis of Gravity Load Stresses by  
Photoelastic Methods*  
Illinois Institute of Technology 1942

POLIVKA, Jaroslav J.  
*Experimental Strees Analysis of  
Caisson Gates in the Kaiser Shipyards,  
Richmond, California*  
Society for Experimental Strees  
Analysis in Buffalo, 1946

## B.5 Trabajos de investigación relacionados con la tesis en el ámbito de la UPC.

AL-SULTANY, Kalhed

*Half a Century after the creation*

Departamento de Composición ETSAB  
2008

MAREFAT, Mina

*Wright's Baghdad: Ziggurats and green  
visions.*

Departamento de Composición ETSAB  
2008

AZARA NICOLAS, Pedro

*Ciudad del Espejismo: Bagdad, de  
Wright a Venturi (1952-1982)*

Departamento de Composición ETSAB  
2008

GARNICA, Julio

*Broadacre City: Frank Lloyd Wright  
(1934-1935)*

Departamento de Composición ETSAB  
2006

SANCHEZ PRO, Juan

*La Escuela de Chicago o Arquitectura  
versus Estructuras*

Departamento de Estructuras ETSAB  
1983



## Índice de ilustraciones

### Parte I

<i>Portada</i>	Unité d'Habitation de Marsella	Le Corbusier	1952	Bibliografía
<i>1.1.1</i>	Catedral de Saint-Denis.		Siglo XII	Bibliografía
<i>1.1.2</i>	San Carlo alle Quattro Fontane	Francesco Borromini	1637	Bibliografía
<i>1.1.3</i>	Altes Museum	Friedrich Schinkel	1828	Bibliografía
<i>1.1.4</i>	Estación de Francia, Barcelona		Siglo XIX	Bibliografía
<i>1.1.5</i>	Edificio Fiat-Lingotto	Giacomo Mattè-Trucco	1923	Bibliografía
<i>1.1.6</i>	Villas Weissenhof	Le Corbusier	1927	Bibliografía
<i>1.1.7</i>	Lake Shore Drive Apartments	Mies van der Rohe	1951	Bibliografía
<i>1.1.8</i>	Taliesin East	Frank Lloyd Wright	1937	Bibliografía
<i>1.1.9</i>	Elevadores de grano Washburn-Crosby		1903	Bibliografía
<i>1.1.10</i>	Edificio Packard 10	Albert Kahn	1906	Bibliografía
<i>1.1.11</i>	Restaurante los Manantiales	Félix Candela	1951	Bibliografía
<i>1.2.1</i>	Arco de San Luis	Eero Saarinen	1968	Bibliografía
<i>1.2.2</i>	Torre de telecomunicaciones	Vladimir Shukhov	1922	Bibliografía
<i>1.2.3</i>	Depósito portuario Montevideo	Eladio Dieste	1979	Foto del autor
<i>1.2.4</i>	Lanificio Gatti	Pier Luigi Nervi	1952	Bibliografía
<i>1.2.5</i>	Edificio Consoni, Bilbao		1957	Foto del autor
<i>1.2.6</i>	Laboratorio de Ingeniería Ford	Albert Kahn	1925	Bibliografía
<i>1.2.7</i>	Estación de Waterloo	Nicholas Grimshaw	1993	Bibliografía
<i>1.2.8</i>	Edificio Warren Londres Petroleum	SOM	1957	<a href="http://www.som.com">www.som.com</a>
<i>1.2.9</i>	Puente Severin	Gerhard Lohmer Fritz Leonhardt	1959	Bibliografía
<i>1.2.10</i>	Puente Vecchio	Tadeo Gaddi	1345	Foto del autor
<i>1.2.11</i>	Puente Millau	Norman Foster	2004	Bibliografía
<i>1.2.12</i>	Puente Gladiolo	Zaha Hadid	2008	Bibliografía
<i>1.2.13</i>	Pasarela en Girona	Eiffel	1876	Foto del autor
<i>1.2.14</i>	Puente de Salginatobel	Robert Maillart	1930	Bibliografía
<i>1.2.15</i>	Edificio de viviendas Rue Franklin 3	August Perret	1904	Bibliografía
<i>1.2.16</i>	Ville Savoye	Le Corbusier	1929	Bibliografía
<i>1.2.17</i>	Casa del Fascio	Giuseppe Terragni	1936	Bibliografía
<i>1.2.18</i>	Edificio administrativo Johnson Wax	Frank Lloyd Wright	1939	Bibliografía
<i>1.2.19</i>	Edificio administrativo Johnson Wax	Frank Lloyd Wright	1939	Bibliografía
<i>1.3.1</i>	Unité d'Habitation de Marsella	Le Corbusier	1952	<a href="http://www.flickr.com">www.flickr.com</a>
<i>1.3.2</i>	Asamblea de Chandigarh	Le Corbusier	1961	Bibliografía
<i>1.3.3a</i>	Relación entre arquitectura e ingeniería. Le Corbusier			Bibliografía

