

ARQUITECTURA EXPERIMENTAL

Aportaciones experimentales pioneras del trabajo con modelos físicos estructurales.

1961-1975

Fernando Mariano Molina León

ARQUITECTURA EXPERIMENTAL

Aportaciones experimentales pioneras del trabajo con modelos físicos estructurales.

1961-1975

Fernando Mariano Molina León

TESIS DOCTORAL. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA. UNIVERSIDAD DE NAVARRA

DEPARTAMENTO DE TEORÍA, PROYECTOS Y URBANISMO

Vº. Bº. del director de la tesis

Dr. D. Carlos Naya Villaverde

Vº. Bº. del codirector de la tesis

Dr. D. Joaquín Torres Ramo



Pamplona, septiembre de 2019.

Quiero expresar mi agradecimiento a Carlos Naya Villaverde, director de esta tesis, por su dedicación y ayuda desinteresada. En medio de innumerables situaciones complicadas que han rodeado mi llegada al mundo académico, él siempre me ha sabido transmitir la serenidad y perspectiva necesaria para afrontar un trabajo de estas características. Deseo asimismo manifestar mi gratitud a Joaquín Torres, que ha contribuido, con su hondo conocimiento y su saber hacer y estar, en la realización de la tesis.

Dedico la presente tesis doctoral a mis padres y a todas aquellas personas honradas, intelectual y profesionalmente, que me he encontrado en estos casi cuatro años de tesis. Como los autores estudiados, su honradez intelectual hizo posible la escucha de todo lo que el comportamiento físico podría enriquecer al proyecto arquitectónico.

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. El inicio de una era	
1.2. La evolución de la profesión del arquitecto y su relación con los modelos	
1.3. Un remedio al ensimismamiento del proyecto y la ciencia en la arquitectura: el trabajo con modelos físicos.	
1.4. Metodología: estudio de casos	

ESTUDIO DE CASOS

2. Pabellón estadounidense de la Expo'67. La Geometría del modelo como proyecto de proyectos	73
2.1. Las exposiciones universales y la Expo'67	
2.2. Richard Buckminster Fuller	
2.3. El Pabellón estadounidense en la Expo'67	
2.4. Descripción de la cúpula	
2.5. Trabajos con modelos físicos estructurales	
2.6. Epílogo y aportación de la reconstrucción tridimensional	
3. Pabellón alemán de la Expo'67. La tracción del modelo como hipótesis de proyecto	123
3.1. Introducción	
3.2. Frei Otto	
3.3. El Pabellón de Alemania Occidental en la Expo'67	
3.4. Antecedentes y precedentes del Pabellón. Trabajo con modelos físicos estructurales	
3.5. Epílogo y aportación de la reconstrucción tridimensional	

4. El modelo para el VI Concurso de la UIA 1961. Movimiento y transporte del modelo como desencadenante de proyectos	187
4.1. Introducción	
4.2. Emilio Pérez Piñero	
4.3. Trabajo con modelos físicos estructurales: El Concurso de la UIA como punto de inflexión	
4.4. Pabellón transportable de los XXV Años de Paz de 1964 y la aportación de su reconstrucción tridimensional en su estudio	
4.5. Teatro Transportable de los Festivales de España 1966 y la aportación de su reconstrucción tridimensional en su estudio	
4.6. Epílogo	
5. Multihalle de Mannheim. La compresión del modelo como principio generador de forma de proyecto.....	253
5.1. Introducción	
5.2. Descripción del Pabellón	
5.3. Trabajo con Modelos físicos estructurales.	
5.4. Epílogo y aportación de la reconstrucción tridimensional	
CONCLUSIONES.....	301
0. Enriquecimiento por el uso de modelos físicos estructurales	
A. Aspectos del trabajo con los modelos estudiados que benefician al Proyecto	
B. Los modelos estudiados y el avance del conocimiento en Arquitectura	
C. El inicio de una era	
BIBLIOGRAFÍA.....	321
Anexo 1 10 Preguntas y respuestas extraídas de la entrevista a Frei Otto por el arquitecto y académico Juan María Songel en 2012	

ÍNDICE DE SIGLAS

AFEPP	Archivo Fundación Emilio Pérez Piñero
CASA	Construcciones Aeronáuticas S. A.
ETSAM	Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
EXCO	Exposición Permanente e Información de la Construcción
FAPR	Fondo Antonio Pérez Ruiz
FEPB	Fondo Emilio Pérez Belda
FEPP	Fondo Emilio Pérez Piñero
FFCA	Fondo Félix Candela
FJMPP	Fondo José María Pérez Piñero
IASS	<i>International Association for Shell Structures</i> (Asociación Internacional de Estructuras Caparazón)
IL	<i>Institut für Lichtstrukturen</i> (Instituto de Estructuras Ligeras, Stuttgart)
ITKE	<i>Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen</i> (Instituto de Diseño Estructural y Diseño Constructivo)
KIT	<i>Karlsruher Institut für Technologie</i> (Instituto de Tecnología de Karlsruhe)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio)
UIA	<i>Union Internationale des Architectes</i> (Unión Internacional de Arquitectos)
USN	<i>United States Navy</i> (La Marina de las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos)
ZKM	<i>Zentrum für Kunst und Medien</i> (Centro de Arte y Medios)

Arquitectura experimental:

Aportaciones desde el trabajo con modelos físicos estructurales

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El inicio de una era

En la Exposición Universal de 1967 se produce un hecho significativo en la evolución de la concepción de la arquitectura, un punto de inflexión en el que coinciden el auge y el agotamiento de una era, y el nacimiento de otra.

En un evento de envergadura internacional, donde los países muestran su potencial al resto de mundo como si de un escaparate se tratara, coinciden dos hitos que van a ser dos casos de estudio de esta tesis: el Pabellón de los Estados Unidos de América y el Pabellón de Alemania Occidental. Los otros casos de estudio, cuya inclusión justificaremos más adelante, son cercanos en el tiempo y en los planteamientos de proyecto, pero no en el lugar: el Pabellón conmemorativo de los XXV años de paz después de la Guerra Civil española (Madrid, San Sebastián y Barcelona en 1964), el Pabellón para los Festivales de España (A Coruña, 1966), estos dos del arquitecto murciano Emilio Pérez Piñero, y también el Pabellón Multihalle (Mannheim, Alemania, 1974) de Frei Otto.

Hasta ese momento, pese a que las exposiciones universales no sólo representaban la imagen de cada país, era muy frecuente ver cómo la crítica especializada y la no especializada mostraba una lectura política de cada país en los Pabellones que representaban y eran famosas las imágenes de los Pabellones de las grandes potencias enfrentadas, como por ejemplo en la exposición de París de 1937¹, donde estaban enfrentados los Pabellones de Alemania y Rusia, las grandes potencias del momento. Cada país sabía que su imagen quedaba condicionada, en gran manera, al papel que desempeñara en la exposición. En posteriores capítulos se mostrarán imágenes de las distintas exposiciones universales citadas.

Treinta años después de esta exposición, en plena Guerra Fría entre los Estados Unidos de América y Rusia, las miradas antes de la celebración de la exposición estaban puestas en cómo competirían las dos grandes potencias. Pero una vez que empezó la exposición la crítica hizo un giro inesperado; la comparación no estuvo entre las grandes potencias enfrentadas sino entre Estados Unidos y Alemania. Este segundo país, castigado por las guerras anteriores, todavía ocupaba un lugar discreto entre las potencias internacionales, pero su contribución en la exposición

¹ MORILLO, J. *Las exposiciones universales en la literatura de viajes del siglo XIX*. Tesis doctoral D-UNED Universidad Nacional de Educación a Distancia. 2015.

no dejó indiferente a la crítica, sobre todo a la relacionada con el mundo de la arquitectura, por su novedad y avance tecnológico.

Este gran contraste, el final y en inicio de una era, consistió en la actitud de los arquitectos frente al proyecto. En el caso del Pabellón de Estados Unidos se alcanzó la plenitud de la forma clásica de abordar un proyecto: desde una geometría pensada, la esfera, ver qué sistema hacía posible su consecución. En este caso a través de la discretización de la superficie de una esfera de 75m de diámetro, la más grande construida hasta entonces, en segmentos rectos formando triángulos y rigidizados por la unión de los tetraedros generados por esos triángulos.²

El caso de Alemania³ traía al escenario internacional un planteamiento completamente diferente al que tradicionalmente se había utilizado y que hemos descrito en el párrafo anterior. En este Pabellón se partió de un sistema, con determinadas ventajas de aprovechamiento de los recursos y de rapidez constructiva al estar pensado para imitar la optimización de las pompas de jabón, para ver hasta qué formas era capaz de llevarnos ese determinado comportamiento.

Con ese nuevo giro en el abordaje de los proyectos en arquitectura el uso de las maquetas se hacía imprescindible dentro del proceso de proyecto, el arquitecto planificaría con este nuevo rumbo contando con las ventajas y las coacciones formales que el sistema elegido por él mismo le permitiría.

En este marco, en la presente tesis estudiaremos la obra de varios arquitectos que centraron sus trabajos entre estos dos mundos; el mundo de la arquitectura a partir de la forma, y el mundo de la arquitectura que parte de un sistema y un comportamiento estructural para hallar formas nuevas, cómo cambió su manera de trabajar con modelos físicos estructurales y cómo éstos enriquecieron sus proyectos.

² Con anterioridad se había construido una cúpula geodésica de mayor diámetro, en 1958 la cúpula que construyó también Richard Buckminster Fuller para la *Union Tank Car Company* en Baton Rouge, Louisiana, de 117m de diámetro, pero en este caso se trata de una mayor parte de la esfera, tres cuartos del volumen total de una esfera de 75m de diámetro, por tanto, mucho mayor volumen interior, de ahí que la clasifiquemos como caso límite de cúpula geodésica.

³ El Pabellón Alemán consistió en una gran superficie cubierta por una membrana plástica tensada por cables de acero y elevada sobre 8 mástiles de diferentes alturas. El resultado formal, muy novedoso, fue un conjunto de formas orgánicas translúcidas fruto de un gran trabajo de optimización de los recursos materiales de la estructura, imitando a las pompas de jabón.

Esta reflexión puede ayudar a progresar ante la necesidad de resolver la incógnita de si es necesario recuperar, mantener e incluso potenciar el trabajo con modelos físicos en la docencia y ejercicio de la profesión. También este estudio pretende destacar si este tipo de herramientas, que han facilitado el trabajo a los arquitectos durante tanto tiempo, han quedado superadas por las nuevas tecnologías en el amplio terreno de la simulación, el avance de las ciencias teóricas, o cualquiera de las ramas del saber relacionado con el proceso de proyecto.

1.2. La evolución de la profesión del arquitecto y su relación con los modelos

No siempre hemos construido como lo hacemos ahora. De hecho, aunque la historia de la Arquitectura es tan antigua como el hombre, la profesión del arquitecto como tal es relativamente reciente. Tal y como la conocemos ahora, la profesión del arquitecto no nació hasta el Renacimiento (Siglos XV-XVI)⁴, con la planificación de los edificios (el proyecto) y la regulación del gremio.

El nacimiento de la profesión, que dignificó el proceso anterior a la construcción con el ejercicio intelectual creativo del arquitecto, encontró en el dibujo a su principal aliado como herramienta de “pre-construcción”. Junto a este nacimiento, también comenzó el uso de las maquetas en la arquitectura, como un paso más allá en la materialización de las ideas y los dibujos, y con todo ello, la organización del conocimiento en torno a la construcción⁵.

Este crecimiento del conocimiento alcanzó un tamaño tal que en el siglo XX hubo sectores de la crítica que empezaron a incluir a la arquitectura entre las demás ciencias empíricas⁶. Ciertamente, todo el esfuerzo por optimizar y simular los comportamientos de algunos fenómenos físicos que

⁴ VILLANUEVA, L. *Las tres edades de la construcción*. Informes de la Construcción, Vol. 57, N° 498. Madrid, 2005. Págs. 41-46

⁵ MAINO, S. y GONZALEZ BÖHME, L. *Maqueta versus modelo en la asignatura de historia de las estructuras y la construcción*. Dentro del tema de la revista: *El uso de modelos conceptuales y físicos en la asignatura de Historia de las Estructuras y la Construcción*. Revista AUS n° 18, Santiago de Chile, 2015. p. 23-29.

⁶ MUMFORD, L. *Arts and Technics* Columbia University Press. Recopilación de conferencias impartidas por Lewis Mumford en 1951 en la Columbia University, dentro de la “Bampton Lectures” que se organizan desde 1781. Nueva York, 1952. Págs 42-45.

se dan en la arquitectura, en muchos casos gracias al trabajo con modelos físicos, ha hecho que se cuestione si la arquitectura es únicamente una actividad científica⁷.

Bajo mi punto de vista, es un reduccionismo considerar que todo en arquitectura es cuantificable, que con “un puñado de fórmulas” se pueden resolver los problemas a los que está llamado a solucionar la arquitectura. El contenido humano del diseño en arquitectura, relacionado sobre todo con la experiencia del espacio, aun siendo en gran parte objetivo, cuenta con la subjetividad de cada usuario y por tanto impide que la buena arquitectura llegue a ser nunca sólo una ciencia empírica.

A continuación, nos centraremos a estudiar por separado la influencia que ha tenido sobre la profesión estos dos aspectos esenciales en ella: el proyecto y la técnica, y cómo intervienen en ellos el trabajo con los modelos físicos.

1.2.1. Los modelos y el proyecto

En esta tesis vamos a estudiar proyectos de arquitectura cuyo punto fuerte son sus estructuras y hay que saber que el concepto “estructura” es relativamente reciente. No es hasta el Gótico (Siglos XII-XIV)⁸ cuando se empieza a “pensar” el edificio diferenciando claramente los elementos de sustentación del resto de los elementos de cubrición⁹. Por tanto, haremos un acercamiento histórico desde de la evolución de la construcción hasta llegar al diseño por separado de los distintos elementos, como la estructura, que componen hoy la arquitectura.

La planificación y comprobación es un hecho que empieza a configurar la profesión del arquitecto, como comentamos con anterioridad, fundamentalmente en el Renacimiento (Siglos XV-XVI)¹⁰. La arquitectura se fue complejizando con el crecimiento de la técnica, los nuevos usos derivados de

⁷ Ibid, págs. 42-45.

⁸ VILLANUEVA, L. *Las tres edades de la construcción*. Informes de la Construcción, Vol. 57, N° 498. Madrid, 2005. Págs. 41-46.

⁹ AROCA, R. *Arquitectura y estructura*. Clase magistral del 18 de septiembre de 2015 en la ETSAM. Madrid, 2015.

¹⁰ VILLANUEVA, L. *Las tres edades de la construcción*. Informes de la Construcción, Vol. 57, N° 498. Madrid, 2005. Págs. 41-46.

las nuevas maneras de habitar e hizo necesaria esta profesión. Hasta entonces y sólo para algunas edificaciones, se le exigía muy poco a la arquitectura¹¹.

Antes del Renacimiento el oficio de la arquitectura se reducía prácticamente, excepto casos muy puntuales, a la cuestión formal que consistía en la adecuación del canon establecido, y a un listado de técnicas constructivas. De ahí que todo girase en torno a la experiencia del constructor, muchas veces adquirida a base de “prueba y error”. Los edificios que resistían al paso del tiempo y de las distintas solicitudes eran tomados como ejemplos y se comprobaban nuevas soluciones sobre ellos y, si a su vez estas pruebas resistían, eran también tomadas como ejemplo para futuras construcciones.

La planificación antes mencionada no es únicamente la organización en el tiempo de las necesidades materiales y humanas del edificio, es mucho más que eso. Afirma Wigley que el diseño (a partir de ahora nos referiremos a él como “el proyecto”) es lo que hace humano al hombre¹². Se convierte en la forma en que los humanos se hacen preguntas y, por tanto, se rediseñan continuamente. Fue de tal manera así que la labor del arquitecto empezó a configurarse en parte como un ejercicio teórico: la elaboración del proyecto, como promesa de lo que se construirá, y en la otra parte en el seguimiento de las obras que harían posible la realización de esa promesa¹³.

Pero también a esta nueva profesión, que contaba con la ayuda inestimable del dibujo y la maqueta, empezó a presentársele sus propias “enfermedades”: el distanciamiento de la teoría (la planificación, el proyecto) del ejercicio práctico de la profesión (la construcción). Y este distanciamiento se manifestó en la falta de conocimiento por parte del arquitecto, al centrarse en las técnicas constructivas y el hecho de no darle importancia desde el proyecto, el exceso de abstracción unido al olvido de las necesidades propias de los usuarios, etc.

¹¹ WIGLEY, M., COLOMINA, B. *Are We Human? Notes on an Archaeology of Design*. Lars Müller Publishers. Zürich. 2018. Págs 63-78.

¹² Ibid. Pág 54

¹³ Ibid. Pág 58

Los arquitectos objetos de estudio de esta tesis añaden algo más a la planificación y al proyecto, añaden las capacidades propias de los materiales como elementos configuradores del proyecto. Podríamos decir que estos arquitectos proyectan dos veces: una vez antes y otra vez después de la construcción del modelo físico.

En un primer proyecto, anterior a la construcción del modelo, dejan abierto el final, confían en que el trabajo por la “vía física” enriquezca su estado original. En el segundo proyecto, después de la construcción, modificación y comprobación con los modelos, recogen todo lo que se ha podido sumar al proyecto original y se disponen a culminar el proyecto para su posterior construcción definitiva.

Para estudiar si esta manera de acercarse al proyecto de arquitectura es significativa es necesario ver qué hitos de la historia han diferenciado las distintas etapas de la construcción (que ha condicionado siempre en gran medida la concepción del proyecto) hasta llegar a lo que hoy construimos. Se podrían sintetizar en cuatro según el estudio del profesor Villanueva¹⁴: el periodo anterior a la construcción¹⁵, el artesanal¹⁶, el industrial y el post-industrial.

Nuestro estudio se sitúa en el periodo Industrial, desde la revolución que supuso la entrada de las máquinas en los procesos de trabajo de los materiales, del que todavía somos parte. Este periodo permitió el nacimiento de nuevos materiales provenientes del hierro y del cemento, la producción

¹⁴ VILLANUEVA, L. *Las tres edades de la construcción*. Informes de la Construcción, Vol. 57, Nº 498. Madrid, 2005. Págs. 41-46.

¹⁵ El primer periodo es el anterior a la construcción, debido a que el hombre era fundamentalmente nómada y las pequeñas intervenciones que realizaba en cuevas y tiendas eran sobre todo hechas con elementos vegetales. El oficio equivalía únicamente a la experiencia y a la destreza técnica. Se trataba, fundamentalmente, de un sistema de ensayo y error

¹⁶ El siguiente periodo, podríamos llamarlo el periodo Artesanal, fruto de la revolución neolítica, que es el momento en el que entra en auge la agricultura, que hace que el hombre se convierta en un ser sedentario, es cuando podemos empezar a decir que nace la construcción propiamente dicha, de una manera artesanal con elementos naturales como la piedra, la madera, la tierra... Muy lentamente, se irán perfeccionando las prácticas y añadiendo técnicas hasta empezar también a utilizar elementos artificiales como la cal, el yeso, la cerámica... Toda esta complejización de los procesos exige cada vez más la figura del artesano cualificado, que aprende por tradición familiar, organizado en oficios y gremios.

seriada, la normalización, el control de calidad... En este momento de la historia de la construcción se empieza a dar importancia actual al cálculo y a la precisión.

En este periodo destaca la aparición del cemento Portland y con él la expansión del uso del hormigón armado, que revolucionó en gran medida el curso normal de los acontecimientos en la construcción. Similar a la gran resistencia de la piedra trabajando a compresión, a la del cable de acero trabajando a tracción y con las ventajas de ser resistente al fuego y dócil para adaptarse a cualquier forma, este material consigue hacerse casi omnipresente en la construcción moderna.

El hormigón armado, además, por esa capacidad de adaptarse a la forma deseada, fue el material más utilizado para materializar ideas en el siglo XX, no sólo por arquitectos, sino también por artistas y diseñadores¹⁷. Es en este auge, o más bien en el abuso de este nuevo recurso, donde empiezan a cobrar importancia los casos de estudio elegidos. A continuación, explicaremos el motivo.

Todas las ventajas del uso del hormigón armado fueron factores que aumentaron, en los arquitectos, la idea de que la forma ya no tenía obligaciones frente a las capacidades de los materiales, ya que existía un material, el hormigón armado, capaz de materializar cualquier forma sin que ésta tuviera correspondencia con el comportamiento estructural.

Este hecho distanció aún más al proyecto de la construcción; el arquitecto empezó a restar importancia a cómo se materializaban y sostenían sus ideas, tranquilo al contar con el “omni-morfológico” y “omni-resistente” hormigón armado.

Los casos de estudio, pese a dar aparente un paso atrás por no querer contar con el avance que permitía el uso del hormigón, llevan otros materiales como el acero y la madera hasta el límite de su comportamiento mecánico adaptándolo a la forma deseada y buscando la forma óptima para su comportamiento. Un comportamiento que también generará una forma, a veces, imprevisible,

¹⁷ Algunos de los ejemplos más notables son las esculturas de los siguientes artistas: Henry Moore “Mujer reclinada” 1927, Jose M^a Subirach “Al otro lado del muro” 1972, Gabriella Fekete “Machines” 1974, Carl Nsjar “The bust of Sylvette” 1968, Luchiano Cechia “Esferas” 1980, Eduardo Chillida “Monumento a la tolerancia” 1992, entre otros.

con la que buscan enriquecer el proyecto. Por eso producen un cambio de época en la manera de abordar los proyectos¹⁸.

Ese último cambio de época pensamos que tiene mucho que aportar en el último de los periodos descritos con anterioridad por el profesor Villanueva como “post-industrial”. De este periodo empezamos a notar ya los primeros síntomas tales como la recepción en obra de productos terminados, el diseño de nuevos materiales, la casi desaparición del oficio y la puesta en marcha de una nueva figura; el montador, y una ventaja tecnológica; la automatización. El proyecto y la planificación cuentan ya con que los materiales se pueden trabajar en un taller o un laboratorio y simplemente trasladar a la obra para su montaje.

En el presente estudio desarrollaremos casos de Pabellones experimentales que han sido diseñados entre estos síntomas de cambio entre el periodo industrial y el post-industrial; que han recibido en obra los productos terminados, que han necesitado sólo montadores y no especialistas, porque los especialistas han estado sobre todo en el proceso de diseño (de ahí la importancia del trabajo previo con modelos) y también porque los Pabellones estudiados son producto de la experimentación y, asu vez, fruto de la investigación, novedades que no habían tenido capacidad de “crear oficio” (de ahí que esos modelos fueron, sobre todo, para comprobar la correspondencia entre forma y comportamiento estructural durante su materialización).

Los periodos industrial y post-industrial suponen toda una revolución en la concepción de la arquitectura y sus procesos. Surge la especialización técnica, el auge de la ingeniería (que empieza a separarse muy explícitamente de la arquitectura al centrarse en el contenido únicamente empírico de la construcción), y se separa la construcción de los distintos elementos del proceso constructivo in situ, que favorecieron aún más el control sobre los materiales y la planificación.

La estructura es un claro ejemplo de ello. En estos periodos se empieza a concebir la estructura como un conjunto de piezas que se fabrican en taller y se transportan a la obra por separado,

¹⁸ En estas líneas nos vamos a apoyar mucho en el libro de Félix Candela “En defensa del formalismo y otros escritos”. Aunque él centró su carrera en sus proyectos y en hacer avanzar el conocimiento acerca de sus cascarones de hormigón armado, nos interesa más sus reflexiones en torno a la forma y el proyecto, y en cómo el avance de la técnica ha repercutido profundamente en la concepción que tenemos sobre el proyecto. Como ya hemos explicado, no haremos referencia a los proyectos sobre Hormigón, pero sí a las reflexiones que se han hecho a partir de su investigación.

centrando la labor de construcción en tareas de montaje de las distintas piezas. Este hecho está cambiando radicalmente la manera de proyectar y los casos de estudio son, en gran parte, precursores como veremos más adelante.

Antes de llegar a los casos estudiados, merece la pena detenerse a indagar en torno a otro de los aspectos fundamentales del proyecto en su proceso: la representación. ¿Es la representación una “pre-construcción” que enriquece al proyecto? Lo estudiaremos a continuación.

1.2.1.1. Proyecto y representación. Función mayéutica de la representación.

Volvamos al proyecto. Todo proyecto necesita, en su proceso de formación, de una representación. La representación es ya una pre-construcción y, como afirma Mark Wigley, nos configura y enriquece el proyecto.

Profundicemos en cómo ocurre esto. La mente funciona con elementos muy simples que, gracias a herramientas externas, combina y complejiza. Son estas herramientas, más concretamente las de fácil manipulación física, en las que se centrará la presente tesis.

El trabajo con modelos tiene una función *Mayéutica*: el famoso método socrático con el que el maestro, mediante preguntas, va haciendo que el discípulo descubra nociones que en él estaban latentes. En definitiva, este método de enseñanza consiste en no inculcar al alumno el conocimiento, sino que es el maestro el que contribuye a extraer del raciocinio de aquel, las deducciones lógicas, que permiten alcanzar el verdadero conocimiento de lo que hasta ese momento era desconocido. El trabajo con maquetas tiene ese poder de producir en el que las trabaja, preguntas nuevas que no surgirían únicamente con la expresión de una idea a través de la escritura o con los primeros bocetos de intención del proyecto.