1.3.3b	Frank Lloyd Wright explicando el concepto "tenuity"				Bibliografía
1.3.4	Sistema Dom-ino	Le Corbusier	1915		Bibliografía
1.3.5	Crown Hall	Mies van der Rohe	1956		Bibliografía
1.3.6	Galería Nacional de Berlín	Mies van der Rohe	1968		Bibliografía
1.3.7	Seagram Building	Mies van der Rohe	1957		Bibliografía
1.3.8	Rascacielos para Friedrichstrasse	Mies van der Rohe	1919		Bibliografía
1.3.9	Edificio de oficinas de hormigón armado	Mies van der Rohe	1923		Bibliografía
1.3.10	Casa rural con muros de ladrillo	Mies van der Rohe	1922		Bibliografía
1.3.11	Iglesia de Riola	Alvar Aalto	1978		Bibliografía
1.3.12	Centro Civico Seinäjoki	Alvar Aalto	1958		Bibliografía
1.3.13	Museo Kimbell	Louis Kahn	1972		Bibliografía
1.3.14	Biblioteca de la Phillips Exeter Academy	Louis Kahn	1972		Bibliografía
1.3.15	Gimnasios olímpicos Yoyogi	Kenzo Tange	1964		<a href="http://www.flickr.com">www.flickr.com</a>
1.3.16	Gimnasios olímpicos Yoyogi	Kenzo Tange	1964		<a href="http://www.flickr.com">www.flickr.com</a>
1.3.17	Palacio do Panalto	Oscar Niemeyer	1958		Bibliografía
1.3.18	Catedral de Brasilia	Oscar Niemeyer	1970		Bibliografía
1.3.19	Marin Center	Frank Lloyd Wright	1957		Bibliografía
1.3.20	Marin Center	Frank Lloyd Wright	1957		Bibliografía
1.3.21	Ennis House	Frank Lloyd Wright	1924		Bibliografía
1.3.22	Broadacre City	Frank Lloyd Wright	1932		Bibliografía
1.3.23	Metropolis	Fritz Lang	1927		Bibliografía
1.3.24	Ciudad andante	Archigram	1964		<a href="http://www.archigram.net">www.archigram.net</a>
1.4.1	Puente de ferrocarril en Estados Unidos			Siglo XIX	Bibliografía
1.4.2	Molino Romeo y Julieta. Hillside Home School	Frank Lloyd Wright	1896		Bibliografía
1.4.3	Vivienda y estudio en Oak Park	Frank Lloyd Wright	1895		Bibliografía
1.5.1	Entramado de acero en Chicago			Siglo XIX	Bibliografía
1.5.2	Casa Robie	Frank Lloyd Wright	1909		Bibliografía
1.5.3	Edificio Larkin	Frank Lloyd Wright	1902		Bibliografía
1.5.4	National Life Insurance	Frank Lloyd Wright	1924		Bibliografía
1.5.5	National Life Insurance	Frank Lloyd Wright	1924		Bibliografía
1.5.6	Lake Shore Drive Apartments	Mies van der Rohe	1951		Bibliografía
1.5.7	Plano de Chicago			Siglo XIX	Bibliografía
1.5.8	Plano de Riverside			Siglo XIX	Bibliografía
1.6.1	Hipódromo de la Zarzuela	Carlos Arniches - Eduardo Torroja	1935		Bibliografía
1.6.2	Proyecto Tindaya	Eduardo Chillida - J.A. Ordoñez			Bibliografía
1.6.3	Estructura de los Lake Shore Drive Apartments	Mies van der Rohe - Kornacker	1951		Bibliografía
1.6.4	Estructura del Museo Kimbell	Louis Kahn - A. Komendant	1972		Bibliografía