El significado etimológico de la palabra mayéutica está tomado del griego y se relaciona con las parteras que ayudan a las mujeres que está a punto de dar a luz. De la misma manera, Sócrates

contribuía, con sus preguntas, para que los demás “dieran a luz” a las verdades desconocidas e inconscientes que se encontraban en lo más profundo de su ser.^{19 20}

De esta manera, el lenguaje oral es utilizado como herramienta de proyecto intelectual. Y cuanto mayor materialidad adquiere el contenido intelectual (a través de la escritura, el dibujo o mucho más con la construcción de la maqueta), mayor es la comprobación con la realidad. Además, también es mayor la perspectiva con la que se pueden analizar las distintas cuestiones del proyecto intelectual en cualquiera de sus manifestaciones.

Como señala el filósofo e historiador Walter Ong²¹ en relación a esta herramienta con la que cuenta el intelecto, la escritura es una tecnología que ayuda a formar no sólo la conciencia sino los procesos de pensamiento, y el paso de la cultura oral a una cultura escrita causó un efecto tan profundo en la humanidad que la conciencia humana cambió para siempre.

Aplicado a la arquitectura, la construcción de la maqueta y en general la construcción de cualquier herramienta de planificación y comprobación, cambió la manera de pensar y hacer la arquitectura.

¹⁹ BUCHETTI, A. *La mayéutica y su aplicación como técnica de aprendizaje*. Reflexión Académica en Diseño y Comunicación N° IX. Año IX, Vol. 9, Buenos Aires, Argentina. 2008. Págs 82-83.

²⁰ En esta línea, fue el filósofo alemán Edmund Husserl, en su *Lógica formal y lógica transcendental*, quien escribió que “el pensamiento siempre se hace en el lenguaje y está totalmente ligado a la palabra. Pensar, a diferencia de otras modalidades de la conciencia, es siempre lingüístico, siempre un uso del lenguaje”. Esto es, que el órgano propio de la conciencia es, precisamente, el lenguaje.

Desde luego, no fue Husserl el primero en señalarlo. Una larga tradición filosófica partiendo desde Aristóteles, apunta a una estrecha relación entre el pensamiento, el habla y la escritura, casi como si fuesen una y la misma cosa.

A propósito de esto se ha escrito mucho, pero quizá una de las frases más sugerentes sea aquella de Wittgenstein, en la que el también filósofo afirmaba que los límites de nuestro lenguaje son los límites de nuestro mundo.

Así, la necesidad de generar un hábito de lectura se hace bastante evidente -con miras a ensanchar nuestros propios horizontes vitales- pero, quizá, la de escribir aún no tanto. ¿Por qué necesitaría uno ponerse a escribir, además de a leer?

²¹ Walter Jackson Ong (1912 - 2003) fue un educador, académico, sacerdote jesuita, profesor de filología inglesa, historiador cultural y religioso, lingüista, y filósofo. Conocido por sus aportaciones fenomenológicas y personales de la literatura del Renacimiento e historia intelectual, de la evolución del sentido, del pensamiento de Gerard Manley Hopkins, del catolicismo americano contemporáneo, y, en general, de la cultura contemporánea.

Dentro del panorama general de la historia de la arquitectura del siglo XX, algunas veces se ha subrayado la condición objetual de la Arquitectura Moderna y su relación con la representación a través de la maqueta. A partir de este punto, en esta tesis interesa verificar un triple enunciado: ¿Con qué medios ha contado el arquitecto para pensar el proyecto arquitectónico? ¿Es el trabajo con modelos físicos una herramienta proyectual? ¿Qué maneras de trabajar con modelos físicos estructurales son los que más enriquecen el proyecto arquitectónico?

El proceso de proyecto de un arquitecto entra en crisis sólo cuando su resultado es algo terrible o algo extraordinario. Cuando el resultado es algo típico, el proceso nunca es tema de discusión. En el primer caso, cuando algo atroz es producido, el proceso es elevado como un esfuerzo que vale por sí mismo, separado del resultado (por lo menos en la mente del arquitecto). El proceso se convierte en un ejercicio, o una fuerza incontrolable, con vida propia, sin tener en cuenta el hecho de que un mal resultado es efecto de un mal proceso. Esta racionalización se explica bien en el decir común, “cuando no consigues lo que buscabas, ganas experiencia”.

El diseño arquitectónico es un proceso de decisiones. Y el producto del proceso, usualmente dibujos y maquetas, no son solamente evidencia retórica de estas decisiones, sino que les dan peso y consistencia. Las maquetas y dibujos son unos de los últimos vestigios del arquitecto como constructor. Los arquitectos contemporáneos no construyen edificios; hacen dibujos y maquetas. Han sublimado el uso de estas herramientas de proyecto tornando en fin lo que es un medio, volviendo a errores como los que comentábamos con el abuso de las capacidades del hormigón armado: la distancia entre el proyecto y la realidad.

Los dibujos y maquetas se convierten en analogías de la construcción. Ellos preceden al edificio y usualmente son llamados herramientas. Mediante estas herramientas el arquitecto desarrolla la mayoría de los aspectos en el proceso de diseño. Podemos hablar desde la conceptualización general, el análisis del sitio, estudio de flujos, la sostenibilidad del proyecto, etc, hasta detalles finales de iluminación, carpintería, acabados y demás. Estas herramientas son por necesidad simples e incompletas en relación con el edificio en sí, ya que replicar el edificio completamente es imposible e indeseable.

Es precisamente la simplicidad de estas herramientas, su abstracción, una forma de controlar la complejidad²². Al mismo tiempo, permite la interpretación que anticipa la futura experiencia del

²² RÍO, N. *Dibujos y Maquetas en el Proceso de Diseño Arquitectónico*. Archinect (Artículo en digital). Investigación y academia. 2007. Consulta del día 31 de agosto de 2018.

usuario final del edificio. El arquitecto usa dibujos, maquetas y su construcción, para proyectar esta futura experiencia. La profundidad de esta abstracción es controlada por el arquitecto mediante la formación de estas herramientas: bidimensional, tridimensional (ahora hasta podemos nombrar cuatro dimensiones) y según la especificidad del dibujo o maqueta.

Si hacemos que el nivel de interpretación sea bajo, estas herramientas se convierten en métodos convencionales de comunicación (principalmente para clientes). Pero hay momentos en los que el nivel de abstracción, particularmente de los dibujos arquitectónicos, es sólo inteligible para el realizador del dibujo. El rol de estos dibujos es maximizar sus posibles interpretaciones. Encontrar el grado de abstracción requerido para producir propuestas a diferentes aspectos de un problema, es parte de la habilidad del diseñador.

He aquí donde se sitúa nuestra investigación, en un grado mayor de materialización de los conceptos que en la representación gráfica, en las maquetas. Lo que buscan los arquitectos que estudiaremos a continuación es poder trabajar con una maqueta lo suficientemente concreta para que pueda reproducir un comportamiento, y lo suficientemente abstracta como para que se puedan interpretar multitud de soluciones.

Por tanto, el dibujo y el modelo físico no se convierten tanto en un medio de comunicación y de análisis²³, sino más bien en una búsqueda de posibles correspondencias con la realidad. Cuanto más específico es el modelo, más predecibles son sus implicaciones. En cambio, los dibujos y las maquetas más abstractas tienden más a provocar estas correspondencias que antes no se hubieran podido predecir.

Los dibujos y las maquetas provocan ciertas acciones y frenan otras. Ofrecen diferentes posibilidades para futuros cambios. Las maquetas, que tienden a enfatizar la totalidad de la situación debido a su reducido tamaño, promueven reajustes. Si las piezas pueden moverse las posibilidades de comprobación de nuevas soluciones es ilimitada y enriquecedora.

²³ OTXOTORENA, JM. *La construcción de la forma*. Servicio Publicaciones ETSA Universidad de Navarra. Pamplona. 1999. Págs 65-72.

Como dice el profesor Juan Miguel Otxotorena haciendo referencia a que siempre ha sido difícil diferenciar la fase dedicada al análisis (referida fundamentalmente al análisis gráfico) de la fase de proyecto: "el análisis ha adquirido una autonomía respecto al proyecto que la inviste de toda una serie de connotaciones nuevas".

Las maquetas son más específicas que los dibujos y, como nosotros, existen en el espacio. Los dibujos, en cambio, usualmente son percibidos como fragmentos de un total más grande. Los dibujos, aun desarrollándose más rápido que las maquetas en relación con el pensamiento del arquitecto, son más susceptibles de re-dibujarse por completo que de ser alterados. Los dibujos promueven pequeños y numerosos cambios que son evaluados con el tiempo. Son registros de la percepción donde la distancia desde la mano hasta el cerebro es reducida.

La creación de dibujos y maquetas es una manera de pensar en voz alta. Representamos las cosas en la forma en que se relacionan con nuestra manera de pensar. Como dice Gehry hablando acerca de sus dibujos: *“Yo hago un tipo diferente de dibujo (que el de un ingeniero estructural). Son una búsqueda en el papel. Es casi como si estuviera excavando en el papel, tratando de encontrar el edificio. Es como un escultor trabajando en la piedra o en el mármol, buscando la imagen (...) es una búsqueda frenética. Dejo que eso me conduzca, luego hago maquetas de la idea esbozada en papel, y luego regreso de nuevo al dibujo, y así sucesivamente”*.²⁴

Esta iteración es la que hace que estas herramientas, maquetas y dibujos, funcionen como medios de interpretación y de conceptualización en el proceso de diseño. Al final del trabajo con estas herramientas, el enfoque debe estar siempre dirigido hacia el edificio. Los dibujos y maquetas son escalones que ni siquiera deben verse necesariamente como el edificio final. Su función principal es brindar posibilidades de interpretación al arquitecto. Es indicar al diseñador cuál es el siguiente paso a seguir en el proceso de diseño, no como fines sino como medios para conseguir la mejor de las soluciones finales posible.²⁵

²⁴ ARNELL, P y BICKFORD, T. *Charles Gwathmey and Robert Siegel: Building and Projects, 1964-1985*. Icon Editions. Florida. 1985. Págs 136-143.

²⁵ RÍO, N. *Dibujos y Maquetas en el Proceso de Diseño Arquitectónico*. Archinect (Artículo en digital). Investigación y academia. 2007. Consulta del día 31 de agosto de 2018.

1.2.2. Los Modelos y el avance del conocimiento

*Es necesario alternar la reflexión y la acción, que se completan y corrigen la una con la otra. También para avanzar se necesitan las dos piernas: la acción y la reflexión.*²⁶ Antonio Gaudí.

Trabajar con modelos para diseñar supone utilizar una herramienta que ayuda a la inteligencia, a través de la acción física, a enriquecer los planteamientos teóricos desde los que se parte con las ideas sobre un proyecto. Es, parafraseando a Gaudí, una ayuda para que la mente avance desde la reflexión ayudada por la acción.

Es así como avanza la arquitectura, no sólo con los modelos, sino con todo lo que la lleva de la potencia (teoría), al acto (la acción). Algo parecido a lo que pasa con el avance del conocimiento en física donde *“...conviene que el intelectual “maneje” las cosas- según afirmaba el filósofo José Oretga y Gasset, -que esté cerca de ellas; de las cosas materiales si es físico, de las cosas humanas si es historiador. De ahí la ejemplaridad del pensamiento físico frente a todos los demás usos intelectuales. La física, como ha notado Nicolai Hartmann²⁷, debe su sin par virtud a ser, hasta ahora, la única ciencia donde la verdad se establece mediante el acuerdo de dos instancias independientes que no se dejan sobornar la una por la otra. El puro pensar “a priori” de la mecánica racional y el puro mirar las cosas con los ojos de la cara: análisis y experimento”.*²⁸

Como explicaremos más adelante, esto es lo que va a hacer en su ciencia Galileo, figura clave en el estudio de la escalabilidad de los modelos, al analizar el comportamiento material ante el crecimiento. *El aristotélico no descomponía el fenómeno natural, sino que a su conjunto le buscaba una causa también conjunta... Cuando ve moverse un cuerpo, hace todo lo contrario: se pregunta de qué movimientos elementales y, por tanto, generales, se compone aquel movimiento concreto.*

²⁶ ZALAMEA, F. *La figura y la torsión. Pasado y presente de una visión ondulada del mundo*. Institución Alfonso El Magnánimo. Valencia, 2010. Pág 102.

²⁷ Nicolai Hartmann (Riga, 1882 - Gotinga, 1950) fue un filósofo alemán conocido por su obra: *Líneas fundamentales para una metafísica del conocimiento*.

²⁸ ORTEGA Y GASSET, J. *Meditación de la técnica*. Publicado por Espasa Calpe. Colección Austral (1965) Madrid. 1939. Pág 87.

*Esto es el nuevo modo de operar con el intelecto: "análisis de la naturaleza".*²⁹ Este es el método de trabajo con el que miraremos los modelos físicos estructurales, porque este punto de vista supone un ejercicio fundamental para este tipo de proyectos experimentales y el objetivo de esta tesis.

1.2.2.1. Experimentar con modelos físicos estructurales

La presente tesis doctoral aborda el trabajo con modelos físicos estructurales en arquitectura como complemento al trabajo racional y creativo teórico del arquitecto. En ese trabajo se produce un enriquecimiento del proyecto a través de la interacción con los modelos. A veces el resultado no es buscado, otras veces sólo es intuitivo y al final corroborado por esa interacción. El objetivo tácito del arquitecto al trabajar de esta manera es la búsqueda de "traducir" el comportamiento en los materiales de un modelo a lo que pasa en los materiales de la construcción final.

Esta tesis realiza un estudio que no se realiza desde una aproximación histórica al uso de los modelos y su incorporación en la mesa de trabajo de los arquitectos dentro de su labor creativa, sino que se desarrolla mediante el análisis de ciertas obras de arquitectura –próximas en el tiempo pero no en el espacio- que permiten identificar diversas operaciones con modelos; usos escalables de la maqueta al edificio, usos interpretados y traducidos de la escala de trabajo a la escala humana arquitectónica para la que fueron pensados. Con este estudio de casos, se construye un valioso espectro de sistemas de trabajo que han marcado un hito en la manera de construir.

El estudio del trabajo con modelos surge motivado por un doble interés o, si se quiere, por una atracción inevitable y una preocupación incipiente. En primer lugar, por el propio beneficio que he obtenido por trabajar con modelos, y en segundo lugar, el descubrir, a base de trabajar con ellos, un proyecto brillante partiendo de una idea básica que va creciendo a medida que se trabajan los modelos.

El cambio de época del que hablábamos antes tiene mucho que ver con la creciente visión científica empírica que inunda el ejercicio de la profesión durante el siglo XX. Si de verdad la arquitectura es una ciencia empírica, el autor de la tesis discrepa de ello, sería imposible plantear

²⁹ Ibid pág 86.

que la arquitectura es a la vez arte y técnica, y que los modelos físicos tendrían un papel muy importante al tratarse del único instrumento posible de comprobación en muchos casos.

Los casos de estudio son pabellones experimentales en los que los arquitectos trabajan con los modelos físicos para avanzar en el conocimiento de la técnica para poderlos aplicar a la arquitectura.

1.2.2.2. ¿Ciencia de la arquitectura?

Como se muestra en la cita de Gaudí con la que se inicia este subapartado, hay arquitectos que se han servido del hacer para el pensar. Han encontrado en la acción, generalmente a través de la construcción de maquetas y modelos, información valiosa que no esperaban como fruto de su razón o que sólo intuían, para sus diseños. Esta tesis pretende destacar estrategias, fórmulas del trabajo de varios arquitectos con modelos físicos, para hacer avanzar la ciencia aplicada, la técnica, de la arquitectura.

Es importante partir desde este punto para establecer bien los cimientos de esta investigación y hacerse preguntas adecuadas como: ¿Cuáles son las vías de avance para el arquitecto en el trabajo con objetos materiales? Para poder arrojar algo de luz sobre cuestiones más de fondo en el ámbito de esta investigación como ¿Es la arquitectura una ciencia? o ¿La técnica puede llegar enriquecer el proceso de proyecto en la profesión? Antes de responder a estas preguntas es preciso definir qué entendemos por ciencia y qué se suele confundir con la ciencia para no equivocarse la dirección de este estudio.

Ciencia es, según el diccionario de la Real Academia de la Lengua, el conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento, sistemáticamente estructurados y de los que se deducen principios y leyes generales con capacidad predictiva y comprobables experimentalmente³⁰.

³⁰ Consulta a web: <https://dle.rae.es/?id=9AwuYaT> 27 de agosto de 2018

A este respecto, en paralelo a esta anterior definición, hacemos referencia a un texto de Ortega sobre la misión de la Universidad³¹ en el que destaca la diferencia entre ciencia y profesión, y entre ciencia y cultura, términos con los que se suele confundir a la ciencia y entre los que se mueve la arquitectura.

En los dos casos distancia a la ciencia de la vida que la empuja, pues tienen, como afirmaba el filósofo madrileño, órdenes distintos: *No confundamos, pues; la ciencia, al entrar en la profesión, tiene que desarticularse como ciencia para organizarse, según otro centro y principio, como técnica profesional.*³²

La ciencia busca, por tanto, la universalidad del conocimiento: poniendo nombres a la realidad para distinguir, separando, donde, por naturaleza, todo se encuentra mezclado. De este modo, se observan qué fenómenos son comunes y se repiten predeciblemente con el fin de descubrir un comportamiento, un método, un proceso dentro del aparente caos de la simultaneidad omnipresente de la vida.

La profesión pone en juego muchas cosas a la vez, es esencialmente interdisciplinar, es el momento de comprobación de la ciencia, donde encuentra su sentido, donde puede enriquecerse, donde adquiere la seguridad suficiente como para tomar todo lo anterior como cimiento donde poder seguir construyendo ciencia.

La arquitectura es una profesión, en la que se puede analizar por separado cada uno de sus elementos, hacer ciencia sobre ellos, pero corremos el peligro de caer en el reduccionismo al hablar de la ciencia de la arquitectura, porque es la arquitectura la que pone a todas esas pequeñas ciencias en vida, en profesión.

Es el mismo filósofo el que afirma que *la Cultura es el sistema de ideas vivas que cada tiempo posee. Mejor: el sistema de ideas “desde” las cuales el tiempo vive.*³³ *El régimen interior de la actividad científica no es vital; el de la cultura, sí. Por eso a la ciencia le traen sin cuidado nuestras*

³¹ ORTEGA Y GASSET, J. *Misión de la Universidad y otros ensayos sobre educación y pedagogía*. Revista Occidente. Capítulo V: “Cultura y ciencia”, Madrid, 1930. Págs 61-72.

³² Ibid pág 62.

³³ Ibid pág 62.

*urgencias y sigue sus propias necesidades.*³⁴ Por tanto, parece más lógico pensar que existe una cultura arquitectónica más que una ciencia de la arquitectura.

Comparándola con la profesión, la cultura necesita más tiempo, por tratarse de la incorporación de modos nuevos de proceder que han de ser interiorizados. En el fondo podríamos decir que, en este estudio que hace Ortega sobre los universales frente los particulares, una profesión proyectada en el tiempo y aceptada socialmente es el desencadenante de la cultura, y ambos son la vida que empuja a avanzar a la ciencia. Por tanto, la ciencia necesita de la puesta en práctica, de la vida, de la necesidad de ser necesaria, para avanzar, y a esto, en arquitectura, más que ciencia, la crítica siempre le ha llamado “técnica”.

Pero al hablar de técnica, que según la definición de la RAE es el *conjunto de procedimientos o recursos que se usan en un arte, en una ciencia o en una actividad determinada, en especial cuando se adquieren por medio de su práctica y requieren habilidad*, entramos en otro conflicto que se desarrolló sobre todo durante el siglo XX; que la seguridad que aporta la técnica arquitectónica, cultura arquitectónica enriquecida por la puesta en práctica de la misma durante tantos siglos, hizo que los arquitectos valoraran más sus garantías que las de la otra cara de la misma moneda, otra parte fundamental de la arquitectura, el arte.

Para desarrollar esta idea, el vuelco sobre la técnica que se ha dado en el siglo XX, en este apartado se va a hacer hincapié en la definición que hace de ella Lewis Mumford³⁵. Para el sociólogo y urbanista la técnica es “...*esa parte de la actividad humana en la cual, mediante una organización energética del proceso de trabajo, el hombre controla y dirige las fuerzas de la naturaleza, con miras a conseguir sus propios fines humanos*”³⁶. Esta definición que dista de la anterior al explicitar los fines de la técnica, es complementada y se entiende bien a la luz de la definición que el mismo autor sobre el arte.

Del arte afirma que es “...*principalmente el dominio de la persona y su finalidad es ensanchar la provincia de la personalidad, de manera que sentimiento, emociones, actitudes y valores, en esa*

³⁴ Ibid pág 66.

³⁵ Lewis Mumford. Sociólogo, historiador, filósofo de la tecnociencia, filólogo y urbanista estadounidense. Se ocupó, sobre todo, con una visión histórica y regionalista, de la técnica, la ciudad y el territorio.

³⁶ MUMFORD, L. *Arts and Technics* Columbia University Press. Nueva York, 1952. Pág 17.

*forma individualizada y especial en la cual aparecen en una persona determinada, en una cultura determinada, pueden ser transmitidos con toda su fuerza y significado a otras personas y a otras culturas*³⁷. Así, Arte y Técnica son aspectos formativos del hombre: el arte para el conocimiento interior y la técnica para afrontar las condiciones externas de la vida, ambos necesarios para desarrollar una completa práctica arquitectónica.

No contar con este dualismo entre arte y técnica, cuando hablamos de arquitectura, y reducirla a una simple ciencia empírica únicamente, sería no haber comprendido al ser humano en su totalidad, cuerpo y espíritu, (como citaremos más adelante en el capítulo sobre Frei Otto y su concepción sobre el enriquecimiento de la subjetividad³⁸) y por tanto no es posible dar un servicio completo desde la arquitectura si no es a través del arte.

De ahí que la crítica más reciente advierta del reduccionismo que implica considerar a la arquitectura únicamente como una ciencia empírica y se decante más por considerarla fruto de un complemento entre arte y técnica.

Cuando se produce esa separación entre el arte y la técnica en arquitectura se generan engendros ensimismados, deshumanizados. Nunca antes en la historia de la construcción y la profesión, hasta el siglo XX, habíamos llegado hasta este punto. Para entender cómo hemos llegado hasta esta separación es preciso remontarse al origen de la profesión del arquitecto, y así poder entender la evolución misma de la construcción hasta la actualidad y podremos valorar si el trabajo con modelos físicos es uno de los remedios al ensimismamiento de la arquitectura.

1.3. Un remedio al ensimismamiento del proyecto y la técnica en la arquitectura: trabajar con modelos físicos

Ciencia y profesión, técnica y arte, reflexión y acción tienen funcionamientos diferentes. En las primeras se tratan los conceptos por separado, en las segundas casi no se distinguen por su simultaneidad. De ahí que exista el riesgo, cuando se trata a la arquitectura como una ciencia

³⁷ Ibid. Pág 18.

³⁸ SONGEL, JM. "Frei Otto: Conversaciones con Juan María Songel" Ed. Gustavo Gilli, Valencia, 2012

En el capítulo sobre el Pabellón Alemán de la Expo'67, pero especialmente en el capítulo sobre el "Multihalle de Mannheim" al citar al autor hablando sobre la nueva subjetividad necesaria en la profesión.

empírica, del ensimismamiento, puesto que no se tiene en consideración que técnica y arte se necesitan y complementan.

Este estudio propone tomar ejemplo de varios casos en los que la ciencia se ha visto beneficiada al mezclarse con la profesión, gracias a la ayuda de pasos intermedios: los modelos, porque en los modelos se han visto forzadas las ideas arquitectónicas a tomar contacto con otras ciencias, a ser interdisciplinar.

Me gustaría enlazar estas consideraciones de Ortega, sobre la ciencia y la distancia de esta de la profesión, con uno de los problemas del científico actualmente: el peligro de acercarse demasiado a un determinado ámbito del saber que se aísla del resto de saberes. Este peligro es muy bien descrito el profesor Juan Arana³⁹, evocando al pasaje de la Biblia donde se narra la construcción de la torre de Babel, en la que los hombres soberbios de sus capacidades de construcción, pretendieron construir una torre que les llevara al cielo, para convertirse en dioses. En su construcción bien pudo pasar lo que el profesor Arana imagina y que asemeja a la actividad científica en la actualidad:

La gente empezó a hacerse sedentaria, sin alejarse nunca demasiado del piso en que vivía. Cada vecindad empezó a tener su propio argot, su acento peculiar, sus expresiones características. Con el tiempo, cada cual se entendía solamente con sus vecinos, y sólo con dificultad con los inquilinos de abajo y de arriba: la comunicación entre los que habitaban la base y los de la cúspide se hizo imposible: si éstos pedían andamios, aquellos les enviaban argamasa, y la construcción tuvo que detenerse.⁴⁰

Efectivamente, hacer ciencia requiere separar aquello que la profesión y la cultura une, enriquece y da sentido. Separar para clasificar, ordenar, medir, nombrar, observar. Separar para poder unir mejor, pero, en definitiva, separar.

³⁹ Juan Arana Cañedo-Argüelles (San Adrián, Navarra, 1950) es Catedrático de Filosofía de la Universidad de Sevilla, académico numerario de la Real Academia de Ciencias Morales y Políticas, así como profesor visitante en Maguncia, Münster y París VI –La Sorbona–, director de la revista de filosofía *Naturaleza y Libertad* y autor de numerosos libros, artículos y colaboraciones en obras colectivas.

⁴⁰ ARANA, J. *El Caos del conocimiento. Del árbol de las ciencias a la mañana del saber*. Editorial EUNSA, Pamplona, 2004. Extracto del capítulo 1: *¿Todavía es posible la interdisciplinariedad?*

Se separan los elementos que conforman la realidad para poderlos trabajar mejor cuando naturalmente los tenemos unidos. El problema aparece cuando se hace constar de que en la actualidad se han separado tanto los distintos ámbitos de la realidad que ya no existe interés en tratar de unirlos. Al contrario, seguimos ahondando en esa distancia inventada de conceptos sin la capacidad original de armonizar mejor las partes con el todo.

Para evitar esta falta de interdisciplinariedad, en esta tesis se estudian casos en los que, por trabajar en un punto intermedio entre ciencia y profesión, se ha conseguido un progreso en la interdisciplinariedad de la arquitectura y por tanto no ensimismada, útil, viva.

1.3.1. El modelo y la maqueta como herramientas mentales intermedias entre el concepto (las expectativas) y la construcción (la realidad).

Etimológicamente, la palabra *maqueta* proviene del francés *maquette* (modelo) y del italiano *macchieta* (literalmente *manchita*), diminutivo de *macchia* (mancha), que a su vez viene del latín *macula* (mancha)⁴¹.

En el argot de los pintores se llamaba *manchieta* (*manchita de color*) a un esbozo de pequeño tamaño que servía como modelo previo de una obra de mayor envergadura. De ahí se desplazó también su uso a la designación de pequeños modelos de obras escultóricas o arquitectónicas que eran esbozos de la obra a realizar.

En la RAE, Real Academia Española, la definición que encontramos de *maqueta*⁴² es: “*Modelo a escala reducida de una construcción*”. Claramente no es esa la definición más completa de lo que vamos a estudiar. Encaja más la segunda acepción, atribuida a obras literarias: *Modelo previo de un texto o libro que se va a publicar, usado para determinar sus características definitivas*. En cualquier caso, dentro de la definición de *maqueta* encontramos la palabra *modelo* que sí que corresponde mejor con el objeto de estudio de esta tesis.

⁴¹ Consulta a la web: <http://www.elcastellano.org/palabra/maqueta> 27 de agosto de 2018.

⁴² Consulta a web: <http://dle.rae.es/?id=OKOIM7g> 27 de agosto de 2018.

En el caso de la palabra *modelo*⁴³, la RAE dice así como primera acepción: *Arquetipo o punto de referencia para imitarlo o reproducirlo*. Como segunda: *En las obras de ingenio y en las acciones morales, ejemplar que por su perfección se debe seguir e imitar*. Y como tercera acepción: *Representación en pequeño de alguna cosa*.

Los objetos fabricados por los arquitectos estudiados responden mejor a la traducción inglesa de la palabra maqueta; *model*⁴⁴, porque abarcan todo aquello a lo que queremos llegar con el proyecto.

De todas maneras, para hacer un análisis más exhaustivo de la cuestión, empezaremos por sintetizar lo que se ha escrito sobre estos términos en el ámbito de la teoría y crítica de la arquitectura reciente:

1.3.1.1. Tipos de maquetas. Estado de la cuestión

Muchos autores han intentado clasificar las funciones⁴⁵ más frecuentes de las maquetas para poder extraer conclusiones. Estas clasificaciones, muy dispares entre sí, hacen pensar que hay tantos tipos de maqueta como proyectos en función de su demanda⁴⁶. Aun así, muchos autores coinciden entre sí en sus conclusiones y eso es lo que vamos a recoger a continuación.

De todas las clasificaciones encontradas, las que más se ajusta a las cuestiones planteadas que queremos resolver son las que dan más relevancia al trabajo con modelos físicos dentro del

⁴³ Consulta a la web: <http://dle.rae.es/srv/search/search?w=modelos> 27 de agosto de 2018.

⁴⁴ Definición en inglés de *model*: 1. a three-dimensional representation of a person or thing or of a proposed structure, typically on a smaller scale than the original. 2. a thing used as an example to follow or imitate.

⁴⁵ SIERRA, J. R. *Dibujo y Arquitectura. Funciones, servicios, incompetencias*. Actas del XI Congreso Internacional EGA, Sevilla, 2006. Págs 845-866.

⁴⁶ CARAZO, E. *Los modelos a escala como alternativa al dibujo de Proyecto*, en Docci, M. (coord.) *Il disegno di progetto. Dalle origini al XVII secolo*. Roma. 1993, Págs 286-289.

proceso de proyecto, por su estudio en un sentido práctico y no sólo en abstracto-teórico, es la de la profesora Albená Yaneva⁴⁷ y de la del profesor Eduardo Carazo y la profesora Noelia Galván⁴⁸.

En primer lugar, el estudio de la profesora Yaneva⁴⁹ ⁵⁰ concluye que los sistemas de clasificación existentes de maquetas no explican cuál es la interacción con su usuario, y no contribuyen al entendimiento del uso de la maqueta como parte de un proceso de aprendizaje y diseño.

⁴⁷ La profesora Albená Yaneva, de la Universidad de Manchester, usando la teoría de Actor-Red desarrollada por Bruno Latour y Michel Callon (Latour,2005) monitorizó la actividad de los arquitectos integrantes de OMA en el periodo 2001-2004 y estudió ampliamente las prácticas del trabajo en equipo en el proyecto de ampliación del Museo Whitney de Arte Americano de Nueva York (Yaneva 2005b, 2006, 2009b). Siguió a los arquitectos y a las maquetas que estos producían en sus prácticas rutinarias y analizó cuidadosamente las acciones y transacciones que se producían en complejas configuraciones espaciales, la materialización de las sucesivas operaciones que ocurren en una rutina y los previstos e imprevistos efectos indirectos que provocan.

En sus estudios etnográficos sobre el trabajo de los profesionales de OMA en su trabajo consiguió adquirir un mayor conocimiento del uso de las maquetas como participantes del proceso de diseño y no como meras herramientas de representación. Así en lugar de tratar de establecer una tipología de formas de diseñar, basada en los análisis a posteriori de los escritos de los arquitectos (entrevistas, autobiografías), su intención fue obtener información de primera mano sobre maquetas-y-arquitectos-en-acción, y modalidades de comunicación y producción de conocimiento a través del uso de las maquetas.

⁴⁸ Eduardo Carazo y Noelia Galván, ambos profesores de la Universidad de Valladolid, dentro del Departamento de Urbanismo y Representación de la Arquitectura, mantienen desde hace años un sistema pedagógico para el análisis de formas arquitectónicas, fundamentado en un uso mixto de dibujo y maqueta, entendiendo ambos conceptos como complementarios dentro del más discutido término de la *representación* de la arquitectura. De modo que el análisis de diversos ejemplos domésticos de arquitectura moderna, se apoya en la realización, por parte de los estudiantes, de pequeñas maquetas conceptuales nunca mayores de 15 x 15 cm. Me ha parecido oportuno aclarar la razón por la que he querido traer a este estudio su criterio en la clasificación sobre maquetas.

⁴⁹ YANEVA, A. *Obsolete Ways of Designing? Scale Models at the Time of Digital Media Technologies*. In: Jorg H. Gleiter, Norbert Korrek, Gerd Zimmermann, editor(s). *Die Realität des Imaginären: Architektur und das digitale Bild*. Weimar: Verlag der Bauhaus-Universität Weimar; 2008. Págs. 83-91.

⁵⁰ YANEVA, A. *The Making of a Building: A Pragmatist Approach to Architecture*, Editorial: Peter Lang. Oxford, 2009. Págs 103-112.

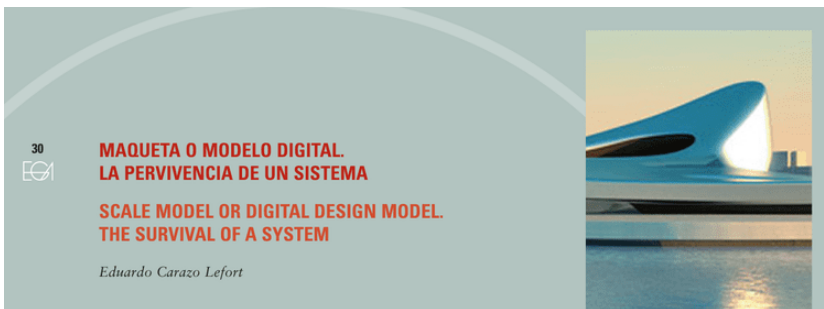
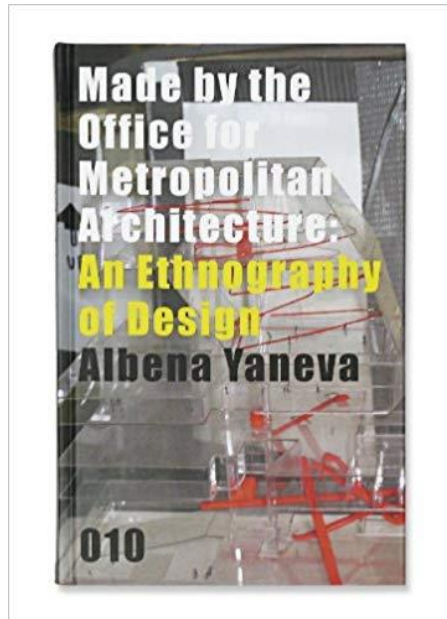


Imagen 1: Estudios sobre maqueta de la profesora Albena Yaneva y Eduardo Carazo

Los escritos sobre las funciones de las maquetas presentes en la literatura del diseño, según Yaneva⁵¹, podrían agruparse en seis conceptos básicos. Aquí tenemos una breve síntesis de su clasificación y los principales autores que hablan sobre cada apartado:

1. Como herramienta de expresión: la maqueta traduce el proyecto imaginario que existe sólo en la mente del arquitecto⁵². También la maqueta transforma las ideas subjetivas en tangibles prototipos físicos⁵³. Además, hay autores que identifican el diseño al proceso por el cual existe una transferencia de la imaginación a la forma física en la maqueta⁵⁴, que se da en una especie de momento de delirio y ocultación⁵⁵. O como instrumento para transmitir mensajes⁵⁶.
2. Como herramienta de comunicación entre el arquitecto y los no-especialistas⁵⁷ que no visualizan bien el proyecto⁵⁸.
3. Como herramienta narrativa: existen maquetas que recopilan, articulan y memorizan la precisa información espacial sobre el proyecto⁵⁹. El propio Alberti, en su obra "*De re aedificatoria*" describe la maqueta como la herramienta para examinar la relación entre el

⁵¹ YANEVA, A. *Made by the Office for Metropolitan Architecture: an ethnography of design*, Rotterdam: 010 Publishers. Rotterdam, 2009. Págs 37-42.

⁵² CLARISSE, C. *Maquete d'architecture, Maquettes d'architectures*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, Londres, New York, 1993.

⁵³ BUSCH, A., *The Art of the Architectural Model*, Design Press, Nueva York, 1990.

⁵⁴ PORTER, T. *How architects visualize*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1979.

⁵⁵ SILVETTI, J. *Representation and Architecture*, Carnegie-Mellon University. 1982.

⁵⁶ MOON, K., *Modeling Messages. The Architect and the Model*, Monacelli Press, New York, 2005.

⁵⁷ PORTER, T. *How architects visualize*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1979.

⁵⁸ COWAN, H. J., GERO, J. S., DING, G. D., MUNCEY, R. W. *Models in Architecture*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, London, New York, 1968.

⁵⁹ BUSCH, A. *The Art of the Architectural Model*, Design Press, Nueva York, 1990.

emplazamiento y su entorno, silueta y área, número y orden de las partes del edificio⁶⁰. Aunque ha habido autores que sitúan el uso del modelo físico como herramienta para recrear una visión comprensible de la historia de la arquitectura mediante réplica de edificios del pasado a escala⁶¹.

4. Como herramienta de presentación del proyecto arquitectónico a grupos y persuasión de clientes y mecenas⁶².
5. Destaca en esta investigación el uso de la maqueta como herramienta didáctica y como modelos de ensayo, con la que el arquitecto ha podido tradicionalmente enseñar a sus alumnos y colaboradores y comprobar sus ideas al materializarlas⁶³. En nuestros casos, el modelo es el punto de partida desde el que el arquitecto aprende e interpreta, de dónde saca información y comprueba sus ideas.
6. La función de la maqueta como obra de arte en sí misma, desvinculada del proyecto al que servía. Hay autores que han visto en el modelo una experiencia artística y conceptual relativa independiente al ser un acto de la mente que busca el apoyo material a los conceptos que maneja en la cabeza⁶⁴. También, como expresión autoreflexiva de los conceptos y puntos de vista del arquitecto, con un estatus casi independiente⁶⁵.

⁶⁰ ALBERTI, L. B. *The Ten Books of Architecture*, edición Leoni 1755 (escrito en 1443), Libro II, capítulo I, Dover, Nueva York 1986. Págs 22.

⁶¹ RICHARDSON, M., *Model Architecture*, Country Life Vol 21. Monacelli Press, Nueva York, 1989. Págs. 224–227.

⁶² MILLON, H. *In The Renaissance from Brunelleschi to Michelangelo. The Representation of Architecture*. Ed., Millon, Bompiani, Milan, 1994. Págs. 19–75.

⁶³ SCHÖN, D. A., *Educating the reflective practitioner: toward a new design for teaching and learning in the professions*, Jossey-Bass, San Francisco, 1987.

⁶⁴ FRAMPTON, K, KOLBOWSKI, S. and Institute for Architecture and Urban Studies. *Idea as model*, Institute for Architecture and Urban Studies/Rizzoli International Publications, Nueva York, 1981.

⁶⁵ GERKAN, M. *Idea and Model. 30 years of Architectural Model*, Hamburger Architektur Sommer, Hamburgo, 1994.

Las maquetas tienen en su esencia el “ser para algo”: ser para representar, calcular, narrar... pero ¿En sí mismas tienen valor, como objeto escultórico por ejemplo? Hay autores como Eisenman que han destacado la autonomía formal, como si de objetos preciosos se tratara, de las maquetas fuera de su uso original como dice Eisemann⁶⁶.

Otros, como el profesor Víctor Pérez Escolano, atribuyen su autonomía a la necesidad que tiene el arquitecto de transferir un concepto a la materialidad física, hecho tan esencial en las maquetas como en la escultura como remarca el profesor Pérez Escolano⁶⁷. Algo como lo que hizo el escultor Jorge Oteiza con sus esculturas de tizas⁶⁸.

La otra clasificación, la que hace el profesor Eduardo Carazo junto con la profesora Noelia Galván en uno de sus artículos⁶⁹, recalca una clara intención de no ser exhaustiva. Esta clasificación es traída a esta investigación por un argumento de autoridad: la larga trayectoria de los docentes antes nombrados en la docencia con maquetas, como muestran en sus escritos.

Según el profesor Carazo las funciones más frecuentes de la maqueta son: la seducción del cliente, la representación y planificación de la ciudad, la función de competición, las maquetas que sirven como sistema que ayuda a la exploración del proceso de proyecto, las que sirven como ensayo de procesos constructivos y estructurales, la función de verificación de las promesas del proyecto, y las que sirven como diagrama y análisis de la idea, del proyecto y de la obra construida y por ello son buenos instrumentos docentes⁷⁰.

⁶⁶ EISENMAN, P. *Idea as model*, Ed: Rizzoli. Nueva York. 1981.

⁶⁷ PÉREZ ESCOLANO, V. *Escalas del minimalismo. Arquitectura y escultura*. Ed Castaño. Dentro del libro *¿Qué es la escultura moderna? Del Objeto a la arquitectura*. Fundación Cultural Mapfre Vida. Madrid. 2003. Págs. 263-292. Pág 275.

⁶⁸ ROWEL, M., CALVO SERRALLER, F., VEGA, A., ZULAIKA, J., SERRA, R., BADIOLA, T. *Oteiza, mito y modernidad*. Madrid. El Viso. 2004.

⁶⁹ CARAZO, E. y GALVÁN, N. *Aprendiendo con maquetas. Pequeñas maquetas para el análisis de arquitectura* EGA Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica 2013. Págs. 62-71.

⁷⁰ Ibid. Págs 62-71.

En un escrito posterior⁷¹ del profesor Carazo junto con otros profesores, hacen una clasificación distinta, esta vez más orientada a las funciones del proyecto más que a las funciones de representación y al público al que va dirigido:

Maquetas conceptuales. Las maquetas conceptuales son maquetas de ideación o configuración arquitectónica, fundamentadas en la geometría euclidiana, topológica, fractal o proyectiva. Se trata de exploraciones para resolver problemas de complejidad.

Maquetas o modelos iconográficos. Los modelos iconográficos son interpretaciones semánticas de conceptos tanto de tipos como de movimientos o bioclimáticos. Sirven para abstraer y comprobar fenómenos complejos como la manipulación del aire o de la luz, pero también en la creación de las formas arquitectónicas fundamentadas en arquetipos.

Modelos estructurales. Los modelos estructurales son comprobaciones de resistencia de sistemas tridimensionales. Son, en cierto modo, la síntesis del oficio de la arquitectura, y por ello, la ideación de las formas en función de las estructuras. Como enfoque educativo resulta esencial.

Modelos biónicos. Los modelos biónicos son interpretaciones de estructuras biológicas aplicadas a la arquitectura. La peculiaridad que tienen radica en que no pueden ser una mera copia de referentes preexistentes, sino que requieren desarrollar el proceso metodológico de inferencia entre dos campos distantes, lo que ayuda al proceso creativo de la innovación en clave de biomímesis.

Prototipos. Los prototipos se construyen a escala real; sirven para resolver problemas constructivos, encuentros materiales, estructuras y problemas tecnológicos. Además, desde el punto de vista fenomenológico, al tener una escala arquitectónica el espacio se percibe en su propia dimensión y la relación escalar entre sujeto y objeto arquitectónico es plena.

Son los más completos para aprender arquitectura porque están contruidos con materiales arquitectónicos, aunque resulta obvio que por razones de costes, ejecución y espacio no son tan

⁷¹ V. V. A. A. *Fenomenología y percepción en arquitectura. De la escala 1/1 a la miniaturización de los modelos físicos y virtuales.* (2016) Carlos L. Marcos, Eduardo Carazo*, Joel Olivares**, Jorge Domingo, Ángel Allepuz, Pablo Juan, Justo Oliva, Ramón Maestre, Carlos Martínez, Mercedes Carbonell. Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía. Escuela Politécnica Superior Universidad de Alicante *Universidad de Valladolid **Universidad Gestalt de Diseño de México. Innovaciones metodológicas en docencia universitaria: resultados de investigación.

fáciles de poner en práctica salvo en casos puntuales o para resolver problemas de prefabricación e industrialización.

Modelos de investigación arquitectónica. Los modelos de investigación arquitectónica son aquellos modelos que sirven para construir instrumentos de medición, de tal manera que nos sirven para comprobar hipótesis empíricas del proyecto o nos sirven para hacer pruebas con modelos conceptuales. Por ello, podemos estudiar en ellos fenómenos bioclimáticos, como soleamientos, climatización o iluminación natural, etc.

Después de trabajar la literatura al respecto y de comprobar sus implicaciones en el trabajo con modelos, una conclusión lógica es que hay poco estudiado en torno a proyectos de arquitectura que han tenido al modelo como primera fuente de información del proyecto. Tampoco existen publicaciones académicas que analicen pormenorizadamente las posibilidades que tiene el trabajo con modelos físicos para adentrarse en formas y comportamientos estructurales desconocidos.

De la lectura de la bibliografía a la que hemos hecho mención nace, en cierta manera, el deseo de abrir brecha en la investigación de los “lugares comunes” entre estos proyectos, los casos de estudio, de procedencias muy distintas pero que comparten el haber “escuchado” qué tienen que aportar al proyecto, incluso en la forma, los materiales y las uniones entre ellos.

Los tipos de maquetas y modelos que sirven a la investigación en la arquitectura, ya sea en funciones de comprobación de resultados, cálculo, o representación de determinadas soluciones, han sido una vía poco explorada debido, bajo nuestro punto de vista, a la gran confianza que tenemos depositada los arquitectos en nuestro propio juicio, en el alcance de nuestra imaginación y nuestra manera de representarla, despreciando en la gran mayoría de los casos, la información que nos pueden aportar los materiales al ponerlos a trabajar.

Se hace necesaria por tanto una investigación pormenorizada de casos que hayan abierto brecha en nuevas posibilidades para la arquitectura y que se hayan basado en el trabajo con modelos, más concretamente los modelos estructurales, donde forma y función se han identificado, han trabajado juntos gracias a la comprobación del arquitecto.

Y junto a la información que pueda aportar el modelo, es necesaria la capacidad de análisis del proyectista. De su capacidad de asombro dependerá que las novedades que surjan de la materialización de sus ideas lleguen a ser parte de su proyecto. Es por ello que planteamos una serie de aspectos esenciales a la hora de trabajar con esta perspectiva de proyecto. No sólo para

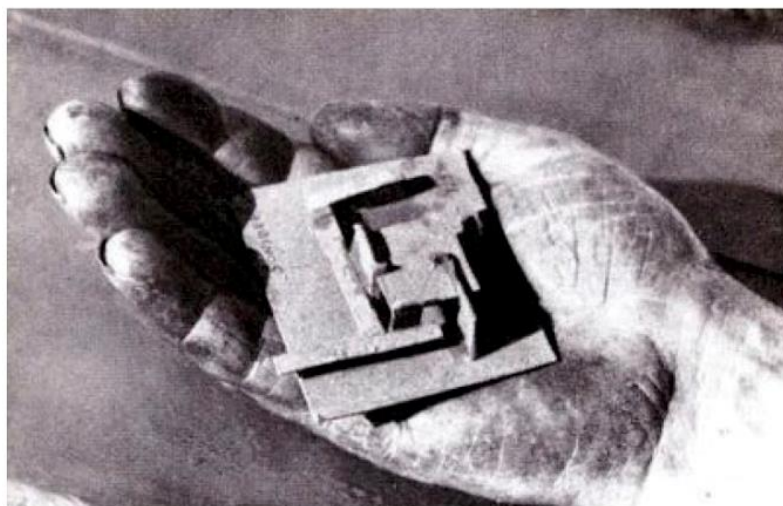


Imagen 2: MAQUETA EN LA MANO. Publicado por Unidad Docente Campo Baeza

UNA IDEA BIEN CABE EN UNA MANO

Alberto Campos Baeza / *

Sobre las pequeñas maquetas como síntesis del espacio arquitectónico.



GERRIT RIETVELD, Maqueta del pabellón en Otterlo, Arnhem, en una mano, imagen fuente desconocida.jpg

su uso en el ejercicio profesional, sobre todo para la formación de los futuros arquitectos. El hecho de incluir el trabajo con modelos físicos en la enseñanza es uno de los motores de esta investigación. No creemos que sea casualidad que los tres principales autores estudiados hayan sido, en algún momento de sus carreras profesionales, profesores.

1.3.2. Aspectos esenciales de las maquetas/modelos de trabajo

Tradicionalmente, las maquetas más famosas son las que han mostrado la idea acabada de los proyectos. Son famosas las fotos de las maquetas de grandes arquitectos como Utzon, Wright, Fuller, etc, que ayudaron a dar razón de sus obras a clientes y colegas de profesión.

En este estudio nos interesan más los bocetos materiales, las maquetas de trabajo, que utilizaron los arquitectos de forma análoga al dibujo. Esas maquetas que ayudaron a sacar las ideas poco a poco de la mente para empezar a materializarlas. Esas maquetas son las que no se suelen enseñar al cliente para explicar un proyecto. Pero son las que, en muchos casos, entre los que se encuentran los casos de estudio, han ayudado a la realización del mismo.

Y de todas las maquetas de trabajo, nos interesan más las que los arquitectos han utilizado para resolver dudas que sólo con la mente y el dibujo no podían resolver. Dudas relacionadas con comportamientos estructurales, movimiento, forma que depende del movimiento, etc.

Este uso de las maquetas, al que podríamos denominar *mayéutica física*, es necesario para el desarrollo de formas complejas ya que la mente es capaz de manejar sólo conceptos formales sencillos⁷². Para combinar varios de esos conceptos sencillos y hacerlos más elaborados, algo que es el natural proceso de complejizar la forma, muchas veces el único camino es la construcción de modelos materiales tridimensionales.

Los aspectos que desarrollaremos a continuación son la escala, la fácil modificación de los modelos y los materiales que emulan realidades. Somos conscientes de que existen otros muchos aspectos muy importantes en el trabajo con modelos físicos como la incidencia y consecuencias de la luz, que autores como Campo Baeza, gran defensor del trabajo con modelos físicos

⁷² FRAMPTON, K, KOLBOWSKI, S. and Institute for Architecture and Urban Studies. *Idea as model*, Institute for Architecture and Urban Studies/ Rizzoli International Publications, Nueva York, 1981.

conceptuales, clasifican como esenciales⁷³, pero el criterio que hemos seguido para esta investigación trata de acotar aquellos aspectos en los que la forma corresponde a un determinado comportamiento estructural, aquellos aspectos que, por escribirlo de alguna manera, la forma es consecuencia coherente de su comportamiento estructural.