1.6.5	Shed Roff	Jean Prouvé	1950	Bibliografía
1.6.6	Unité d'Habitation de Marsella	Le Corbusier	1952	Bibliografía
1.6.7	Estructura Gimnasios olímpicos Yoyogi	Kenzo Tange - Y. Tsuboi	1964	Bibliografía
1.6.8	Estructura del Congreso Nacional de Brasil	Oscar Niemeyer - J. Cardozo	1958	Bibliografía
1.6.9	Estructura del Congreso Nacional de Brasil	Oscar Niemeyer - J. Cardozo	1958	Bibliografía
1.7.1	Jaroslav Joseph Polivka			Polivka Papers
1.7.2	Pabellón checo para la Exposición de Paris	Jaromir Krejcar - J.J. Polivka	1937	Bibliografía
1.7.3	Ensayo mediante fotoelasticidad			Bibliografía
1.7.4	Rogers Lacy Hotel	Frank Lloyd Wright	1946	Bibliografía
1.7.5	Torre de investigaciones Johnson Wax	Frank Lloyd Wright	1944	Bibliografía
1.7.6	Puente Richmond, San Rafael		1956	<a href="http://www.flykr.com">www.flykr.com</a>
1.7.7	Butterfly Wings Bridge	Frank Lloyd Wright	1947	Bibliografía

## Parte II

<i>Portada</i>	Sant Mark's Tower	1929	Bibliografía
2.1.1	Esquema preliminar de la Modern Gallery	1943	Bibliografía
2.1.2	Croquis de las intersecciones de la rampa del Guggenheim Museum	1956	Bibliografía
2.2.1	Sistema constructivo balloon frame		Dibujo del autor
2.2.2	Liberación de las esquinas en las Casas de la Pradera		Dibujo del autor
2.2.3	Iglesia Unitaria	1904	Dibujo del autor
2.2.4	Casa Ward Willitts	1902	Dibujo del autor
2.2.5	Escuela en Hillside	1901	Dibujo del autor
2.2.6	Monolithic Concrete Bank	1894	Dibujo del autor
2.2.7	Molino Romeo y Julieta. Hillside Home School	1896	Dibujo del autor
2.2.8	Esquema Edificio Larkin	1902	Dibujo del autor
2.2.9	Esquema Abraham Lincoln Center	1900	Dibujo del autor
2.2.10	Sección Abraham Lincoln Center	1900	Dibujo del autor
2.2.11	Detalle Midway Gardens	1913	Dibujo del autor
2.2.12	Sección del Hotel Imperial de Tokio	1914	Dibujo del autor
2.2.13	Esquema Butterfly Wings Bridge	1949	Dibujo del autor
2.2.14	Torre de la Milla	1956	Dibujo del autor
2.3.1	Detalle establos Edgar C. Waller y Willitts	1901	Dibujo del autor
2.3.2	Detalle establos Edgar C. Waller y Willitts	1901	Dibujo del autor
2.3.3	Esquema voladizo Casa Robie	1906	Dibujo del autor
2.3.4	Esquema en planta Poultry House Stables	1901	Dibujo del autor
2.3.5	Sección casa Andrew Porter	1911	Dibujo del autor