Otro de los aspectos esenciales del trabajo con modelos físicos, en el que tampoco nos detendremos directamente, es la capacidad que tienen las maquetas para la comprensión volumétrica del espacio, conseguible también hasta cierto punto con el dibujo, que representa sólo una escena. La ventaja que tiene el modelo es que se representan simultáneamente muchas escenas a la vez. El dibujo es la herramienta más directa que ha encontrado el arquitecto de todos los tiempos para materializar sus ideas, pero cuenta con ese inconveniente; no puede llegar más allá de plasmar una escena. El dibujo no es capaz de ofrecer una imagen de varias perspectivas simultáneas, de ahí también gran capacidad sugerente.

Vista la literatura principal sobre los usos de las maquetas, pasamos ahora a estudiar por separado los aspectos que más nos interesan del trabajo con modelos físicos estructurales:

1.3.2.1. La escala y los modelos.

Un tema importante cuando se trabaja con modelos es su escala. La arquitectura maneja la escala humana, generalmente sirve de cobijo, vestido, representación... y eso tiene mucho que ver con el tamaño, y para trabajar con ella es preciso simularla en menor tamaño, de ahí que las maquetas sean, no sólo una síntesis de la idea principal, sino sobre todo una síntesis espacial. Así, hacer una maqueta es algo como jugar a ser Dios, ponerse en su pellejo, al percibir todo más pequeño, como juguetes, ese cambio de escala lo permite.

El pequeño tamaño de la maqueta o el modelo le facilita un acercamiento a la abstracción, alejándose de la representación, eliminando lo superfluo, presentándose como una síntesis, y haciéndose materialización física de una idea arquitectónica en su estado puro⁷⁴. En el tipo de modelos que van a ser estudiados no sólo se busca una síntesis de la idea, también se busca estudiar un determinado comportamiento y posteriormente tendrá que ser herramienta que sirva

⁷³ CAMPO BAEZA, A. *An idea in the palm of the hand*, Ed Domus, 972. Milán, 2013. Págs. 10-11.

⁷⁴ Ibid.

para “traducir” a la escala real el edificio. Esta traducción no podrá ser siempre “literal”, es decir, no podrá ser únicamente escalable del modelo a la realidad. Sólo hay algunos funcionamientos que pueden trabajar bien al ser escalados del modelo al edificio final. Hablaremos de ello al analizar las obras de los casos de estudio.

Esta bonita ficción, al poder ver todo “desde arriba”, pequeño, manejable, permite que sea más fácil pensar para modificar las ideas⁷⁵. Esta representación física es la única que permite hacer que las ideas “entren en carga”, y aguanten un juicio más exigente que el que se hace a los contornos de las líneas que forman un dibujo o un plano porque son muchos más los agentes que entran en juego: la forma que permite que se sostenga, la luz, el espacio generado, etc.

El pequeño tamaño y la semejanza con la realidad de las maquetas también despierta en esos objetos el carácter lúdico, de ahí también su fuerte atractivo como apostilla Huizinga⁷⁶.

Los modelos a ser estudiados en esta tesis pretenden ser también modelos de comportamiento estructural, no sólo de forma, así que la búsqueda de mecanismos escalables que funcionen bien tanto en la escala de la maqueta como en la escala real final son esenciales en este tipo de proyectos.

El hecho de construir una maqueta y que ésta sea material implica considerar en una primera y somera aproximación ciertos aspectos que vinculan de algún modo forma y materia. Cualquier proyecto, por su geometría, implica unas limitaciones materiales relacionadas con la resistencia de estos. Aunque desde Galileo es bien sabido que la escala influye en el comportamiento estructural –por el hecho de que la resistencia depende de la sección mientras el peso, y con él las solicitaciones, del volumen- incluso en la miniatura de la maqueta ciertos aspectos estructurales están presentes. Del mismo modo, igual que en la arquitectura construida no todos los materiales son adecuados dependiendo de la geometría del proyecto, también en la maqueta se verifica este hecho⁷⁷.

⁷⁵ Ibid. Pág 11.

⁷⁶ HUIZINGA, J. *Homo ludens*, Ed. Española (2000), Madrid, 1938. Alianza Editorial.

⁷⁷ V. V. A. A. *Fenomenología y percepción en arquitectura. De la escala 1/1 a la miniaturización de los modelos físicos y virtuales*. (2016) Carlos L. Marcos, Eduardo Carazo*, Joel Olivares**, Jorge Domingo, Ángel Allepuz, Pablo Juan, Justo Oliva, Ramón Maestre, Carlos Martínez, Mercedes Carbonell. Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía.

Por ello, muchos arquitectos han tenido que encontrar la manera de “traducir” los mecanismos que funcionan bien en la escala de maqueta para llevarla a la realidad, porque no siempre la “traducción literal” es válida. De ahí gran parte del mérito del arquitecto en su tarea de materializar las ideas porque el escalado de la forma únicamente no funciona bien. En materia de estructura, los elementos que funcionan bien a una escala pequeña no suelen funcionar en la escala real. Un ejemplo de funcionamiento que sí es escalable son las articulaciones. Éstas, aunque haya que redimensionarlas, mantienen sus propiedades de comportamiento asociado al movimiento, forma, etc, y han sido de gran ayuda en la ardua tarea del arquitecto por materializar sus ideas.

1.3.2.2. La fácil modificación del modelo

La capacidad de cambio en los modelos es esencial para que sean llamados como tales. Sin la capacidad de cambio no se puede trabajar con ellos. Su “ser incompleto” es lo que le da su capacidad de ser útil, sugerente, da pie a que la imaginación (expectativas, aspiraciones, etc) y los condicionantes físicos (la gravedad, la luz, etc) entren en juego y enriquezcan juntos el proyecto.

Frente a los proyectos que únicamente se parecen a conceptos y se chocan con la realidad de la simultaneidad de la vida, la maqueta aparece como herramienta intermedia entre la frialdad de las ideas que viven bien sólo en la cabeza y el calor de la vida. Por decirlo de alguna manera, la maqueta tiene una función “trans-naturalizante” de las ideas, de la naturaleza incorpórea a la naturaleza corpórea.

Esa capacidad de cambio es la que permite al modelo ser una pieza clave en el proceso de proyecto. No sólo por su ventaja para probar diferentes alternativas, sino sobre todo porque el proyecto se enriquece al comprobar la simultaneidad de efectos que antes se pensaban por separado en la mente, como conceptos, y se unen y cobran fuerza al comprobarse en la maqueta.

1.3.2.3. Materiales que emulan realidades

La elección de los materiales de la maqueta es una decisión importante que tiene mucho que ver con la escala y es un punto en común con el mundo de la escultura. Como escribe Maderuelo⁷⁸ en su libro “Caminos de la escultura contemporánea”: *“en función de los materiales la construcción del modelo será más o menos difícil, pero lo más importante es que tendrá unas connotaciones que le hagan asemejarse con la realidad o no”*.

Depende del tipo de modelos, todavía cobra mayor importancia si en el modelo queremos que exista el mismo comportamiento estructural que en el edificio proyectado como son nuestros casos de estudio.

Como hemos escrito antes, desde Galileo es bien sabido que la escala influye en el comportamiento estructural –por el hecho de que la resistencia depende de la sección mientras el peso, y con él las solicitaciones, del volumen- incluso en la miniatura de la maqueta ciertos aspectos estructurales están presentes.

Sin embargo, la relación establecida entre la maqueta y el material con el que se construye presenta, al menos, un aspecto problemático que se pone de manifiesto en su condición de modelo a escala. El material con el que se elabora la maqueta está presente en su escala real y por ello con las condiciones de apariencia que delatan su escala propia; particularmente el grano, la textura o el posible veteado en lo que se refiere a su apariencia visual, por un lado, y la resistencia, así como su verdadera dureza, por otro. Sin embargo, el tamaño del objeto que con dicho material se configura no lo es, se trata de una representación miniaturizada.

Clasificación de maquetas en función de sus materiales:

1. La maqueta construida a efectos de comprobar o probar el cumplimiento de determinados requisitos resistentes, estructurales o funcionales de cada material. Un prototipo a escala sometido a las limitaciones que este tipo de comprobaciones, tiene como consecuencia el efecto distorsionador de la diferencia de tamaño, con consecuencias evidentes tanto en el estado tensional y resistente, afectadas por la ley cuadrado-cubo que puso en evidencia Galileo, como se ha comentado anteriormente.

⁷⁸ MADERUELO, J. *Caminos de la escultura contemporánea*, Ed Salamanca. Universidad de Salamanca. 2012, Pág 24.

2. La maqueta elaborada con un material completamente diferente al que se pretende utilizar en su construcción y acabados reales, cuyo objetivo es distanciarnos de la condición impuesta por el mismo material, cuya escala no se puede adaptar ni en texturas, ni en vetas. A veces se utiliza para dotar a la maqueta de un carácter escultórico o para discriminar y destacar un material sobre otros, un recurso especialmente adecuado en el enfoque conceptual conducente a transmitir una idea arquitectónica.
3. Los modelos realizados a escala 1/1, cuyos materiales son reales –prototipos-producidos para someterlos a pruebas y ensayos de todo tipo, o para mostrar a la verdadera escala aspectos como la percepción espacial envolvente que sólo dicho tamaño en relación con el nuestro nos permite contemplar.
4. La maqueta de materiales evocadores que refuerzan algún carácter específico de la obra como la ligereza, la transparencia o la opacidad que surgen directamente de las propiedades físicas pero que se distancian del material con el que se construirá el edificio.

Una vez que se han tenido en cuenta los aspectos esenciales en el trabajo con modelos físicos, es necesario analizar cuál es el alcance que tiene esta herramienta con la que cuenta el arquitecto para sacar de su mente los conceptos que quiere aplicar al proyecto y que los comprueba y mide en el modelo.

1.4. Sobre los casos escogidos

Los casos elegidos son cinco pabellones proyectados por Frei Otto, Richard Buckminster Fuller y Emilio Pérez Piñero. Estas construcciones tienen en común haber aparecido en un periodo de tiempo muy concreto en el que, por dos razones que a continuación se desglosarán, hacen que tenga especial relevancia su estudio y su puesta en relación.

En primer lugar, los pabellones elegidos fueron proyectados por arquitectos que coincidieron en el tiempo y en su manera de trabajar con modelos físicos estructurales durante el proceso de diseño. En segundo lugar, estos Pabellones también coinciden en desarrollarse justo antes de la revolución digital en el campo de la simulación. Algunos de ellos son los motivos del gran avance de algunos programas de simulación digital.

Empecemos por la coincidencia temporal y de metodología. Dos de los cinco casos, de gran importancia en esta tesis, coinciden en la exposición universal de 1967 en Montreal: el Pabellón de los Estados Unidos de América diseñado por Richard Buckminster Fuller, y el Pabellón de Alemania proyectado por Frei Otto.

En el caso del Pabellón americano se produce el anteriormente citado auge y agotamiento de la era de la construcción en la que los edificios estaban proyectados a partir de una idea prefijada de la forma. Este Pabellón nos va a servir como caso de contexto como veremos más adelante.

En el caso del Pabellón de Alemania, que estaba a apenas 500m del anterior, se mostró por primera vez en el escenario internacional la posibilidad de un modo de proyecto de arquitectura basado la construcción de unas formas generadas a partir de determinados comportamientos estructurales. Este Pabellón nos servirá para introducir los casos que aportan esta variable en los proyectos a través del trabajo con modelos.

En ambos casos, y en los demás pabellones elegidos que desarrollaremos más adelante, la construcción del Pabellón supone el culmen de la investigación experimental con modelos físicos. Los inicios de estas investigaciones coinciden también en el tiempo, entre finales de los años 40 y comienzos de los 60 del siglo XX.

Este tipo de trabajo con modelos dentro del proceso de diseño y cálculo tiene una larga tradición y ha estado más ligado al ámbito del cálculo de estructuras por parte de los ingenieros, generalmente para el diseño de puentes y grandes infraestructuras, que al de la arquitectura.

Esta manera de utilizar los modelos para el cálculo y consecución de la forma de las estructuras fue, con el tiempo, desarrollándose de manera desigual en torno a distintos comportamientos estructurales. En esta tesis se recogen casos límite de las tres grandes líneas de investigación de este tipo de metodologías experimentales.

El primer caso del que tenemos evidencia de la incorporación del trabajo con modelos físicos para diseñar arquitectura proviene del modelo construido por Robert Hooke y Christopher Wren para la construcción de la cúpula de la Catedral de San Pablo en Londres. En 1676 Hooke observó que la forma de equilibrio de un arco era la misma, aunque invertida, que la de una cadena colgante que comprendía los mismos pesos que el arco. Esto demostró que si el inverso del arco catenario se encontraba dentro de la mampostería ésta funcionaría correctamente.

Con este hecho se abrió la investigación con modelos físicos estructurales para comprobaciones a compresión. Pero también, años después, sin haberlo buscado intencionadamente, sobre comprobaciones a tracción (recordemos que antes de invertir la catenaria funciona toda ella a tracción).

Y, además, el hecho de utilizar el modelo colgante de Hooke, permitió reconocer las ventajas del uso de las articulaciones en los modelos de prueba. Un modelo articulado, las cadenas de una catenaria forman entre sí el equivalente a una serie de articulaciones una detrás de la otra, fue el detonante de este tipo de investigaciones con modelos físicos.

En definitiva, quedaban iniciados así los tres grandes grupos de investigación a través de los modelos físicos de comprobación: el grupo de las comprobaciones de esfuerzos a compresión, el grupo de las comprobaciones de esfuerzos a tracción, y el grupo de comprobaciones del uso del movimiento que permiten las articulaciones en los modelos para hallar la forma más adecuada de la estructura.

Tres de los cinco casos estudiados en esta tesis son casos límite de esta triple manera de investigar:

En primer lugar, el Multihalle de Mannheim, diseñado por Frei Otto, es el caso límite de la construcción de una cubierta trabajando a compresión con el menor espesor.

En segundo lugar, el Pabellón Alemán de la Expo'67, también diseñado por Frei Otto, fue el primer caso límite de cubierta de grandes dimensiones construida únicamente con membrana trabajando

a tracción (sólo superado por el arquitecto alemán, años más tarde con la construcción del Estadio Olímpico de Munich).

Y, para terminar esta serie de casos en los que el comportamiento genera la forma, el Pabellón transportable para los XXV años de Paz, diseñado por Emilio Pérez Piñero, es el caso límite de cubierta desplegable más grande conocido. En esta cubierta plegable se permitió el movimiento a través del uso del comportamiento de las articulaciones, que modifican la forma, y consiguen que el Pabellón se adapte para poderse transportar.

Los otros dos casos, las cúpulas del Pabellón Estadounidense de la Expo del 67 de Richard Buckminster Fuller y del teatro transportable de los Festivales de España de Emilio Pérez Piñero, introducen en la tesis casos de contexto, también límites, del alcance técnico de las estructuras que se hacían en aquel momento, diseñadas también a través del uso de modelos físicos pero partiendo desde una forma pensada y no adquirida a través del comportamiento.

En el caso del diseño y construcción del Pabellón de los Estados Unidos por parte de Richard Buckminster Fuller, puso al límite el uso de las estructuras estéreas de barras para grandes luces y conformando superficies curvas. En el inicio de su investigación, el problema residió en la resistencia de elementos individuales de la geometría de la esfera, y el arquitecto estadounidense supo encontrar una solución a través del trabajo con un modelo físico estructural.

En la cúpula construida por Emilio Pérez Piñero para los Festivales de España se permitió el desmontaje en conjuntos de barras que consiguen que el Pabellón se adapte para poderse transportar. Esta construcción desarrolló de manera singular la investigación sobre construcción y transportabilidad de estructuras monocapa con gran facilidad y rapidez.

Por otro lado, como se ha indicado con anterioridad, los cinco casos estudiados coinciden al producirse en la época anterior en el tiempo al comienzo de la simulación digital. Ésta hoy sigue siendo deudora y sigue desarrollándose, en parte, gracias a proyectos como los que se expondrán a continuación, que abrieron brecha en la investigación con modelos físicos.

Este último apunte es importante; se desarrollará más ampliamente a continuación. El primer análisis estructural digital estuvo disponible para los ingenieros a finales de la década de 1960 en gran parte gracias a una serie de comprobadores de modelos, en particular Heinz Hossdorf (1925-

2006)⁷⁹, que vincularon la salida de galgas extensométricas⁸⁰ a las computadoras, más parecidas a grandes calculadoras que a las que conocemos en la actualidad, para realizar análisis híbridos que alimentaron de datos reales al software de análisis para proporcionar un proceso de modelado general mejorado⁸¹.

A mediados de la década de 1970, el modelado basado en el cálculo virtual gracias a las nuevas tecnologías estaba en camino de reemplazar la necesidad de probar el modelo físico. Sin embargo, la contribución al desarrollo y refinamiento de los métodos analíticos no debe pasarse por alto ya que el avance en el campo de la simulación se produce gracias a este tipo de tomas de datos con modelos físicos.

El último de los casos estudiados en esta tesis, el Multihalle Mannheim (1974-1975), ilustra bien el grado de sofisticación que lograron las pruebas con modelos físicos, combinando varias pruebas de modelos con diferentes propósitos, y un análisis digital que estaba al límite de lo que era posible en aquel entonces.

En pocos años, el modelado digital se volvió suficientemente rápido, preciso y fiable para satisfacer las necesidades del diseñador y el uso de las pruebas de modelos físicos disminuyó rápidamente desde mediados de la década de 1970.

Los casos elegidos son proyectos de arquitectura experimental, experimentos inauditos, en los que los binomios “proyecto-técnica” y “geometría-comportamiento” se identifican, aunque en cada uno de ellos se acentúe más alguno de los citados aspectos respecto a otros.

Son proyectos de una gran coherencia técnica en torno al material utilizado, su forma y su comportamiento. Por esa razón se han excluido los proyectos que tienen al hormigón como material de construcción, porque en ellos esta relación no está tan clara. El hormigón armado tiene la posibilidad de adquirir una forma desconectada del comportamiento y eso nos aleja de la coherencia que buscamos.

⁷⁹ HOSSDORF, H. *Das Erlebnis Ingenieur zu sein*, Basel: Birkhäuser. 2003.

⁸⁰ Las Galgas Extensométricas son sensores cuya resistencia varía con la fuerza aplicada. Estos sensores convierten la fuerza, presión, tensión, peso, etc, en un cambio de la resistencia eléctrica el cual puede ser medido.

⁸¹ ADDIS, B. *Toys that save millions. A history of using physical models in structural design*. Structural Engineer. The Institution of Structural Engineer. 2013.

Para poder trabajar desde el proceso de diseño con esta coherencia, este estudio aborda sólo los modelos que estos arquitectos usaron durante el proceso de desarrollo del proyecto y no otros modelos que se usaron a posteriori. Estas pruebas están únicamente destinadas a determinar resultados cuantitativas relacionadas con múltiples síntomas de la coherencia entre proyecto y técnica, por un lado, y entre forma y comportamiento por otro lado: la forma estructural, las deflexiones, las tensiones, los momentos de flexión, las cargas de viento, el comportamiento dinámico, la resistencia máxima, la estabilidad y las cargas de colapso y estabilidad.

Otros usos de los modelos se salen de este estudio: la capacidad de los modelos de transmitir la geometría de los edificios a clientes y constructores, la capacidad de verificar con esos modelos la viabilidad de la construcción y ensamblaje, etc.

Modelos como los que se estudian en esta tesis se han solido utilizar en arquitectura únicamente cuando los cálculos de la teoría estructural⁸² se consideraron inadecuados o habrían sido demasiado complejos o consumirían mucho tiempo. También cuando se han desarrollado nuevos tipos de estructura sin precedentes. Sobre todo, en el siglo XX, para poder construir láminas cada vez más delgadas de hormigón armado⁸³, y para construir celosías de madera, barras metálicas o redes de cables.

Estas contribuciones al progreso de la ingeniería estructural y a la arquitectura experimental gracias a las pruebas con modelos, tanto al diseño de muchas estructuras extraordinarias e innovadoras como en general, no han sido debidamente reconocidas y han sido abordadas por muy pocos historiadores de la ingeniería estructural⁸⁴

⁸² TIMOSHENKO S. P. *History of Strength of Materials*, McGraw Hill. New York, 1953.

KURRER K.-E *The history of the theory of structures: From arch analysis to computational mechanics*, Ed Ernst & Sohn. Berlin, 2008.

HUERTA S. *The safety of masonry buttresses*. Proc. Inst. Civ. Eng., Engineering History and Heritage, 163 (EH1), Londres, 2010. Págs. 3-24.

HEYMAN J. *Structural Analysis: A Historical Approach*, Cambridge University Press. Cambridge, 1998

⁸³ Ya explicamos por qué se descartaron los proyectos que fueron construidos en hormigón armado. Si lo que pretendemos es poner en relación proyectos en los que proyecto, técnica, forma y comportamiento se identifiquen, el hormigón queda excluido por su capacidad de lograr cualquier forma que se pueda reproducir en un molde.

⁸⁴ PIGA C. *Storia dei modelli dal tempo di Salomone alla realtà virtuale*. Seriate, Ed: ISMES Istituto Sperimentale Modelli e Strutture. Roma, 1996.

Por tanto, para ordenar los casos se ha escogido situarlos en esta tesis en función del inicio de las respectivas investigaciones con modelos físicos, aunque también se podrían haber ordenado en función a otros criterios en los que coinciden en función de los distintos comportamientos, en función de la finalización de los comportamientos de los distintos Pabellones, de las metodologías empleadas de proyecto y diseño, etc. Esta elección resulta la más lógica en un estudio sobre aportaciones desde el trabajo con modelos físicos estructurales.

No obstante, aunque en esta tesis se hace hincapié en el uso de los modelos físicos de trabajo, también la propia construcción de los Pabellones supone, en muchos de estos casos, la parte del proceso de investigación más interesante, las comprobaciones más necesarias, las que dieron sentido y medida al resto de comprobaciones, porque en esos casos la construcción final es también un modelo físico de cálculo.

Siendo así, el primer caso expuesto en la tesis es el proceso de investigación que dio pie a construir la cúpula geodésica de Richard Buckminster Fuller en 1967. Su inicio se remonta al verano del año 1948, en los ejercicios realizados con alumnos de la Back Mountain College. Ese año el arquitecto norteamericano fracasó en su intento de construir la que hubiera sido su primera cúpula geodésica y no lo consiguió hasta el verano del año siguiente. Ese primer modelo consiguió materializar una estructura monocapa de esfera para la que posó, junto con sus alumnos, colgado de sus nudos para hacer ver la resistencia de su hallazgo personal (como ya mencionaremos más adelante, la primera cúpula geodésica ya fue construida en 1922 para el planetario de Zeiss).

El segundo caso que se expondrá es el Pabellón Alemán de la Exposición Universal de 1967. Para llegar hasta ese resultado final, la investigación de Frei Otto con membranas trabajando a tracción inició en 1955 para un encargo de una cubierta temporal para una feria de horticultura alemana⁸⁵.

El tercer caso abordará la obra de Emilio Pérez Piñero que, a diferencia del resto de Pabellones, es un caso verdaderamente peculiar por su precocidad. Aunque está influenciado por los avances

CHIORINO M. A., Sabia D. and Bruno L. (2003) 'Structural models: historical notes and new frontiers' in Levi F., Chiorino M. A. and Bertolini Cestari C. Eduardo Torroja - *From the philosophy of structures to the art and science of building*, Milán, 2003. Págs. 120-159.

CHIORINO M.A. and Neri G. (2010), 'La modellazione strutturale nel Novecento. Ragioni e diffusione dell'induttivismo sperimentale in Italia e all'estero'. Atti del 3o Convegno Nazionale di Storia dell'ingegneria, Nápoles, 2010, Págs. 367-76

⁸⁵ VRACHLIOTIS, G. "Denken in Modellen" KIT Publications. Karlsruhe, 2017.

de Fuller y sus cúpulas geodésicas, las aportaciones técnicas del arquitecto murciano desde que en 1961 construyera el modelo del teatro plegable para el concurso que organizó ese mismo año la UIA en Londres, lo sitúan en una categoría diferente a la del arquitecto estadounidense, desde el punto de vista del avance del conocimiento en el funcionamiento de las estructuras plegables.

Es destacable que mientras que los otros arquitectos de los demás Pabellones llegan a materializar sus investigaciones en su estado más límite tras una media de 15 o 20 años, Pérez Piñero lo consigue en apenas 3 años.

El estudio de los casos se cierra con otro proyecto de Frei Otto. El arquitecto alemán da un vuelco radical a la que, hasta entonces, era su investigación con elementos traccionados, por su eficaz funcionamiento en cuanto a resistencia y optimización de recursos materiales. En este caso el arquitecto alemán diseñó una cubierta que funcionó únicamente a compresión, utilizando el mínimo material, para la cubierta del Multihalle de Mannheim. La construcción de este Pabellón insólito es el culmen de una investigación que arrancó en 1962 en Essen, Debau.

Por tanto, la primera de las causas de la elección del orden de los casos tiene su origen en el comienzo de la actividad investigadora de los arquitectos citados anteriormente tal y como se muestra en la tabla siguiente:

Inicio de la investigación con modelos	Construcción final	Arquitecto	Localización	Año construcción
1948	Pabellón EEUU de la Expo'67	R. B. Fuller	Montreal, Canadá	1967
1955	Pabellón Alemán de la Expo'67	Frei Otto	Montreal, Canadá	1967
1961	Pabellón para los XXV Años de Paz	E. P. Piñero	Madrid, Barcelona y San Sebastián, España	1964
1961	Teatro transportable para los Festivales de España	E. P. Piñero	A Coruña, España	1966
1962	Multihalle de Mannheim	Frei Otto	Mannheim, Alemania	1972

1.5. Metodología: Estudio de casos

La metodología seguida para cada caso de estudio es pasar por los hitos más importantes del proceso de proyecto, desde la planificación hasta los últimos momentos de la construcción, para contrastar la idea prevista por el arquitecto, el proyecto, antes de comenzar con el resultado final, con el propósito de comprobar hasta qué punto existe un enriquecimiento y una necesidad real de la utilización de modelos físicos estructurales dentro de los distintos pasos de diseño y construcción.

Para ello, el orden seguido es el habitual en el ejercicio de la profesión, empezar por las ideas y terminar por la construcción. Una vez relatado el proceso de construcción, nos centraremos en la manera en que han facilitado el trabajo los modelos físicos desde dos perspectivas: la formal y la estructural.

La perspectiva formal tiene dos facetas muy bien diferenciadas: la consecución de la forma y la representación formal de la misma para poder planificar la construcción distinguiendo piezas, elementos, etc. En algunos de los casos que se van a estudiar a continuación, las geometrías son tan complejas que no existían maneras de representarlas, obligando así a los arquitectos a tener que inventar su propio sistema de representación de su proyecto. En otros, la necesidad de conseguir una determinada forma ha sido el punto de partida desde el que empezar el diseño arquitectónico. Es un elemento común a todos los casos es que la respuesta escogida ha contado con las características materiales y formales de los distintos materiales para hallar la forma final del proyecto.

La perspectiva estructural es la que hace a estos arquitectos ejemplares e inauditos hasta entonces. Que el comportamiento estructural sea un punto de partida desde el que empezar a diseñar es lo que muy raras veces se había dado en la historia de la arquitectura, salvando casos muy contados. En el apartado de Antecedentes de este mismo capítulo se nombrarán los más significativos.

Dentro del análisis del comportamiento estructural, siempre ligado a las características geométricas de los elementos de la estructura, destaca en esta tesis la capacidad de movimiento que aportan las articulaciones. Estas permiten el cambio dentro del proceso de diseño, tanto en los modelos como en el final de la construcción, aunque a veces no se distingue bien cuál es el modelo y cuál es el estado final del edificio porque en ambos se comprueban diferentes comportamientos materiales. El movimiento permite cambios formales y de comportamiento,

permite un sistema desde el que poder probar distintas combinaciones con los elementos de partida, hasta llegar a soluciones inesperadas por el autor, enriquecidas por la simultaneidad de efectos al materializar las ideas.

1.5.1. Antecedentes a los casos de estudio

Los proyectos que se van a estudiar en esta tesis son cubiertas singulares que tienen en común el poner en juego por primera vez una solución estructural que antes no se había utilizado. Al ser todos los Pabellones elegidos cubiertas para grandes espacios libres, las limitaciones se ven reducidas porque sólo se soportan a sí mismas y a las sobrecargas habituales, sin grandes cargas variables de uso. Por eso una de las características fundamentales de todas ellas es la ligereza y la capacidad de dejar pasar la luz entre sus elementos de sustentación. De ahí en parte también su gran libertad para jugar con nuevas soluciones.

El proyecto en los casos estudiados, la solución elegida para dar respuesta a todos los requerimientos del programa, se resuelve sólo con una cubierta ligera inaudita. Los casos estudiados son pabellones diseñados para que únicamente desde la estructura se dé respuesta a todos los requerimientos que exige el programa. Esta elección se debe al criterio anteriormente citado de la búsqueda de la mayor coherencia entre forma de proyecto y comportamiento estructural.

Además de las ya mencionadas condiciones, los proyectos elegidos para ser casos de estudio coinciden que son proyectos de arquitectura que se han basado en sus maquetas, También que en todos los casos se parte desde mecanismos⁸⁶, en los modelos dentro del proceso de diseño, para hacer de ellas estructuras estables gracias al uso de articulaciones. Y la más importante de las condiciones: que se parte de comportamientos buscados para llegar a una forma no buscada, es decir, que no parten de una idea cerrada a priori.⁸⁷

⁸⁶ Mecanismo: conjuntos móviles de barras unidas que aún no conforman una estructura estable.

⁸⁷ En todos los casos estudiados menos en el de Richard Buckminster Fuller que, como ya explicamos con anterioridad es un caso de contexto.

1.5.1.1. Mecanismos para llegar a la estructura. El uso de las articulaciones en los modelos.

a) La forma del proyecto y las articulaciones en los modelos para permitir el movimiento (cambio)

Como hemos dicho antes, de estos modelos se aspira conseguir el proyecto, no se llega al modelo con una idea preconcebida de la forma, sino que se espera conseguir la forma de él. Cada autor busca en el uso de las articulaciones movimientos, cambios de estado, de mecanismo a estructura, distintos, como veremos más detalladamente en cada caso de estudio.

Para trabajar con el modelo es necesario que éste se pueda modificar, mover, darle la vuelta, etc. Es necesario que aguante muchas modificaciones porque el arquitecto la está utilizando como herramienta para diseñar la forma del Pabellón a través de su comportamiento estructural.

Como es lógico, al trabajar con el modelo el arquitecto intenta buscar un sistema que le permita el mayor número de modificaciones y combinaciones con el menor coste posible en tiempo y recursos materiales. Eso lo consiguen a través de trabajar con articulaciones, como Gaudí con sus modelos, utilizando así las uniones más básicas posible con el mayor grado de libertad. Una herramienta que permita aprender de ella, el modelo, ha de tener todo lo necesario para ponerse en situación, pero también ha de ser proporcionada en recursos económicos, espaciales y tiempo a lo que realmente es: un instrumento de trabajo.

En esta tesis, los modelos estudiados han requerido un diseño que a veces ha llevado más tiempo que el que se le ha dedicado a materializar la solución final. Y esto es así porque de esos modelos se esperaba mucho; de esos modelos se habría que poder obtener las soluciones constructivas, la forma, la apariencia, la fuerza en definitiva del proyecto.

1.5.1.2. Las articulaciones en los modelos para generar un determinado comportamiento estructural

La articulación, la unión que más grados de libertad permite, ha tenido muchas maneras de materializarse tanto en la construcción definitiva como la de los modelos. Su uso en modelos no

se empezó a utilizar hasta 1676 con Hooke⁸⁸ pero no destaca sensiblemente con aportaciones geométricas notables hasta el conocimiento del trabajo de Gaudí con sus modelos colgantes tridimensionales.

Gracias a Hooke, del que hablaremos más adelante al citar el origen del trabajo con funiculares, sabemos que con el uso de las articulaciones en los extremos de las barras que componen una estructura podemos garantizar que los esfuerzos que se transmiten a través de ellas son axiales, es decir de compresión o tracción.

Pese a esta máxima del científico inglés, no tenemos constancia de que se utilizase en modelos antes que Gaudí. Esto es debido, muy posiblemente, al elevado coste de tiempo y recursos que suponía hacer una articulación y más tratándose de una articulación para una maqueta. También porque el uso de estructuras articuladas no estaba muy extendido por aquella época.

Gaudí consiguió usar articulaciones en sus modelos al poderlas imitar con simples hilos. Esta genialidad del arquitecto catalán revolucionó el trabajo con modelos desde ese momento. Desde ese momento se pudo materializar el efecto de las articulaciones con un bajísimo coste en recursos materiales y tiempo.

Su uso no supuso sólo una forma espontánea debida a la acción de la gravedad, supuso sobre todo un comportamiento interno con muchas ventajas desde el punto de vista estructural. El poder garantizar que esas estructuras sólo trabajaran a compresión o tracción, esfuerzos fácilmente controlables, en contraposición a los esfuerzos de flexión, cortante y torsión, menos manejables para la construcción, y muy complejos para utilizar en estructuras formadas por barras, dio pie a una de su obra más famosa: la Sagrada Familia de Barcelona.

⁸⁸ Robert Hooke (Reino Unido, Freshwater, Isla de Wight 1635- -Londres, 1703) fue un científico inglés. Es considerado uno de los científicos experimentales más importantes de la historia de la ciencia, polemista incansable con un genio creativo de primer orden. Sus intereses abarcaron campos tan dispares como la biología, la medicina, la horología (cronometría), la física planetaria, la mecánica de sólidos deformables, la microscopía, la náutica y la arquitectura.

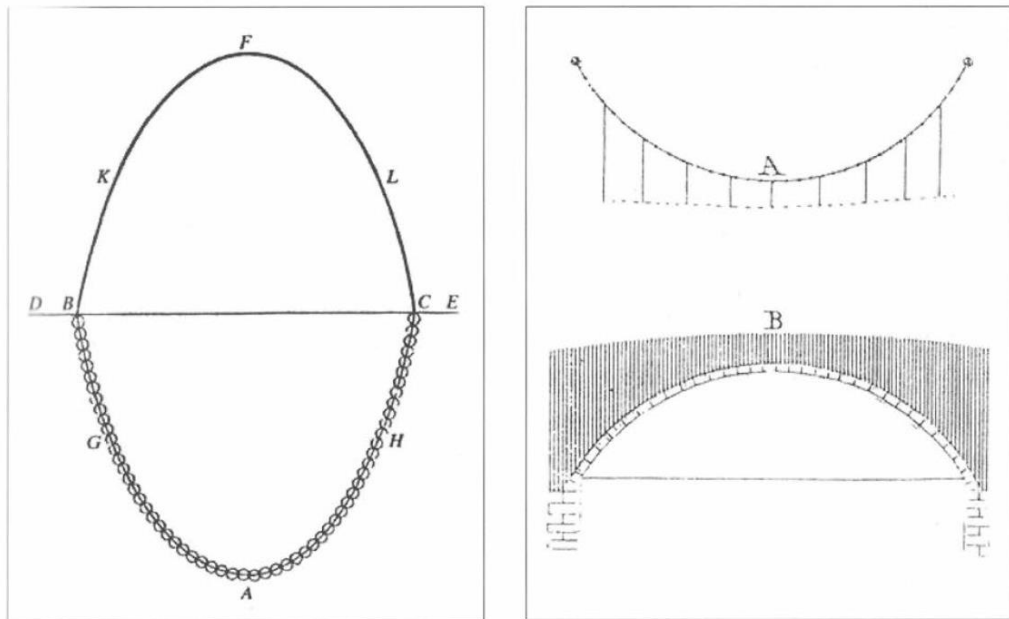


Imagen 3: Figura de Hooke sobre la analogía entre arco y catenaria (Dibujo de Poleni, 1748)

Cálculo de un puente empleando un modelo colgante (Young 1845; 1ª ed. 1807)

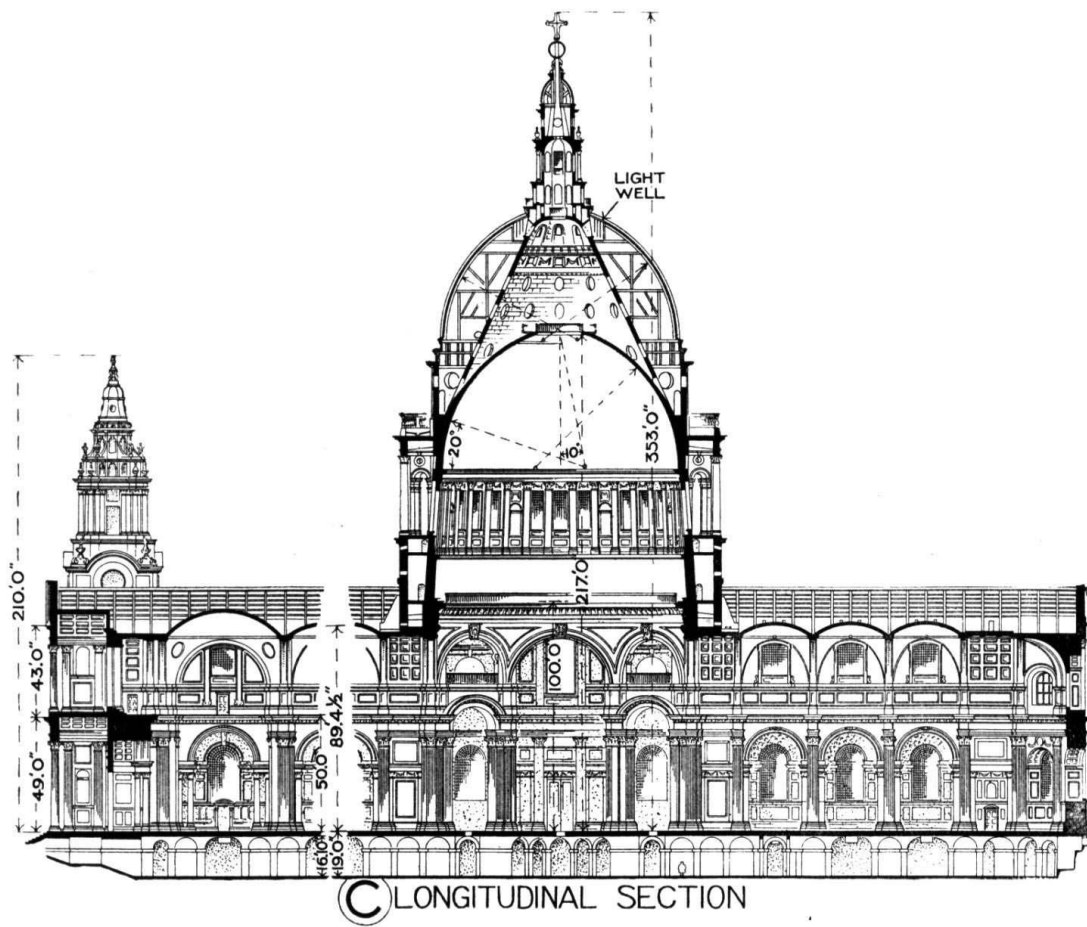


Imagen 4: Sección por la cúpula de la Catedral de Londres. Robert Hooke y Christopher Wren 1676

1.5.2. Antecedentes a los casos de estudio

1.5.2.1. Gaudí precursor de modelos de mecanismos para hacer estructuras

El arte gótico es imperfecto, está a medio resolver; es el estilo del compás, de la fórmula de la repetición industrial. Su estabilidad se basa en el apuntalamiento permanente de los contrafuertes: es un cuerpo defectuoso que se aguanta con muletas. (...) ⁸⁹

Es conocido que Gaudí (1852-1926) pretendía perfeccionar el gótico con lo que llamó el *gótico mediterráneo*^{90 91}. En su cabeza continuaba el mismo esquema, los nervios contruidos en piedra conducían las fuerzas, desafiando a la gravedad, hasta depositarlas a buen recaudo en el suelo. Pero había también importantes avances que mejoraban y dotaban de aún mayor coherencia al gótico; los arbotantes y contrafuertes, Gaudí la denominaba muletas innecesarias, habían sido superados tras experimentar, gracias a su trabajo con modelos, cómo hacer casi desaparecer los empujes horizontales inclinando sus apoyos⁹².

Sus diseños de edificios, afortunadamente llegó a construir muchos de ellos, irrumpieron con mucha fuerza en un contexto de un modernismo que a su juicio era sólo un “lavado de cara” de la herencia recogida, nada que ver con sus planteamientos de edificio coherente, donde estructura, forma y función se identificaban.

Para ello siempre recurrió a la naturaleza, su única e infinita fuente de recursos arquitectónicos. Tan es así que hizo que sus diseños más estudiados vinieran modelados por la naturaleza y para eso no dudó en aliarse con fenómenos físicos como la gravedad, la masa, la resistencia de los materiales que tuvo a su alcance.

⁸⁹ MARTINELL, C. *Conversaciones con Gaudí*. Ediciones Punto Fijo, Barcelona 1969.

⁹⁰ PRADA POOLE, JM. *El modelo colgante de Gaudí y su reconstrucción. Nuevos conocimientos para el diseño de la Iglesia de la Colonia Güell*. Informes de la Construcción, Vol. 41 n.º 404, Madrid, 1989.

⁹¹ TOMLOW, J. *Das Modell. Antoni Gaudis Hangemodell und seine Rekonstruktion. Neue Erkenntnisse zum Entwurf für die Kirche der Colonia Güell*. Stuttgart: Institut für leichte Flachentragwerke. Universität Stuttgart. [texto en alemán, inglés y español] Stuttgart, 1989.

⁹² HUERTA, S. *El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí*. Ingeniería Civil 129/2003. Madrid, 2003.

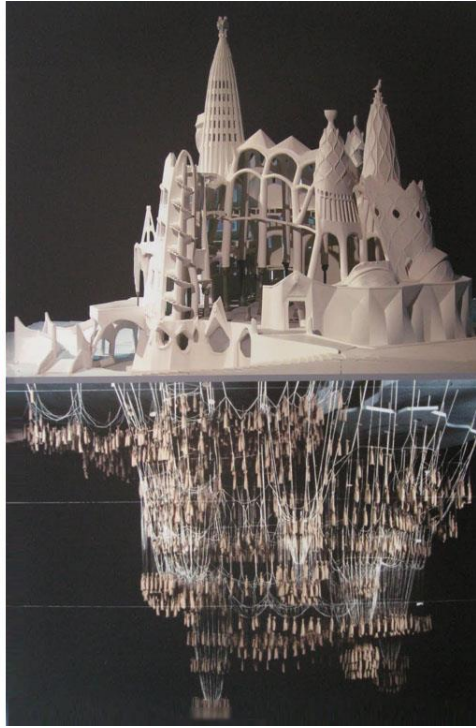


Imagen 5: Modelo físico estructural de Gaudí para la Iglesia de la Colonia Güell



Imagen 6: Maqueta con cadena de la Iglesia de la Colonia Güell

No podemos afirmar que tuviese un absoluto control, una definición precisa, sobre qué ocurría exactamente en el interior de cada punto de sus estructuras tal y como lo tenemos hoy con los avances de la ciencia y la tecnología. Lo que sí podemos decir es que tenía una intuición extraordinaria, hasta tal punto que manejó esas intuiciones sobre la naturaleza con una destreza espectacular, sin que le hiciera falta tener una radiografía exacta de ella.

Gaudí es el primero del que tengamos constancia que hiciera un modelo colgante tridimensional, fabricado con hilos ¡un mecanismo! Y tuvo la genialidad de ver en él la forma de su futura estructura. Con ese modelo colgante consiguió obtener el negativo formal y estructural de sus obras cumbre, la Sagrada Familia y la Iglesia para la Colonia Güel.

Es difícil cuantificar y cualificar la intuición que tuvo Gaudí, lo que sí podemos constatar es el alcance de la técnica en su época y en su situación geográfica, y también podemos poner en contexto su formación:

La cuestión de la catenaria se remonta al año 1670 cuando Robert Hooke planteó en la Royal Society (de la que también formaba parte Newton⁹³, Wren⁹⁴, Boyle⁹⁵): cuál es la forma ideal de un arco y cuánto empuja sobre sus estribos. Él mismo da solución a este problema 6 años después en un libro sobre relojes: *“Del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así pero invertido, se sostendrá el arco rígido”* (Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum).

Desde entonces la investigación sobre catenarias no encuentra final: en 1697 Gregory⁹⁶ avanza en ella, aunque no termina de resolver la ecuación matemática de la catenaria, porque Hooke no

⁹³ Isaac Newton (1642- 1727)

⁹⁴ Christopher Wren (Wiltshire, Inglaterra, 1632-1723) fue un científico y arquitecto del siglo XVII, famoso por sus trabajos de reconstrucción de las iglesias de Londres. Tras el gran incendio de 1666 fue nombrado *fellow* de la Royal Society.

⁹⁵ Robert Boyle (Waterford, 1627-Londres, 1691) fue un filósofo natural, químico, físico e inventor. También fue un prominente teólogo cristiano.

⁹⁶ James Gregory (Drumoak, Aberdeenshire, 1638 – Edimburgo, 1675) fue un matemático y astrónomo escocés. Entre sus logros más notables, figuran aportaciones al cálculo integral y a los desarrollos en serie en el campo de las matemáticas, y al descubrimiento de las redes de difracción en óptica.



Imagen 7: Maqueta funicular de la Sagrada Familia. Gracias al reflejo del espejo tenemos el resultado de lo que sería una estructura que, manteniendo una orientación vertical, resulta apta para la construcción.

tenía expresión matemática para ella, utilizaba la parábola cúbica, que se aproxima bastante⁹⁷. En 1704 Bernoulli⁹⁸ matiza la frase de Hooke añadiéndole una aclaración: “Del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así pero invertido, se sostendrá el arco rígido. *Y si arcos de otras formas se sostienen es porque tienen una catenaria en su interior*”.

Después de este hecho, no es hasta 1807 el siguiente avance notable en este ámbito, cuando Young⁹⁹ realiza una explicación más exhaustiva del porqué de ese funcionamiento¹⁰⁰.

Hasta aquí lo que recibe Gaudí respecto a las catenarias, pero estos conocimientos, unidos al avance de la estática gráfica (Culmann¹⁰¹, 1866)¹⁰², (Rankine¹⁰³, 1858), (Maxwell¹⁰⁴, 1864)¹⁰⁵ y las

⁹⁷ HOOKE, R. *A description of helioscopes, and some other instruments*. Londres, 1676.

⁹⁸ Daniel Bernoulli (Groninga, 1700 - Basilea, 1782) fue un matemático, estadístico, físico y médico suizo. Destacó no solo en matemática pura, sino también en las llamadas aplicadas, principalmente estadística y probabilidad. Hizo importantes contribuciones en hidrodinámica y elasticidad.

⁹⁹ Thomas Young (1773-1829)¹ fue un científico inglés. Young es célebre por su experimento de la doble rendija que mostraba la naturaleza ondulatoria de la luz y por haber ayudado a descifrar los jeroglíficos egipcios a partir de la piedra Rosetta.

¹⁰⁰ YOUNG, Th. *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*. Londres, 1845.

¹⁰¹ Paul Frédéric Culmann (23 de febrero de 1860 - 27 de noviembre de 1936) fue un físico y destacado biólogo suizo.

¹⁰² CULMANN, K. *Die graphische Statik*. Meyer und Zeller. Zürich, 1866.

¹⁰³ William John Macquorn Rankine (5 de julio de 1820 - 24 de diciembre de 1872) fue un ingeniero y físico escocés. Junto con Rudolf Clausius, William Thomson y Lord Kelvin, fue uno de los pioneros de la termodinámica, enfocándose particularmente en la primera de las tres leyes de esta rama de la Física.

¹⁰⁴ James Clerk Maxwell (1831-1879) fue un científico escocés especializado en el campo de la física matemática.

¹⁰⁵ MAXWELL, J. C. *On the Calculation of the Equilibrium and Stiffness of Frames*. Philosophical Magazine, Vol. 27, Londres, 1864. Págs. 294-300.

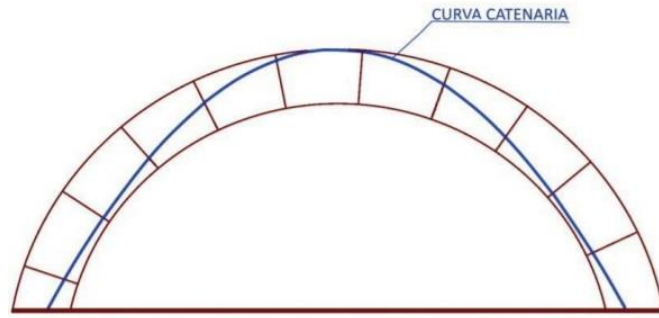


Imagen 8: Catenaria en el interior de un arco de medio punto

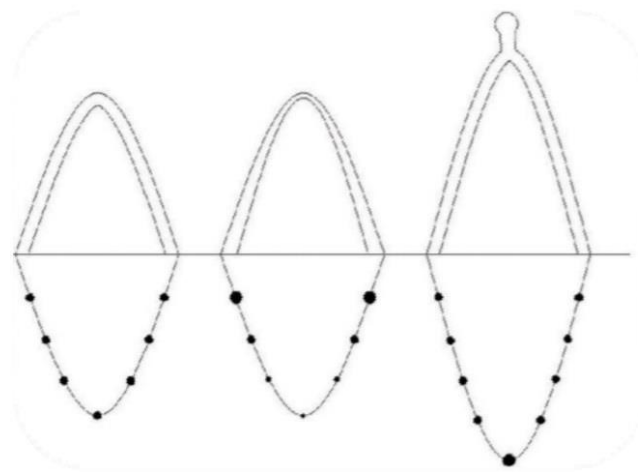


Imagen 9: Diferentes geometrías de arcos en función de la posición de las diferentes cargas

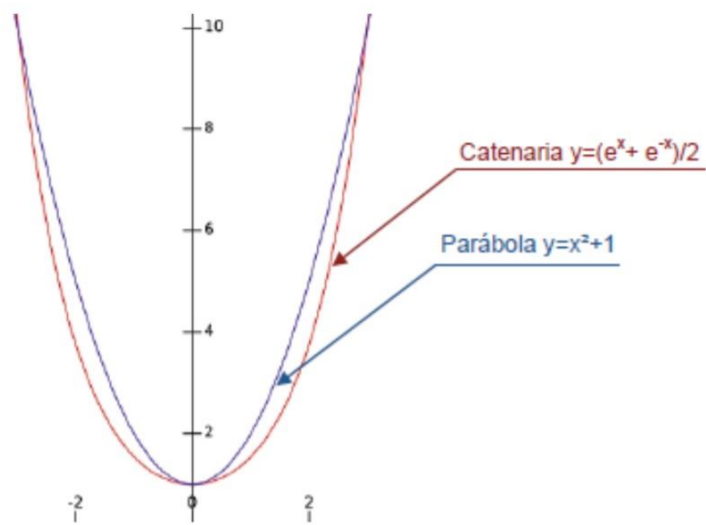


Imagen 10 Diferencia entre la geometría y las ecuaciones de la parábola y la catenaria

distintas teorías sobre líneas de empuje (Moseley¹⁰⁶ y Méry¹⁰⁷, 1840), son las herramientas con que cuenta Gaudí al empezar sus modelos tridimensionales colgantes.