<i>2.3.6</i>	Casa Rouse Pauson	1939	
<i>2.3.7</i>	Encofrados Casa de la Cascada	1935	
<i>2.3.8</i>	All Steel Houses	1938	Dibujo del autor
<i>2.3.9</i>	Casa George Sturges	1939	Dibujo del autor
<i>2.3.10</i>	Esquema de la estructura de la Casa de la cascada	1935	Dibujo del autor
<i>2.3.11</i>	Esquema de la reparación de la estructura del aCasa de la cascada	1935	Dibujo del autor
<i>2.3.12</i>	Croquis de Polivka Casa Morris	1949	Polivka Papers
<i>2.3.13</i>	Croquis de Polivka Casa Morris	1949	Polivka Papers
<i>2.3.14</i>	Croquis de Polivka Casa Morris	1949	Polivka Papers
<i>2.3.15</i>	Croquis de Polivka Casa Morris	1949	Polivka Papers
<i>2.3.16</i>	Huntington Hartford Club. Esquema de equilibrio	1947	Dibujo del autor
<i>2.3.17</i>	Iglesia Ortodoxa	1956	Dibujo del autor
<i>2.3.18</i>	Morris House	1949	Dibujo del autor
<i>2.4.1</i>	Diferencia entre cuatro soportes o uno central		Dibujo del autor
<i>2.4.2</i>	Planta Stohr Arcade	1909	Dibujo del autor
<i>2.4.3</i>	Diagrama de momentos y deformada de un pórtico articulado en la base		Dibujo del autor
<i>2.4.4</i>	Símil de equilibrio entre dos bailarines		Dibujo del autor
<i>2.4.5</i>	Esquema en planta del edificio administrativo Johnson	1936	Dibujo del autor
<i>2.4.6</i>	Detalle de la articulación en la base de la columnas del edificio Johnson	1936	Dibujo del autor
<i>2.4.7</i>	Sección de los tres tipos de columnas dendriformes del edificio Johnson	1936	Dibujo del autor
<i>2.4.8</i>	Esquema de nervaduras de una hoja de Victoria Regia		Dibujo del autor
<i>2.4.9</i>	Sección de la fachada de la fábrica Pittsfield Defense Plant	1942	Dibujo del autor
<i>2.4.10</i>	Centro Civico Monona, esquema 2	1954	Dibujo del autor
<i>2.5.1</i>	Fachada del rascacielos Luxfer Prism Company	1895	Dibujo del autor
<i>2.5.2</i>	Rascacielos Press Building	1912	Dibujo del autor
<i>2.5.3</i>	Rascacielos de vidrio. Mies van der Rohe	1922	Dibujo del autor
<i>2.5.4</i>	Rascacielos para la Kemperplatz. Erich Mendelsohn	1922	Dibujo del autor
<i>2.5.5</i>	Rascacielos de vidrio, cobre y hormigón	1923	Dibujo del autor
<i>2.5.6</i>	Chicago National Life Insurance	1924	Dibujo del autor
<i>2.5.7</i>	Esquema en planta de la estructura de la Sant Mark's Tower	1929	Dibujo del autor
<i>2.5.8</i>	Esquema en planta de la estructura del Crystal heights	1939	Dibujo del autor
<i>2.5.9</i>	Esquema del sistema de cimentación mediante raíz pivotante		Dibujo del autor
<i>2.5.10</i>	Sección Rogers Hotel Lacy	1946	Dibujo del autor
<i>2.5.11</i>	Detalle del voladizo de la torre Price	1952	Dibujo del autor
<i>2.5.12</i>	Detalle del voladizo de la torre de investigaciones Johnson	1944	Dibujo del autor