Y para poder llevar a cabo sus ideas Gaudí necesitaba una herramienta muy específica de proyecto, que permitiera realizar cálculos rápidos y variar el proyecto a voluntad. Los cálculos matemáticos, necesariamente tediosos en aquella época, contradecían estos requisitos. Esta herramienta es el modelo tridimensional colgante; los funiculares.

De Gaudí beben los autores que estudiaremos más a fondo y que antes hemos enumerado; Frei Otto y Emilio Pérez Piñero, a él le deben ese atrevimiento y trabajo que, sin duda, marcó un hito y abrió nuevas puertas a la investigación en el ámbito de la geometría aplicada al comportamiento estructural (form finding), aún hoy sin ser muy estudiada, y más específicamente al uso de mecanismos como base desde la cual diseñar las estructuras.

¹⁰⁶ Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915) fue un físico y químico inglés. Su principal contribución a la ciencia fue la justificación cuantitativa del concepto de número atómico mediante la Ley de Moseley.

¹⁰⁷ MÉRY, E. *Mémoire sur l'équilibre des voûtes en berceau. Annales des Ponts et Chaussées*, 1840. Págs. 50-70,

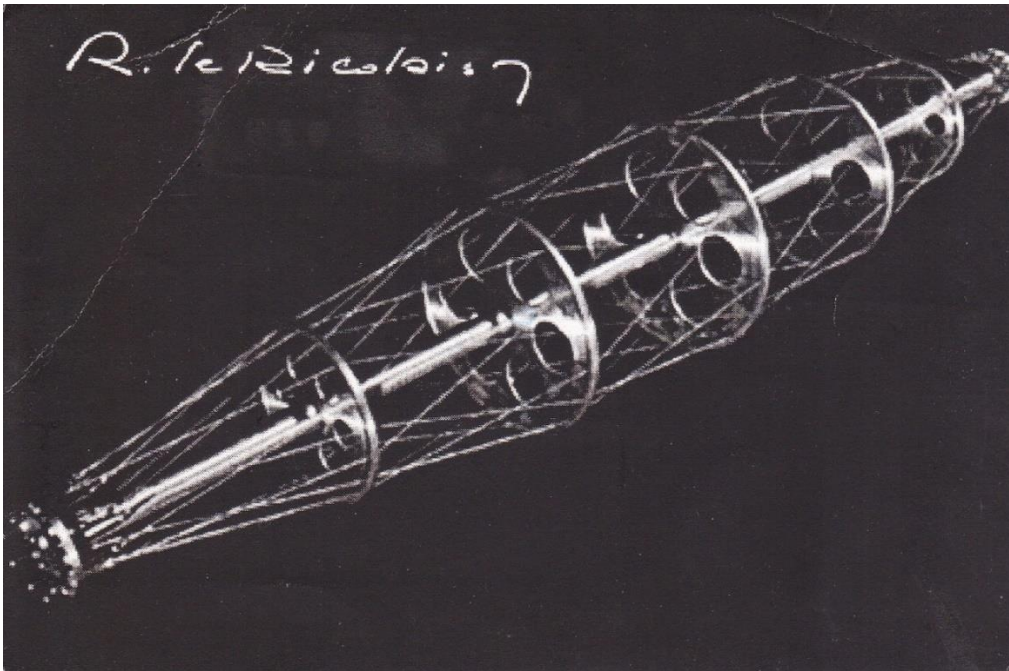


Imagen 11: Modelo de cables tensados de Robert Le Ricolais

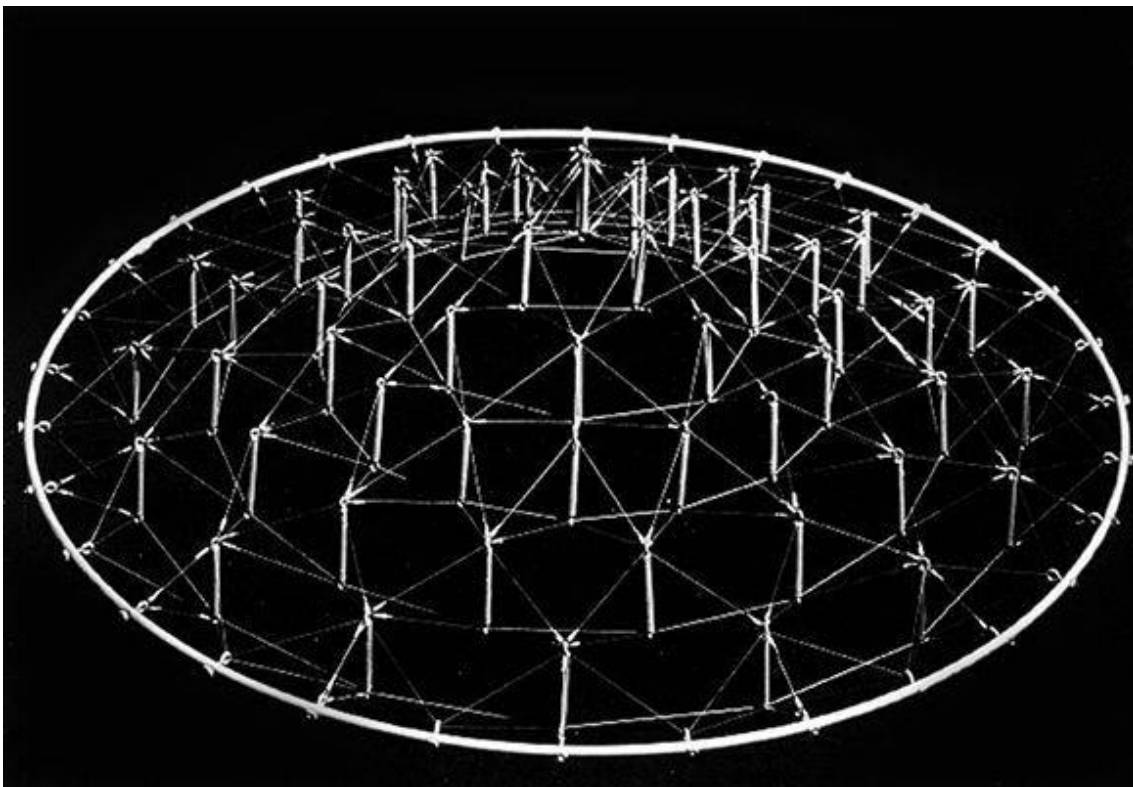


Imagen 12: Modelos de estructuras con cables tensados de Robert le Ricolais

1.5.2.2. Le Ricolais y el uso de la articulación continua: los cables, para hacer estructuras.

Un referente importante para los autores estudiados es la figura de Robert Le Ricolais¹⁰⁸ (1894-1977) por su manera de entender la forma como un concepto fluído, a menudo unido al parámetro del tiempo, que implica movimiento¹⁰⁹.

Entender el trabajo de George Robert Le Ricolais significa entender cómo se trasciende cualquier idea preconcebida sobre la forma de la arquitectura, sobre su geometría y sobre las cualidades espaciales. Sus investigaciones se adentran en la exploración de la naturaleza con el auxilio de la teoría matemática¹¹⁰. Es decir Le Ricolais tiene el rigor disciplinar como ingeniero de Ghyka¹¹¹ y la impaciente curiosidad intelectual por entender los principios que rigen la realidad física de Thompson¹¹². Su trabajo puede considerarse una aproximación matemática a la geometría que tiene como objetivo último limar las consideraciones subjetivas de la forma eliminando lo circunstancial y lo accesorio.

Para él, la intervención en el soporte de lo natural a través de la forma construida requiere entender los secretos mecanismos de la naturaleza, pero esto no es sinónimo de un modelo por imitación. Más bien Le Ricolais desconfía de la verdad de las imágenes y solía repetir a sus alumnos un refrán oriental que dice las cosas mismas mienten, y también sus imágenes.¹¹³

¹⁰⁸ Robert Le Ricolais, (1894 -1977) en París, es un ingeniero francés considerado como uno de los creadores del principio de estructura espacial, de lógica matemática y observación de la naturaleza.

¹⁰⁹ JUAREZ, A. *A propósito de Robert Le Ricolais*. "Arquitectos" (n. 141). Madrid, 1993. Págs 72-76.

¹¹⁰ JUAREZ, A. *El arte de construir con agujeros; Reflexiones en torno a Robert Le Ricolais*. Circo núm. 39, CIRCO M.R.T. Coop., Madrid, 1996. Pág. 2.

¹¹¹ Matyla Ghyka (1881 – 1965), fue un poeta, novelista, ingeniero eléctrico, matemático, historiador, militar, abogado, diplomático, y Ministro Plenipotenciario rumano en el Reino Unido desde fines de los años 1930 hasta 1940. Destacó por un exhaustivo estudio de la sección aurea (o "número de oro") a la cual ha dedicado voluminosos textos.

¹¹² D'Arcy Thompson, (1860-1948) fue un biólogo y matemático escocés, autor del libro *On Growth and Form*, publicado en 1917, un trabajo influyente y calificado como "de sorprendente originalidad". Ha sido llamado "el primer biomatemático".

¹¹³ *Ibid* pág 73.

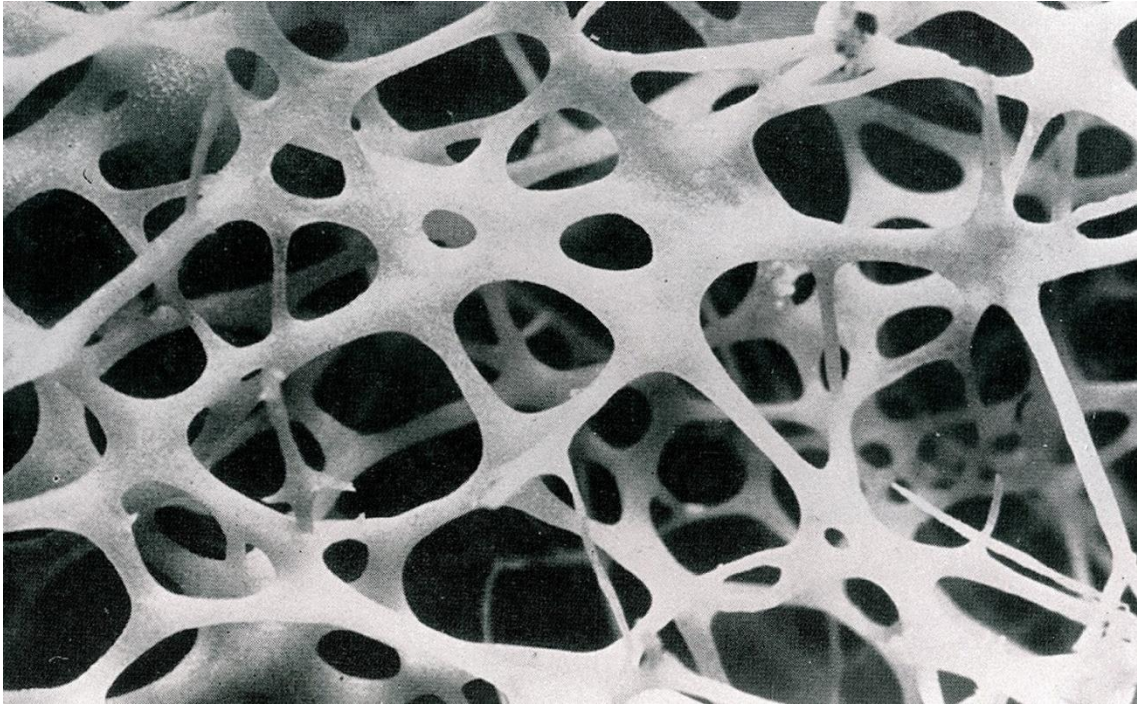


Imagen 13: Fotografía de interior de hueso. (Vista en Mc CLEARY, 1998)

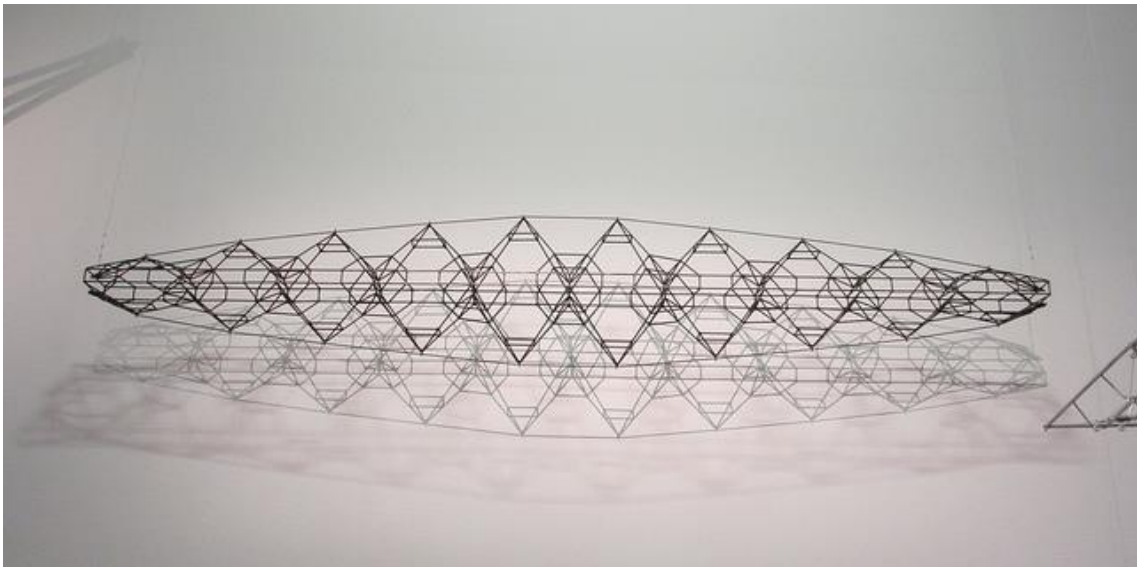


Imagen 14: Puente Trihex parabólico doble para el Skyrail - Robert le Ricolais

La forma para el ingeniero francés no era algo estático y cristalizado, eso es una ilusión para nuestros sentidos, era, según definía el propio ingeniero francés, una entidad polarizada hacia una configuración precisa, tendiendo solamente hacia una configuración posible. Esta noción de forma escapa de la noción de medida.

Es por ello que los tejidos se convierten para él en un modelo muy relacionado con la idea topológica de disposición (Para él la naturaleza está dispuesta, no compuesta, muy relacionada con la topología), de organización espacial de elementos. La propia organización del tejido como estructura resistente, como conjunto de agujeros separados y rígidamente atados según un proceso de fabricación industrial se toman como un modelo para la arquitectura. Para él la estructura más optimizada es la cuerda, y su edificio ideal, poderse meter dentro de una cuerda.

Su investigación pone en relieve internacional a mediados del siglo XX el trabajo con cuerdas y cables. Años después dos jovencísimos arquitectos como Emilio Pérez Piñero y Frei Otto pondrán en práctica este tipo de funcionamiento optimizado en sus estructuras trianguladas conformadas por barras metálicas.

El trabajo de Robert Le Ricolais supone una visión novedosa sobre la concepción de las estructuras, un entendimiento de la geometría estructural en función de su comportamiento y crecimiento. Los autores estudiados en la presente tesis tienen al ingeniero francés como referente de esa correspondencia entre el funcionamiento y su forma.

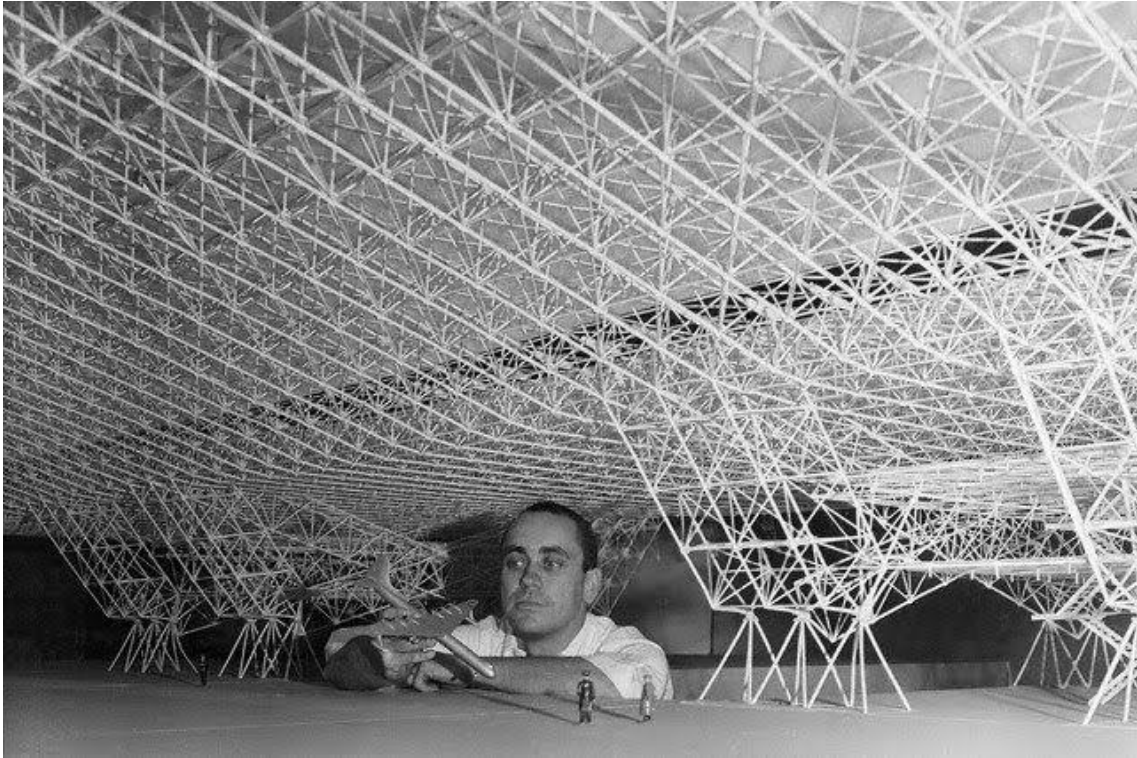


Imagen 15: Modelo de barras de Konrad Wachsmann

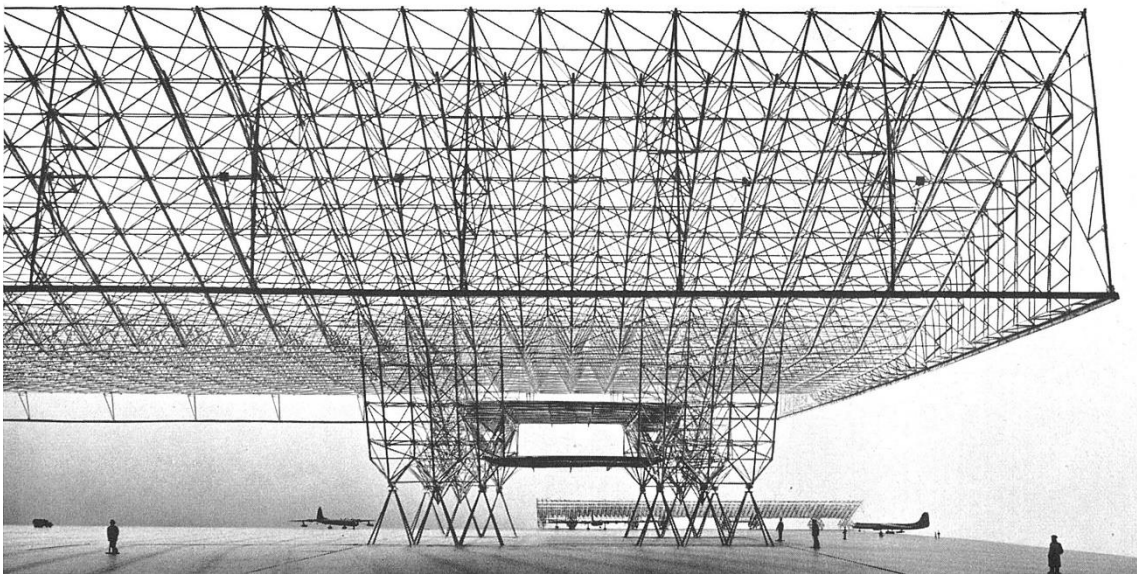


Imagen 16: Hangar de aviones de la USAF, 1951.

1.5.2.3. Proyectar desde el “diferencial” para llegar al conjunto. Estructuras de Graham Bell y Konrad Wachsmann.

Los autores estudiados proyectan desde “el diferencial” para llegar al conjunto completo de la estructura, es decir, piensan en el conjunto como la suma de infinitas uniones con características parecidas, de ahí la importancia que le dan al diferencial respecto al conjunto, el átomo del que va a estar formado cada parte con capacidad de movimiento y resistencia autónoma, que formarán el todo de la estructura.

Los claros referentes en el trabajo de la estructura desde el diferencial con el uso de barras son Graham Bell¹¹⁴ (1847-1922) y Konrad Wachsmann¹¹⁵ (1901-1980). Sus trabajos consistieron en apilar formas geométricas poliédricas, sobre todo el tetraedro, desde sus aristas, conectadas únicamente en los extremos de las barras, dando nacimiento a las estructuras estéreas tridimensionales, de una ligereza insólita hasta entonces.

Graham Bell es conocido sobre todo por la invención del teléfono, aunque realmente sólo se adelantó al verdadero inventor, Antonio Meucci¹¹⁶, en la consecución de la patente. Ese acontecimiento ha eclipsado el hecho que queremos destacar en esta tesis; Bell, en su estudio de Nueva Escocia, se basó en el trabajo de Lawrence Hargrave¹¹⁷, pionero del desarrollo aeronáutico, partiendo del hecho de que, si se eleva al cuadrado el área de cualquier material, el peso se eleva al cubo, lo que limitaba mucho su uso en aviación por no poder utilizar grandes tamaños en sus construcciones.

¹¹⁴ Alexander Graham Bell (Edimburgo, Escocia, 1847-Beinn Bhreagh, Isla del Cabo Bretón, Canadá, 1922) fue un científico, inventor y logopeda británico, naturalizado estadounidense. Contribuyó al desarrollo de las telecomunicaciones y a la tecnología de la aviación.

¹¹⁵ Konrad Wachsmann (Frankfurt, Alemania, 1901 - Los Ángeles, California, 1980) fue un arquitecto alemán conocido por su aportación en el ámbito de las estructuras estéreas espaciales.

¹¹⁶ Antonio Santi Giuseppe Meucci (Florencia, 1808-Nueva York, 1889) fue un inventor italiano, creador del teletrófono, posteriormente bautizado como «teléfono», entre otras innovaciones técnicas.

¹¹⁷ Lawrence Hargrave (1850 - 1915) fue un ingeniero, explorador, astrónomo, inventor y pionero aeronáutico australiano.

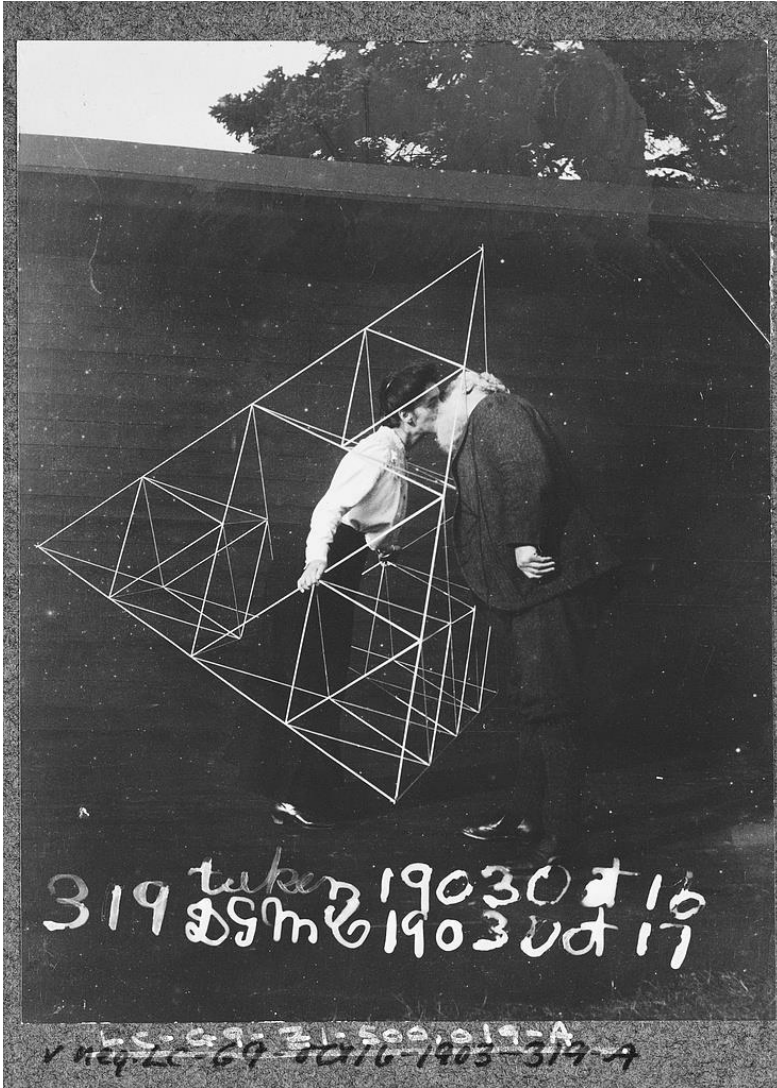


Imagen 17: Graham Bell y su mujer dentro de una estructura compuesta por tetraedros para una cometa.