2.5.13	Comparación esquemas de torre con soporte central o en el perímetro		Dibujo del autor
2.5.14	Esquema en planta de la estructura de la torre Golden Beacon	1956	Dibujo del autor
2.6.1	Observatorio para automoviles y planetario Gordon Strong. Esquema estructural en sección.	1924	Dibujo del autor
2.6.2	Esquema de la sección del Guggenheim Museum	1956	Dibujo del autor
2.6.3	Daylight Bank. Esquema estructural en sección	1947	Dibujo del autor
2.6.4	Centro Civico Civico Point Park. Esquema estructural en sección	1947	Dibujo del autor
2.6.5	Garage Kaufmann. Esquema en sección del funcionamiento estructural	1949	Dibujo del autor
2.7.1	Esquema de la estructura de la cubierta de la Iglesia unitaria	1904	Dibujo del autor
2.7.2	Viviendas económicas, a prueba de incendio, construidas con hormigón	1901	Dibujo del autor
2.7.3	Sistema block	1921	Dibujo del autor
2.7.4	Casa Freeman	1923	Dibujo del autor
2.8.1	Puente ferroviario sobre caballetes	Siglo XIX	Dibujo del autor
2.8.2	Esquema de la estructura principal de la Catedral de Acero y Vidrio	1926	Dibujo del autor
2.8.3	Estructura del Pabellón de Belmont	1956	Dibujo del autor
2.8.4	Vista interior de la estructura de Taliesin en Spring Green	1939	Dibujo del autor
2.8.5	Vista interior de la estructura de Taliesin West	1937	Dibujo del autor
2.8.6	Esquema del puente atirantado en el Centro Civico de Point Parc	1948	Dibujo del autor

### Parte III

<i>Portada</i>	Interior del Guggenheim Museum	1956	Foto del autor
3.1.1	Escalera del Monasterio de San Pedro de Cardena	Siglo XVI	Foto del autor
3.1.2	Escalera del Convento del Cristo de Tomar	Siglo XVI	Foto del autor
3.1.3	Escalera del Convento de Sto. Domingo Bonaval	Siglo XVII	Foto del autor
3.1.4	Escalera de los Museos Vaticanos. Giuseppe Momo	1932	Foto Robert Brufau
3.1.5	Fotograma de la película "La torre de los siete jorobados". Edgar Neville	1944	Bibliografía
3.1.6	Edificio Fiat-Lingotto. Giacomo Mattè-Trucco	1923	Bibliografía
3.1.7	Torre Einstein. Erich Mendelsohn	1921	Bibliografía
3.1.8	Hangares de Orly. Eugene Freyssinet	1923	Bibliografía
3.1.9	Iglesia de Notre Dame de Raincy. August Perret	1923	Bibliografía



<i>3.1.10</i>	Almacenes Chiaso. Robert Maillart	1924	Bibliografía
<i>3.1.11</i>	Rampas para pingüinos del Zoo de Londres. Berthold Lubetkin	1934	Bibliografía
<i>3.1.12</i>	Estructura del Hipodromo de la Zarzuela. Carlos Arniches - Eduardo Torroja	1935	Bibliografía
<i>3.1.13</i>	Pabellón del hormigón. Exposición Nacional de Zurich. Robert Maillart	1939	Bibliografía
<i>3.1.14</i>	Esquema de la estructura del restaurante los Manantiales. Félix Candela	1951	Bibliografía
<i>3.2.1</i>	Primer esquema del Museo. Planta de la estructura.	1943	Dibujo del autor
<i>3.2.2</i>	Primer esquema del Museo. Sección de la estructura.	1943	Dibujo del autor
<i>3.2.3</i>	Segundo esquema del Museo. Planta de la estructura.	1944	Dibujo del autor
<i>3.2.4</i>	Segundo esquema del Museo. Sección de la estructura.	1944	Dibujo del autor
<i>3.2.5</i>	Tercer esquema del Museo. Sección de la estructura.	1944	Dibujo del autor
<i>3.2.6</i>	Esquema de la Modern Gallery. Planta de la estructura.	1946	Dibujo del autor
<i>3.2.7</i>	Esquema de la Modern Gallery. Sección de la estructura.	1946	Dibujo del autor
<i>3.2.8</i>	Maqueta de la Modern Gallery	1946	Bibliografía
<i>3.2.9</i>	Esquema del Guggenheim Museum. Planta de la estructura.	1948	Dibujo del autor
<i>3.2.10</i>	Esquema del Guggenheim Museum. Sección de la estructura.	1948	Dibujo del autor
<i>3.2.11</i>	Esquema del Guggenheim Museum. Planta de la estructura.	1952	Dibujo del autor
<i>3.2.12</i>	Esquema del Guggenheim Museum. Sección de la estructura.	1952	Dibujo del autor
<i>3.2.13</i>	Esquema del Guggenheim Museum. Planta de la estructura.	1956	Dibujo del autor
<i>3.2.14</i>	Esquema del Guggenheim Museum. Sección de la estructura.	1956	Dibujo del autor
<i>3.2.15</i>	Evolución de la sección de la rampa del Museo	1944-1956	Dibujo del autor
<i>3.3.1</i>	Wright y Polivka en Taliesin	1947	Polivka Papers
<i>3.4.1</i>	Espiral cilíndrica		<a href="http://www.epsilonones.com">www.epsilonones.com</a>
<i>3.4.2</i>	Espiral cónica		<a href="http://www.epsilonones.com">www.epsilonones.com</a>
<i>3.4.3</i>	Espiral logarítmica		<a href="http://www.epsilonones.com">www.epsilonones.com</a>
<i>3.4.4</i>	Esquema del efecto de empotramiento de la rampa del Museo en el perímetro		Dibujo del autor
<i>3.4.5</i>	Maqueta realizada por Polivka para la realización de ensayos.	1946	Polivka Papers
<i>3.4.6</i>	Maqueta realizada por Polivka para la realización de ensayos.	1946	Polivka Papers
<i>3.4.7</i>	Maqueta realizada por Polivka para la realización de ensayos.	1946	Polivka Papers

<i>3.4.8</i>	Tabla de los casos de flexión de un aplaca anular. Timoshenko Woinowsky-Krieger	1940	Bibliografía
<i>3.5.1</i>	Modelo planta tipo 1943	1943	Imagen del autor
<i>3.5.2</i>	Deformaciones verticales 1943	1943	Imagen del autor
<i>3.5.3</i>	Momentos Mx y direcciones principales 1943	1943	Imagen del autor
<i>3.5.4</i>	Momentos My y direcciones principales 1943	1943	Imagen del autor
<i>3.5.5</i>	Modelo planta tipo 1946	1946	Imagen del autor
<i>3.5.6</i>	Deformaciones verticales 1946	1946	Imagen del autor
<i>3.5.7</i>	Momentos Mx y direcciones principales 1946	1946	Imagen del autor
<i>3.5.8</i>	Momentos My y direcciones principales 1946	1946	Imagen del autor
<i>3.5.9</i>	Líneas isostáticas 1946	1946	Imagen del autor
<i>3.5.10</i>	Modelo planta tipo 1952 sin barandilla ni fachada	1952	Imagen del autor
<i>3.5.11</i>	Modelo planta tipo 1952 con barandilla y fachada	1952	Imagen del autor
<i>3.5.12</i>	Deformaciones verticales sin barandilla ni fachada 1952	1952	Imagen del autor
<i>3.5.13</i>	Deformaciones verticales con barandilla y fachada 1952	1952	Imagen del autor
<i>3.5.14</i>	Momentos radiales sin barandilla ni fachada 1952	1952	Imagen del autor
<i>3.5.15</i>	Momentos radiales con barandilla y fachada 1952	1952	Imagen del autor
<i>3.5.16</i>	Momentos tangenciales sin barandilla ni fachada 1952	1952	Imagen del autor
<i>3.5.17</i>	Momentos tangenciales con barandilla y fachada 1952	1952	Imagen del autor
<i>3.5.18</i>	Líneas isostáticas sin barandilla ni fachada 1952	1952	Imagen del autor
<i>3.5.19</i>	Líneas isostáticas con barandilla y fachada 1952	1952	Imagen del autor
<i>3.6.1</i>	Alternativa con estructura metálica para el Guggenheim Museum	1946	Imagen del autor
<i>3.7.1</i>	Croquis de la planta baja del Guggenheim Museum con dimensiones	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.2</i>	Croquis de la planta primera del Guggenheim Museum con dimensiones	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.3</i>	Croquis de la sección del Guggenheim Museum con dimensiones	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.4</i>	Croquis detalle de la sección del Guggenheim Museum con dimensiones	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.5</i>	Croquis detalle de la sección del Guggenheim Museum con dimensiones	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.6</i>	Croquis detalle de la sección del Guggenheim Museum con dimensiones	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.7</i>	Nivel 0 de la estructura del Guggenheim Museum	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.8</i>	Nivel 1 de la estructura del Guggenheim Museum	1956	Dibujo del autor