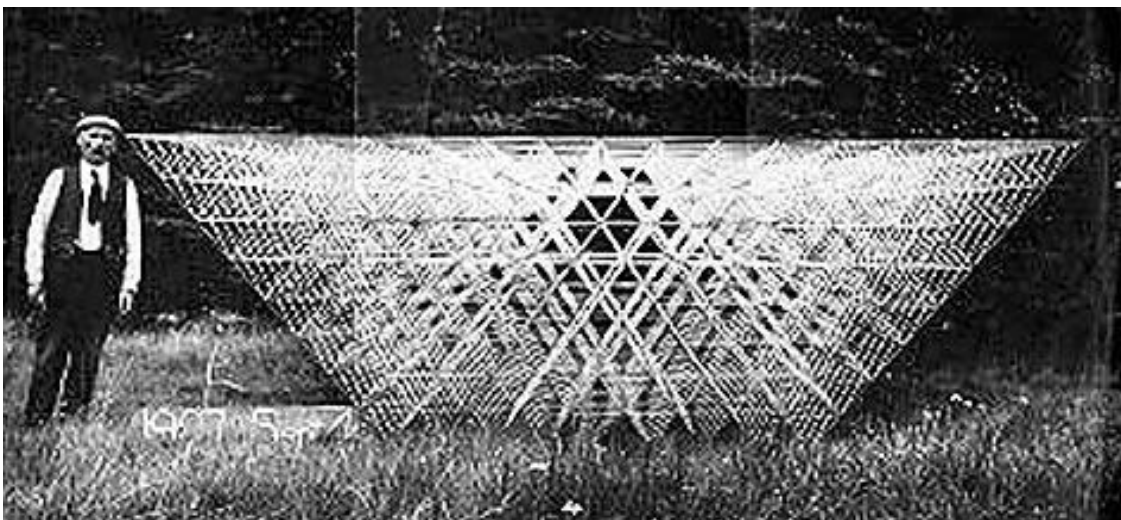


Imagen 18: Cometa compuesta por tetraedros de Graham Bell

Desde esta premisa, Bell descubrió que la solución a ese problema podría ser el uso repetido del tetraedro. Con este poliedro básico podría multiplicar las “células” (diferenciales) creando complejas y extrañas estructuras compuestas de varios conjuntos de ellos. Estos conjuntos de células le permitían ampliar el área sin aumentar la proporción peso-superficie y así acercarse a la estructura de un planeador ligero pero voluminoso, capaz de ofrecer resistencia al viento sin pesar excesivamente.

Otra manera de abordar un sistema parecido es el de Konrad Wachsmann. Con un aprendizaje como carpintero, con sus estudios en la Escuela Superior de Arte de Dresde, y trabajando junto a Hans Poelzig¹¹⁸ (1869-1936) en Berlín y Postdam, y con Gropius¹¹⁹ en USA, se dedicó a la vanguardia del momento: la modulación de elementos prefabricados con casos notorios como el de la casa de su amigo alemán Albert Einstein¹²⁰. En este estudio, junto con las fotografías diseña un hangar para aviones con un sistema de repetición de estructura metálica de tetraedros con el que proyecta la primera estructura cubierta con este sistema de “unión de diferenciales”.

¹¹⁸ Hans Poelzig (1869-1936) fue un arquitecto, pintor y escenógrafo alemán, adscrito al expresionismo. Fue miembro de la asociación arquitectónica Deutscher Werkbund. En 1903 se convirtió en maestro y director de la Academia de Arte de Wrocław (Kunst-und Gewerbeschule Breslau). En 1916 fue nombrado arquitecto de la ciudad de Dresde. En los años 1920 militó en la Nueva Objetividad. De 1920 a 1935 fue profesor en la Universidad Técnica de Berlín (Technische Hochschule Berlin), y director del Departamento de Arquitectura de la Academia de las Artes de Prusia en Berlín.

¹¹⁹ Walter Adolph Georg Gropius (1883 - 1969) fue un arquitecto, urbanista y diseñador alemán, fundador de la Escuela de la Bauhaus.

¹²⁰ Albert Einstein (1879-1955) fue un físico alemán de origen judío, nacionalizado después suizo, austriaco y estadounidense. Se lo considera el científico más importante, conocido y popular del siglo XX.

PABELLÓN DE LOS ESTADOS UNIDOS EN LA EXPO'67

La Geometría del modelo como proyecto de proyectos

Richard Buckminster Fuller, Shoji Sadao y John McHale

2. PABELLÓN DE LOS ESTADOS UNIDOS EN LA EXPO'67.

2.1. Las exposiciones universales y la exposición universal de Montreal de 1967.

2.1.1. Las exposiciones universales.

2.1.2. La Exposición Universal de 1967.

2.2. Richard Buckminster Fuller (Milton, 1895-Los Ángeles, 1983).

2.3. El Pabellón estadounidense de la Expo'67.

2.4. Descripción de la cúpula: Arquitectura para albergar arquitectura.

2.4.1. La estructura y la cubierta.

2.5. Trabajo con modelos físicos estructurales. Reflexión en torno al origen de las cúpulas geodésicas de Fuller: un solo modelo basado en la geometría.

2.6. Epílogo. Aportación de la reconstrucción tridimensional del Pabellón: la geometría como único patrón de "comportamiento".

2.6.1. Discretizar la esfera.

2.6.2. Rigidización de la esfera discreta.

2.6.3. Reconstrucción tridimensional del pabellón de los Estados Unidos de América de la Expo'67 para su mayor comprensión.

2.1. Las exposiciones universales y la exposición universal de Montreal de 1967

¿Qué pueden tener las pompas de jabón para que dos de los arquitectos más reconocidos del mundo recurran a ellas para diseñar los pabellones que han de representar el avance tecnológico de sus países? ¿Qué evento puede albergar locuras de semejante calibre? En la Exposición Universal de 1967 en Montreal coincidieron dos grandes arquitectos Richard Buckminster Fuller y Frei Otto, que diseñaron pabellones muy distintos, pero con un denominador común; la observación de los fenómenos físicos y formales de la naturaleza. Buscando lo inaudito recurrieron a lo que ya nos rodeaba desde hace mucho tiempo.

Para hacernos cargo de la magnitud de este acontecimiento hace falta saber el porqué de estas exposiciones y el alcance que de ellas se espera al suponer tan grandes gastos.

2.1.1. Las exposiciones universales

Las exposiciones universales han sido, desde su inicio en Londres en mayo de 1851, la presentación en sociedad de muchas de las vanguardias de la tecnología y arte contemporáneo de los países representados. La arquitectura que ha cobijado estos eventos, como no podía ser de otra manera, también ha intentado estar a la altura con una peculiaridad que no se había dado hasta entonces: los edificios creados, de gran entidad espacial, debían tener un carácter temporal, debían poder montarse y desmontarse con relativa facilidad y rapidez.¹

En ese primer gran hito en Londres, en el que la construcción del Crystal Palace, un gran espacio de bóvedas de acero y cristal diseñado por Joseph Paxton² y Charles Fox³, fue completamente diseñado para ser desarmable ya que la exposición, que duró cinco meses y medio, no podría permanecer en Hyde Park. Una vez terminado ese tiempo tuvo que ser reubicado en Penge Urban District de Kent.

¹ V.V.A.A. *Las exposiciones universales* Cátedra de Urbanística I. Curso 1984-1985. ETSA de Madrid. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Colección Cátedras nº8. Madrid, 1985.

² Joseph Paxton (1803-1865) fue un ilustrador, naturalista, y paisajista inglés, reconocido por ser el autor del Crystal Palace, construido para la primera Gran Exposición celebrada en Londres en 1851. Fue autodidacta.

³ Sir Charles Fox (1810-1874) fue un ingeniero civil inglés y constructor. Su trabajo se centró en los ferrocarriles, estaciones de ferrocarril y puentes. Su aportación en el Crystal Palace fue fundamental debido a sus conocimientos del uso del acero.



Imagen 19. Torre Eiffel. Exposición Universal de París de 1889.



Imagen 20. Atomium. Exposición Universal de Bruselas de 1958

Desde entonces, en 1853 en Nueva York, en 1855 en París, en 1862 en Londres, en 1867 y 1872 en París, en 1873 Viena, 1876 en Filadelfia... se empiezan a celebrar exposiciones universales anuales casi sin interrupción. Y aunque el carácter general de las exposiciones debía ser temporal, de estos eventos se conservan hitos y edificios tan reconocibles como la torre Eiffel, el Atomium, etc, porque la mayoría perecen una vez terminado. (Imágenes 19 y 20)

2.1.2. La Exposición Universal de 1967

En este capítulo se hace hincapié en el carácter experimental y temporal que han tenido algunos de los edificios diseñados para estas exposiciones a través de dos ejemplos que han hecho historia por la manera de abordar un proyecto de arquitectura a través del trabajo con modelos físicos, valiéndose de la observación de procesos naturales, fenómenos físicos, haciendo que el pabellón “funcione” de una manera análoga.

Nos situamos en la Exposición Universal de 1967, que se realizó en la ciudad de Montreal (Canadá) culminando la celebración del Centenario de la Confederación Canadiense⁴.

La Expo de 1967 originalmente iba a tener lugar en Moscú, para conmemorar los 50 años de la Unión Soviética; pero en 1962 cambiaron de idea por incapacidad para financiarlo y surgió de inmediato la candidatura de la ciudad de Montreal, que fue aceptada el 13 de noviembre de 1962.⁵

La decisión de la ciudad de la Expo no era un tema menor, para los países que intervenían suponía un escaparate internacional de altísimo nivel donde poder hacer valer la potencia cultural y tecnológica que cada país tiene. Son elocuentes las famosas imágenes que a veces se daban al tener dos pabellones enfrentados de países confrontados o que luchaban por la primacía del poder. Me ha parecido oportuno traer a esta parte del capítulo la conocida foto de la Expo de 1937 en París donde, a cada lado de los campos elípticos se erigieron los pabellones de Alemania y de Rusia, las dos potencias enfrentadas en aquel momento (Imagen 24). En esta exposición, el escenario había cambiado, en este caso las potencias enfrentadas eran Rusia y Estados Unidos en plena guerra fría y carrera hacia el espacio (Ver imágenes 23 y 24).

⁴ Hemeroteca: ABC de Madrid del 21 de abril de 1967.

⁵ STANTON, J. “*The Building Expo*” 1997 <http://www.westland.net/expo67/map-docs/buildingexpo.htm> Consulta el 16 de Agosto de 2018.

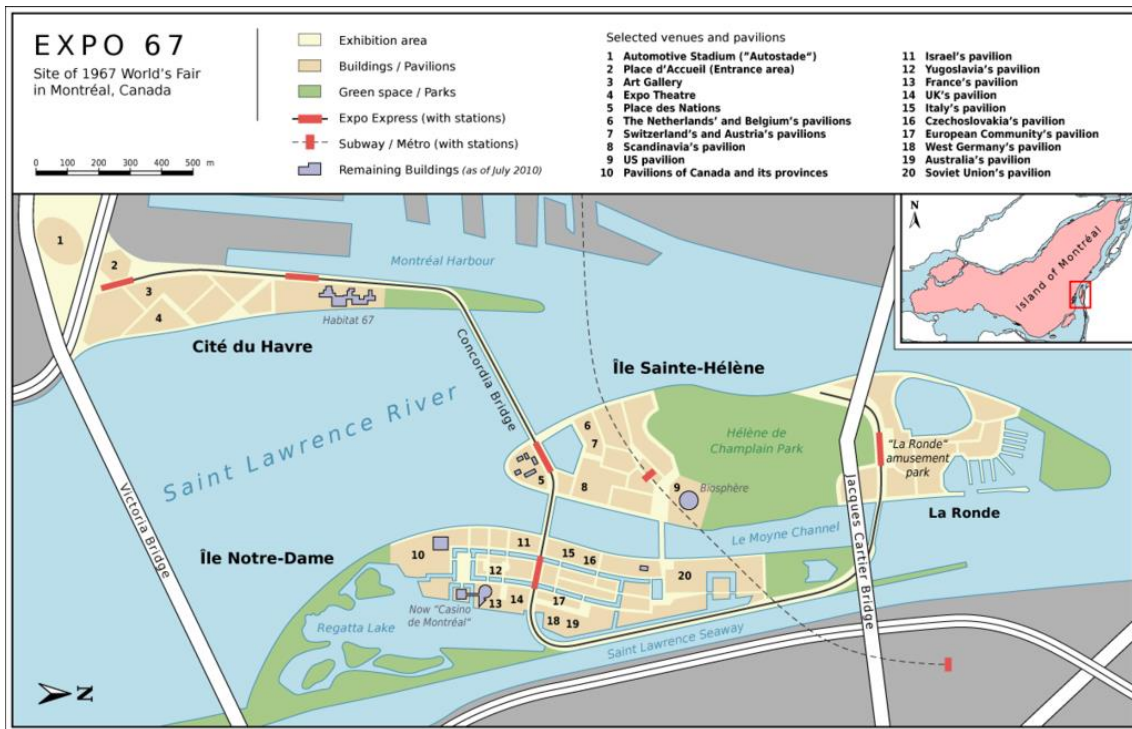


Imagen 21. Plano de situación de cada uno de los Pabellones

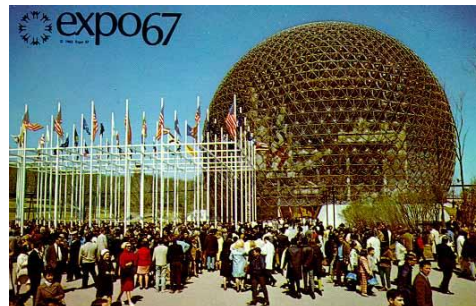
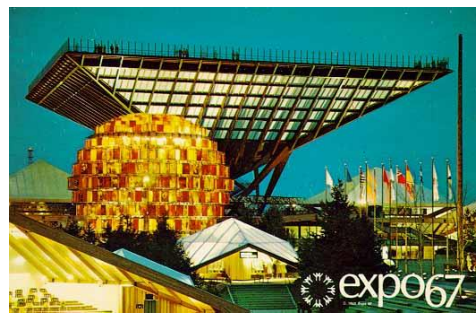


Imagen 22. Vista aérea de los solares de la exposición y sellos hechos para conmemorar el evento

Hubo dos propuestas del gobierno canadiense para el recinto de la Exposición. La primera consistía en utilizar el espacio abierto existente en el parque Mount Royal con vistas a la ciudad⁶. La segunda propuesta, del alcalde Jean Drapeau⁷, era utilizar varias localizaciones separadas; Pointe Saint Charles, Ville La Salle y Maisonneuve Parque noreste de Montreal.

Sin embargo, el plan más original fue presentado por los arquitectos canadienses de Saint-Bruno Bedard, Charbonneau y Langlois, que colaboraron con el ayuntamiento de Montreal en la planificación del entorno de la exposición. Propusieron incorporar el tema del agua mediante la construcción de la Exposición a lo largo de la costa del río San Lorenzo de Montreal, la ampliación de una isla existente, la Ile Sainte-Helene, y la construcción de otra isla más, la Ile Notre-Dame. Era una propuesta audaz, daría a la Expo 67 un gran realce y adecuación al tema elegido por la organización de la exposición. El plan previsto se presentó públicamente el 26 de enero de 1963.

Antes de que comenzara la construcción, Ile Sainte-Hélène era sólo la mitad de su tamaño final y la Ile Notre-Dame eran únicamente marismas. Ambas islas del río San Lorenzo se ampliaron con 6.825.000 toneladas de roca y tierra de relleno de dragado del río y transportados desde el sitio de construcción del túnel del metro de Montreal⁸.

La exposición –del 28 de abril al 27 de octubre- ocupó un solar de cuatrocientas hectáreas sobre dos islas artificiales en el centro del río San Lorenzo; la parte principal del recinto se localizó en la Ile Sainte-Hélène y en la Ile Notre-Dame (Imágenes 21 y 22). Más de sesenta naciones estuvieron representadas, casi treinta más de las que concurren en 1958 a la anterior Expo en Bruselas⁹.

La elección de un tema fue también una preocupación importante. Los planificadores de la feria comenzaron solamente con el objetivo de que el tema elegido debía ser esencialmente mostrar el reflejo de una época y no dar una imagen comercial. El tema surgió en el año 1962 en una reunión

⁶ SLOAN, J., KENNEALLY, R. *Expo 67: not just a souvenir*. Ed. University of Toronto Press, Scholarly Publishing Division. Toronto, 2010.

⁷ Jean Drapeau (1916-1999) abogado y político canadiense que ejerció como alcalde de Montreal de 1954 a 1957 y de 1960 a 1986.

⁸ VALOIS, N., CHA, J. *L'architecture de paysage de l'expo 67*. Journal of the Society for the Study of Architecture in Canada. Toronto, 2013.

⁹ MILLER, M. *Expo'67 and the weight of utopia*. Revista "On site10: Architecture + weight. Montreal, 2003. págs 30-33.

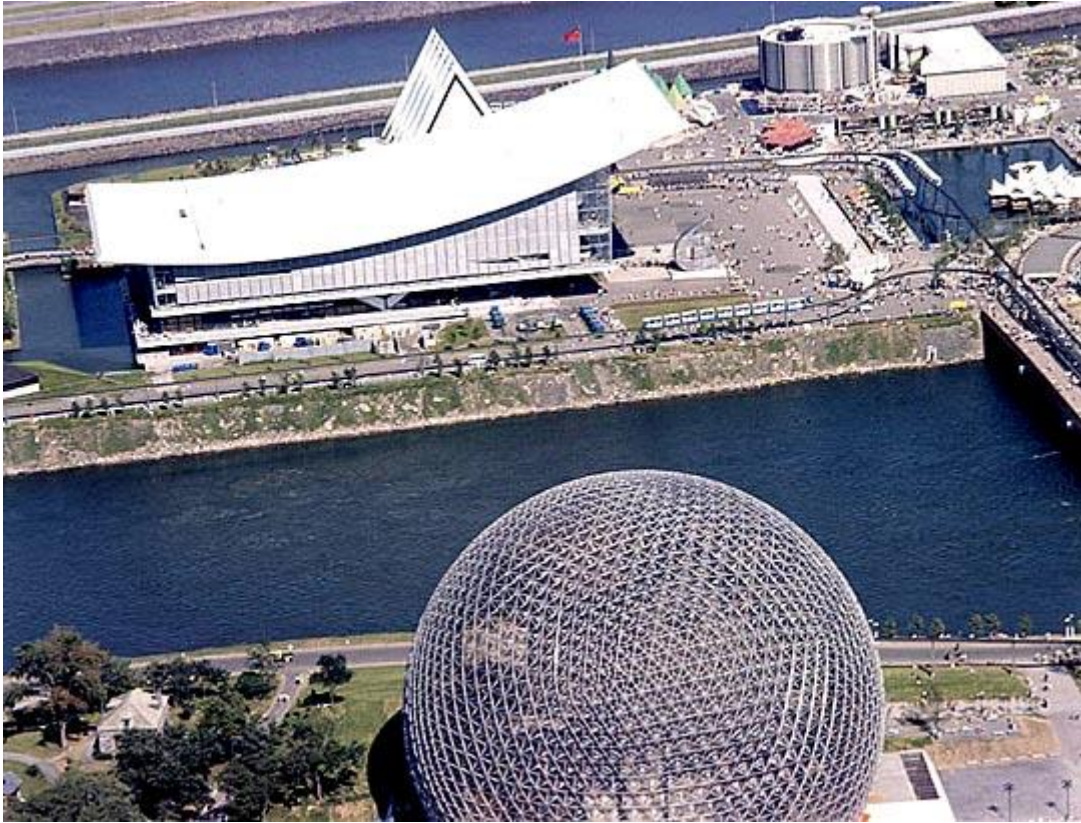


Imagen 23. Pabellones ruso y estadounidense



Imagen 24. Pabellones de Rusia y Alemania en la Exposición Universal de París de 1937

de alto nivel del gobierno en Montreal, donde Pierre Sevingy, ministro de Defensa adjunto por aquel entonces, sugirió "Terres des Hommes" ("Tierra de hombres"), el título de un libro de Antoine de Saint-Exupery escrito en 1939.

Los siguientes años, científicos, educadores, intelectuales y artistas de todo Canadá se reunieron en una conferencia en Montebello, Quebec, para perfeccionar y ampliar el tema¹⁰. Se establecieron una serie de ideas de temas que podrían convertirse en educativos y artísticos si se ejecutaban correctamente: "el hombre explorador", "el hombre creador", "el hombre productor" y "el hombre en la Comunidad". La idea era poder convertir cada uno de estos "sub-temas" en un pabellón temático o un complejo de pabellones. El "hombre como creador", por ejemplo, se convirtió en una galería de arte, que mostraba fotos de todo el mundo, una exposición de diseño, un jardín de esculturas y un festival mundial de las artes escénicas¹¹.

El calendario se dispuso de manera que, una vez excavados los canales, instalados los servicios subterráneos y las bases de las carreteras, se pudiera iniciar la construcción por encima del suelo en 1965. Se logró cumplir con los objetivos de tiempo, incluso cuando los participantes cambiaron sus proyectos. Los cimientos de los edificios fueron construidos durante el verano de 1965 y los edificios se completaron en el verano siguiente. Eso le dio a los participantes tiempo suficiente para instalar sus exposiciones durante el invierno de 1966 a 1967, a tiempo para la apertura de la Expo el 28 de abril de 1967¹².

La exposición albergó pabellones muy diferentes y desde España se escuchaban los ecos de la prensa de la siguiente manera:

“... El pabellón británico fue diseñado por Sir Basil Spence, quien describió su edificio de sólida apariencia hecho de amianto rociado con hormigón, como “escabroso, recio e inflexible”.

El pabellón japonés, construido con pretensadas vigas de hormigón, ofrece una moderna interpretación de la tradicional arquitectura japonesa, con empleo de las líneas rectas.

¹⁰ Ibid. Pág 33.

¹¹ JASMIN, Y. *La petite histoire d'Expo 67*, Éditions Québec/Amérique, Quebec, 1997. Pág. 53.

¹² BAKER, J. *Ambitious Expo*. En la Revista "Canadian Architect". Toronto, 2007.



Imagen 25. Pabellón del hombre creador

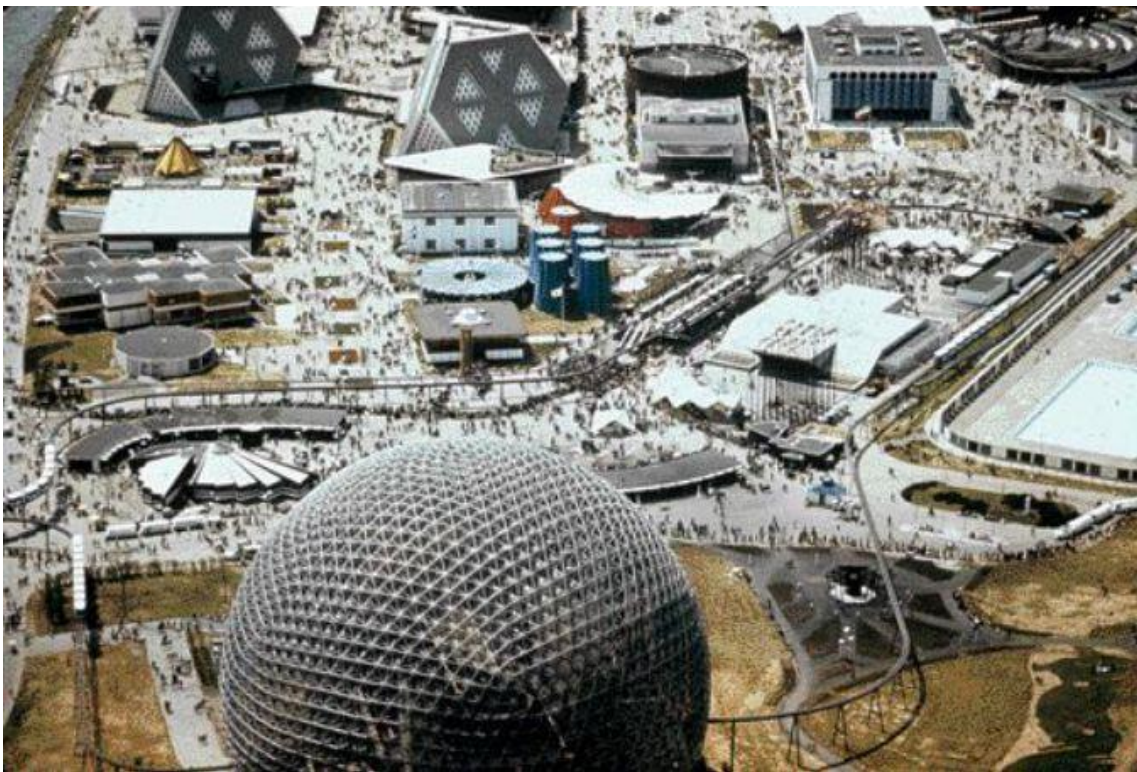


Imagen 26. Vista aerea parcial de la Expo.