<i>3.7.9</i>	Nivel 2 de la estructura del Guggenheim Museum	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.10</i>	Nivel 3 de la estructura del Guggenheim Museum	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.11</i>	Nivel 4 de la estructura del Guggenheim Museum	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.12</i>	Nivel 5 de la estructura del Guggenheim Museum	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.13</i>	Nivel 6 de la estructura del Guggenheim Museum	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.14</i>	Cubierta de la estructura del Guggenheim Museum	1956	Dibujo del autor
<i>3.7.15</i>	Modelo planta tipo 1956	1956	Imagen del autor
<i>3.7.16</i>	Deformaciones verticales 1956	1956	Imagen del autor
<i>3.7.17</i>	Momentos radiales 1956	1956	Imagen del autor
<i>3.7.18</i>	Momentos tangenciales 1956	1956	Imagen del autor
<i>3.7.19</i>	Líneas isostáticas 1956	1956	Imagen del autor
<i>3.7.20</i>	Esquema del funcionamiento de la sección de la estructura 1956	1956	Dibujo del autor
<i>3.8.1</i>	Propuesta de lucernario de la Modern Gallery 1946	1946	Dibujo del autor
<i>3.8.2</i>	Propuesta de lucernario Guggenheim Museum 1956	1956	Dibujo del autor
<i>3.8.3</i>	Propuesta de lucernario final Guggenheim Museum 1956	1956	Dibujo del autor
<i>3.8.4</i>	Vista interior del lucernario del Guggenheim Museum.	1956	Dibujo del autor
<i>3.8.5</i>	Esquema estructural del óculo del lucernario del Guggenheim Museum.	1956	Dibujo del autor
<i>3.9.1</i>	Nivel 0 de la estructura del Guggenheim Museum en ejecución.	1958	Bibliografía
<i>3.9.2</i>	Detalle del nivel 0 de la estructura del Guggenheim Museum en ejecución.	1958	Bibliografía
<i>3.9.3</i>	Detalle del nivel 0 de la estructura del Guggenheim Museum en ejecución.	1958	Polivka Papers
<i>3.9.4</i>	Nivel intermedio de la estructura del Guggenheim Museum en ejecución.	1958	Bibliografía
<i>3.9.5</i>	Ejecución de la estructura del lucernario del Guggenheim Museum	1958	Bibliografía
<i>3.9.6</i>	Ejecución de la estructura del lucernario del Guggenheim Museum	1958	Bibliografía
<i>3.9.7</i>	Ejecución de la estructura del edificio Monitor	1958	Bibliografía
<i>3.9.8</i>	Ejecución de la estructura del edificio Monitor	1958	Bibliografía
<i>3.9.9</i>	Ejecución de las fachadas del Guggenheim Museum	1958	Bibliografía
<i>3.9.10</i>	Ejecución de las fachadas del Guggenheim Museum	1958	Bibliografía
<i>3.9.11</i>	Pulido de aristas en las fachadas del Guggenheim Museum	1958	Bibliografía
<i>3.9.12</i>	Pulido de aristas en las fachadas del Guggenheim Museum	1958	Bibliografía