Uno de los mayores edificios del recinto, con una dimensión de seis campos de fútbol, es el pabellón de la Unión Soviética (Imagen 23). De su techo rectangular, que se eleva a cuarenta y cinco metros, penden cuatro acristaladas paredes que enfundan todo el edificio. La estructura provocativa del pabellón de Yugoslavia, consistente en siete formas triangulares construidas de acero y revestidas de aluminio, con paneles de cristal en el techo y a los lados. Una cascada se precipita desde treinta y cinco metros por el declive del triángulo de uno de los tejados.

Luego estaban los edificios temáticos: "El hombre Creador" (Imagen 25), "El Hombre Explorador" y "El Hombre y la Comunidad", erigidos por los organizadores, y en los que se han empleado las más modernas técnicas constructivas. Moishe Safdie, arquitecto de Montreal, ha excitado la imaginación de los arquitectos, ingenieros y proyectistas de la ciudad con su "Habitat 67", una instalación experimental de 158 viviendas dispuestas en terrazas escalonadas, empleando 354 unidades modulares prefabricadas. Sencillamente, la exposición va a señalar un gran avance en la historia de la arquitectura. El recorrido más plácido sobre el recinto de la Exposición se realizará en aparatos británicos...¹³

El montaje de esta exposición fue muy caro, pero la recompensa mereció la pena. La Organización Canadiense de la "Expo 67" invirtió cerca de ciento diez millones de libras¹⁴ en edificaciones y obras (unos dieciocho mil millones de pesetas de pesetas), a la espera de que los participantes gastasen unos ciento diecinueve millones de libras¹⁵ en el disfrute de la Expo. La ciudad de Montreal cubrió un programa de obras públicas que ascendió a veinticinco millones de

¹³ HEMEROTECA. ABC de Madrid del 21 de abril de 1967.

¹⁴ 110.000.000 de libras del año 1967 equivalen a 1.770.858.210€ de la actualidad. Dato contrastado en la web: <https://www.dineroeneltiempo.com/libra-esterlina/de-1967-a-valor-presente> el 13 de marzo de 2018.

¹⁵ 119.000.000 de libras del año 1967 equivalen a 1.928.223.596€ en la actualidad. Dato contrastado en la web: <https://www.dineroeneltiempo.com/libra-esterlina/de-1967-a-valor-presente> el 13 de marzo de 2018.



Imagen 27. Vista aérea de la Exposición Universal de 1967 en Montreal

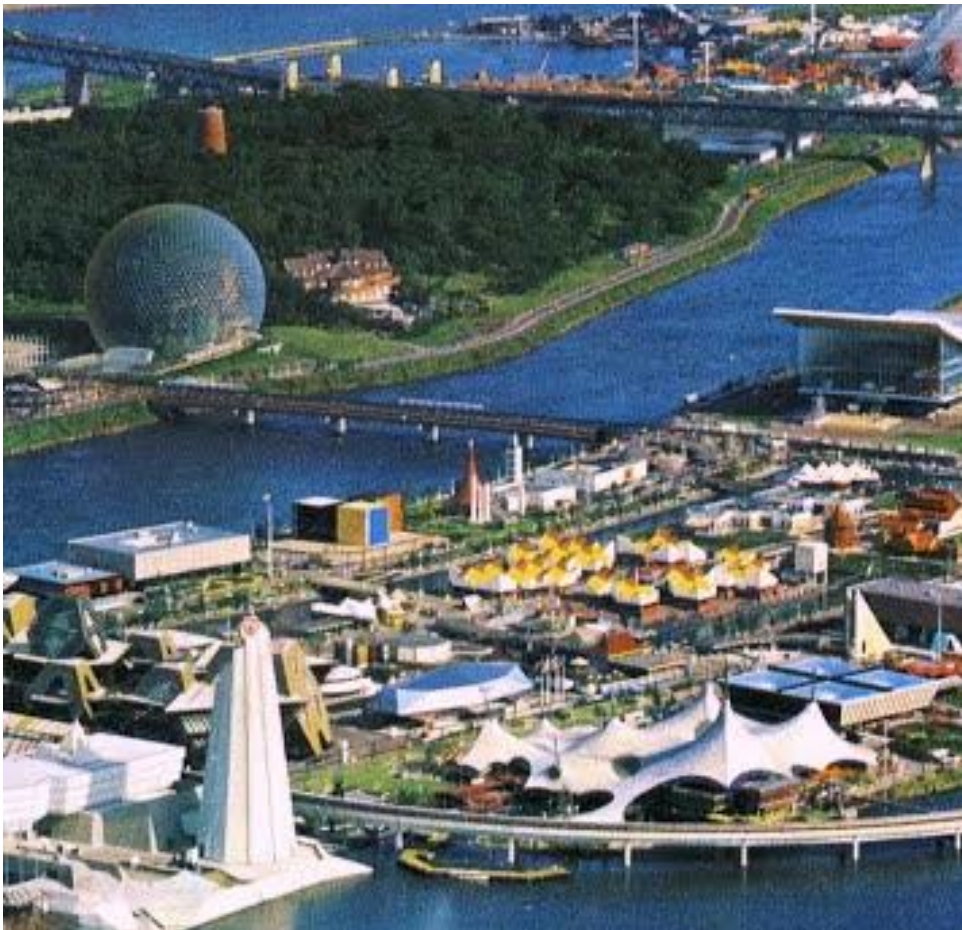


Imagen 28. Los dos Pabellones estudiados

libras, incluyendo la ampliación del nuevo Metropolitano suburbano. Quebec, por su parte, llevó a cabo un programa de carreteras que ascendió a ciento sesenta y siete millones de libras, para facilitar buenos accesos a Montreal. El delegado general de la "Expo", Robert Shaw, dijo: "Esta exposición es una gran aventura para Canadá, y un tremendo impulso para la economía canadiense".

Y así fue, la asistencia de más de 50 millones de personas rebasó en mucho todas las expectativas de los organizadores asegurando así un éxito total de la exposición.



Imagen 29. Richard Buckminster Fuller 1895-1983

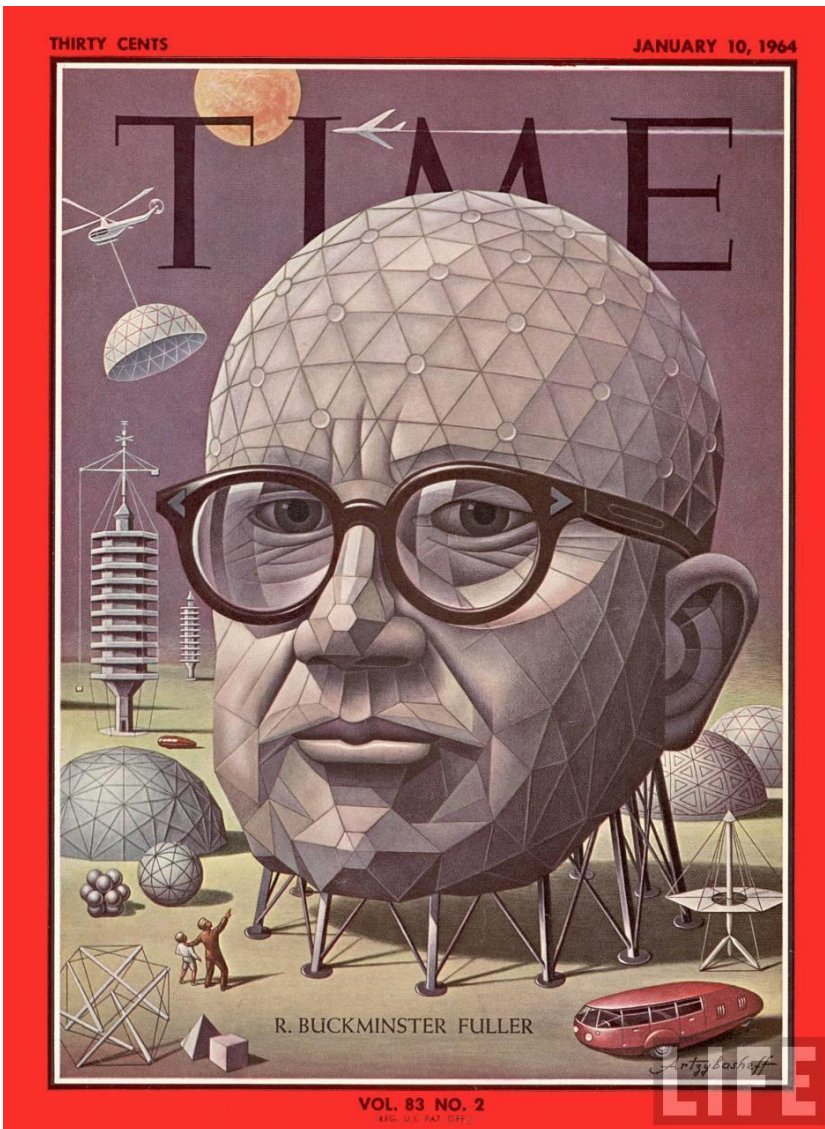


Imagen 30. Portada de la Revista TIME de enero de 1964.

2.2. Richard Buckminster Fuller (Milton, 1895-Los Ángeles, 1983)

El arquitecto que estudiaremos en este apartado tiene una trayectoria muy atípica. Su escasa formación profesional, limitada esencialmente a los estudios cursados en la Universidad de Harvard entre 1913 y 1915, no le permitió definirse como arquitecto en el sentido estricto de la palabra. Sin embargo, su obra está ligada de una forma especialmente influyente a las corrientes artísticas del siglo XX, con una marcada estética mecanicista.

Durante su estancia como soldado en la marina norteamericana, fue condecorado por la invención de un poste con un apéndice para el salvamento de hidroaviones; una vez concluida la Primera Guerra Mundial, trabajó en diversas firmas industriales. En 1922 fundó con su suegro, J. M. Hewlet, la empresa constructora Stockade Building System, que tuvo lamentablemente una corta existencia.

Su primer gran proyecto, realizado en 1927, consistió en una vivienda unifamiliar, de planta hexagonal y habitaciones triangulares, que pendía de un mástil central por el que llegaban todas las conducciones. Esta máquina para vivir, con influencia de Le Corbusier pero de forma totalmente novedosa, era completamente transportable y desmontable, con un peso y tamaño mínimos. Conocida más tarde como 4-D House o Dymaxion House, dejó entrever los propósitos de la arquitectura de Fuller: la máxima funcionalidad con el mínimo gasto energético y material; una arquitectura siempre subordinada a las últimas novedades técnicas y científicas.

Estos propósitos, presentes durante el transcurso de toda su carrera, le llevaron a fundar en 1932 la Dymaxion Corporation en Bridgeport, Connecticut, empresa de la que fue director e ingeniero jefe hasta 1935. Durante este período patentó, entre otros proyectos, el Dymaxion Car, un vehículo de tres ruedas que resultó ser extremadamente inestable e inseguro. Desde 1939 y durante el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial trabajó en el diseño de viviendas prefabricadas, de las que surgió la casa Dymaxion, una vivienda redonda con escotillas y tejados de cúpula planos.

Posteriormente, Fuller se dedicó a la investigación de grandes superficies portantes como solución económica para abrir grandes espacios. Surgieron de esta forma sus cúpulas geodésicas desde 1949 como veremos a continuación, basadas en la multiplicidad regular de diversas superficies, idea a cuya mejora y perfeccionamiento dedicó el resto de su carrera constructiva en colaboración con varios grupos de estudiantes.

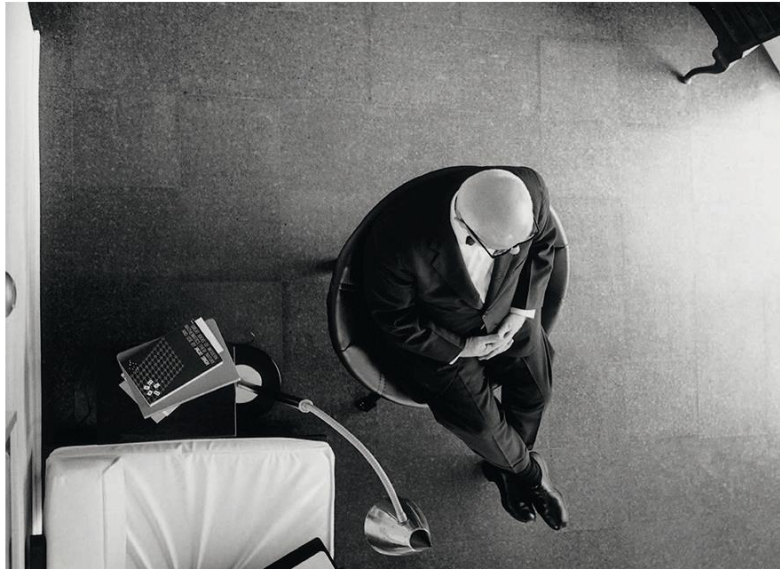


Imagen 31. Fuller fotografiado en su estudio durante una entrevista en 1979



Imagen 32. Junto a dos de sus inventos Dymaxion: una cúpula conformada por moldes plásticos y el coche.

Además de numerosos proyectos experimentales, destacaron sus realizaciones en las que se materializaron algunos de sus proyectos de estructuras: en 1953 construyó un edificio redondo de fibra de vidrio y poliéster para la casa automovilística Ford. En 1954 realizó una cúpula de madera recubierta por una hoja transparente de plástico para un restaurante en Woods Hole. En 1958 logró cubrir 117 metros con una cúpula formada por planchas de acero hexagonales para la Union Tank Car Company, en Baton Rouge, Louisiana, y en 1959 se mostró una cúpula geodésica suya en la exposición norteamericana de Moscú.

Su obra más famosa es la que estudiaremos a continuación y con la que espoleó la carrera de los demás autores que son estudiados en la tesis. Se trata de la esfera del pabellón de los Estados Unidos de América en la Exposición Universal de Montreal de 1967. Con ella pretendía demostrar la posibilidad de cubrir barrios enteros con cúpulas.

2.3. El Pabellón estadounidense de la Expo'67

La elección, en 1960, del visionario social y gurú del diseño R. Buckminster Fuller y su cúpula geodésica ("burbuja de Bucky") para la estructura Pabellón de Estados Unidos de la Expo'67¹⁶, con la colaboración de Shoji Sadao¹⁷ y John McHale¹⁸, resultó ser verdaderamente impactante,

¹⁶ Ver la introducción del capítulo sobre el Pabellón alemán de la Expo'67. En él se hace referencia el origen y los tiempos en los que hubo de hacerse este evento de alcance internacional e incluso político, como es el caso del Pabellón de Estados Unidos.

¹⁷ Shoji Sadao (nacido en 1927) es un arquitecto japonés americano, conocido por su trabajo y colaboraciones con Fuller e Isamu Noguchi. Durante la Segunda Guerra Mundial fue destinado en Alemania y fue un cartógrafo para el Ejército de los Estados Unidos. Fuller fue el instructor de Sadao mientras estudiaba la arquitectura en Cornell, donde se conocieron por primera vez a principios de los años 50. En 1954, Sadao pasó el año usando su experiencia como cartógrafo para dibujar a mano el Dymaxion Airocean World Map, que fue su primera colaboración con Fuller. La primera edición del mapa, la edición de Raleigh, fue impresa por Edwards y Broughton y fue publicada en una edición de 3.000 copias en el verano de 1954. En 1964, Sadao cofundó la firma de arquitectura Fuller & Sadao Inc., cuyo primer proyecto fue diseñar la gran cúpula geodésica para el Pabellón de Estados Unidos en la Expo 67 en Montreal.

¹⁸ John McHale (1922-1978) fue un artista británico, teórico del arte, sociólogo y especialista en estudios futuros. Fue un fundador del Grupo Independiente, que fue un movimiento británico que originó el Pop Art que surgió de una fascinación con la cultura de masas americana y las tecnologías de la post-Segunda Guerra Mundial. Después de pasar un año en la Universidad de Yale en 1955-1956, definitivamente se trasladó a los EE.UU. en 1962 para trabajar



Imagen 33. Vista aérea

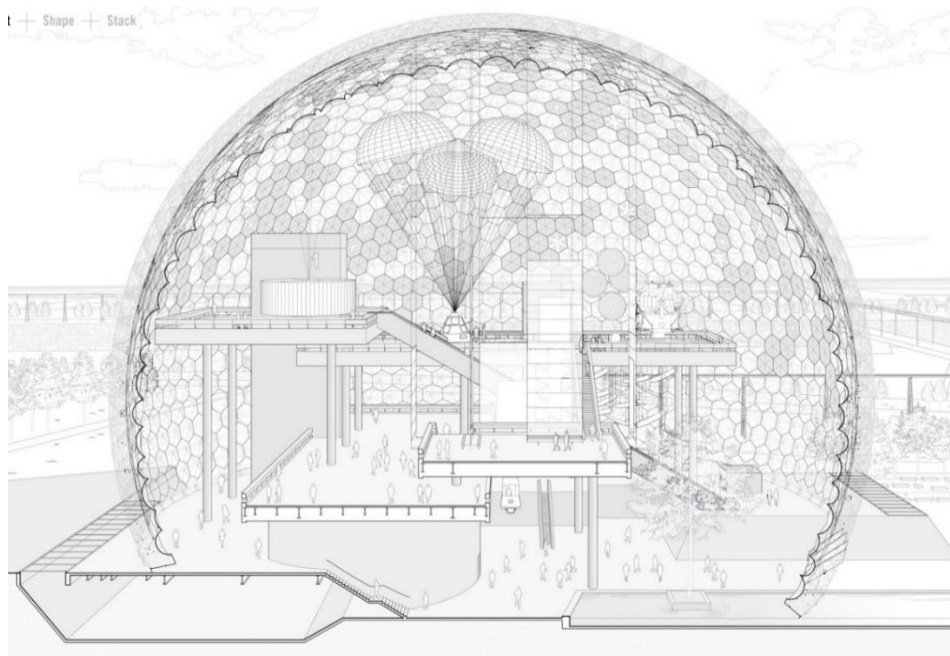


Imagen 34. Sección fugada del pabellón. "Manual of Section" Paul Lewis, Marc Tsurumaki, David J. Lewis. Princeton Architectural Press, New York 2016

también porque participó con el jovencísimo equipo de diseño “Cambridge Seven Associates”¹⁹ (todos menores de treinta años) que crearon el interior del pabellón lleno de plataformas unidas por puentes y escaleras mecánicas que se entrecruzaban entre sí y entre las plataformas²⁰.

Por primera vez, los encargados de planificar la exposición permitieron una moderna estética artística para representar a los Estados Unidos en una feria mundial. Arte moderno, diseño, y arquitectura habían aparecido mucho en las pantallas de televisión en los Estados Unidos, pero nunca hasta entonces como el mecanismo central por el cual un público internacional entendería a la sociedad americana. Este pabellón de Fuller define una presencia de los Estados Unidos en el borde de su propio territorio, en un escaparate mundial que sirvió de imagen política.

Los planificadores encontraron el éxito en la mezcla de las antigüedades, con sus grandes diseños, y una nueva modernidad minimalista. Tanto el exterior del pabellón como el contenido del mismo

con el arquitecto Richard Buckminster Fuller en temas ecológicos y de sostenibilidad ambiental. Él y su esposa, la artista Magda Cordell, fundaron entonces su propia organización de estudios futuros, el Centro de Estudios Integrativos (CIS), para tratar las consecuencias a largo plazo del progreso científico y tecnológico en el futuro de la humanidad.

¹⁹ Cambridge Seven Associates, Inc. (C7A) es una firma de arquitectura americana fundada en 1962 y con sede en Cambridge, Massachusetts. Los siete socios originales, Lou Bakanowsky, Ivan Chermayeff, Peter Chermayeff, Alden Christie, Paul Dietrich, Tom Geismar y Terry Rankine aplicaron sus diversas habilidades en arquitectura, planificación, diseño de exposiciones, gráficos, diseño industrial y cine para crear un diseño único de Estudio fundado en la convicción de que cada encargo, a cualquier escala, sería una oportunidad para aplicar un pensamiento fresco en busca de soluciones creativas. La empresa se fundó con la idea de que los esfuerzos de colaboración de un grupo variado de diseñadores y arquitectos sería mucho más eficaz que los de cualquier individuo. Robert Campbell declaró: "Desde el principio, *los Siete* se dedicaron a combinar la arquitectura con las otras artes del diseño - con exposiciones, con gráficos y señalización, con arte público, con diseño de producto, con películas, incluso planificación urbana. La mayor parte de su trabajo es una colaboración entre muchas disciplinas..." Aunque destacó su producción de grandes acuarios por todo el mundo (algo hay de “acuario” en la filosofía del pabellón) su producción abarcó multitud de disciplinas distintas.

²⁰ Para ver interior del pabellón explicado por los autores, Cambridge Seven Associates, ver video: http://greg.org/archive/2011/05/02/the_us_expo_67_pavilion_has_seven_fathers.html



Imagen 35. Cultura americana (cine, música, pintura, costumbres...) y avances tecnológicos (teniendo como centro el desembarco americano en la luna, fueron las grandes bazas del contenido del Pabellón.

reflejan la influencia de Andy Warhol²¹ y otros artistas que pretendieron reflejar la cultura popular estadounidense.

Dado que los funcionarios de la Expo dijeron que las exposiciones del pabellón no deberían ser ferias comerciales, los diseñadores de *Cambridge Seven Associates* decidieron mostrar la artesanía, inventiva y creatividad del pueblo estadounidense. Hicieron esto exhibiendo réplicas de las naves espaciales *Apolo*²² y *Géminis*²³, la guitarra de Elvis Presley, las muñecas de *Raggedy Ann*²⁴, una pintura del arte pop de Andy Warhol, y varios cientos de otros ejemplos de la cultura americana, pasada y presente.

²¹ Andrew Warhola (1928 - 1987), comúnmente conocido como Andy Warhol, fue un artista plástico y cineasta estadounidense que desempeñó un papel crucial en el nacimiento y desarrollo del pop art. Tras una exitosa carrera como ilustrador profesional, Warhol adquirió fama mundial por su trabajo en pintura, cine de vanguardia y literatura, notoriedad que vino respaldada por una hábil relación con los medios y por su rol como gurú de la modernidad. Warhol actuó como enlace entre artistas e intelectuales, pero también entre aristócratas, homosexuales, celebridades de Hollywood, drogadictos, modelos, bohemios y pintorescos personajes urbanos.

²² La nave Apolo fue diseñada como parte del programa Apolo, por los Estados Unidos a comienzos de la década de 1960 para enviar un hombre a la Luna antes de 1970 y traerlo de regreso salvo y salvo a la Tierra. Esta meta fue dispuesta por el Presidente Kennedy tras el primer vuelo del programa espacial Mercury.

²³ El Programa Gemini fue el segundo programa espacial tripulado de los Estados Unidos, desarrollado a principios de la década de 1960 en el marco de la carrera espacial con la Unión Soviética. El proyecto comenzó en 1965 después de que la agencia espacial estadounidense NASA finalizara su primer programa de vuelos espaciales: el pionero proyecto Mercury, el cual había logrado colocar en órbita terrestre a los primeros astronautas estadounidenses.

²⁴ Raggedy Ann es una muñeca creada por el estadounidense Johnny Gruelle (1880–1938) para una serie de libros que escribió e ilustró para niños. Raggedy Ann es una muñeca de trapo con hilos rojos como cabello y una nariz triangular. Gruelle recibió la patente D47789 por su creación el 2 de septiembre de 1915. El personaje fue concebido ese año, pero fue presentado al público en el libro *Raggedy Ann Stories* de 1918. Cuando una muñeca fue comercializada junto al libro, el concepto se convirtió en un éxito. En la secuela del libro, *Raggedy Andy Stories* (1920), se incorporó el hermano de la muñeca, llamado Raggedy Andy, quien vestía un traje de marinero.



Imagen 36. Un objeto posado fue la imagen potente del Pabellón de los Estados Unidos.



Imagen 37. Un interior con gran libertad espacial: pasarelas muy distintas unas de otras a distintas alturas, gigantescas escaleras mecánicas para acceder a ellas, etc, haciendo del interior un sobrecoger balcón hacia el futuro.

Todo el mundo quedó admirado, excepto, los visitantes estadounidenses. La cultura americana quedó reducida, para algunos de ellos, a películas y arte pop. Estaba claro, por las quejas y las disculpas entorno al pabellón, que los estadounidenses no se veían como otros los veían.²⁵

A España sólo llegaban buenas noticias del espectacular pabellón como lo recoge el diario ABC de días posteriores a la inauguración:

Uno de los pabellones más futuristas fue el de Estados Unidos, una cúpula geodésica, o "burbuja rompecielos" que asciende a una altura de veinte pisos. El marco de la estructura se trataba de una filigrana de metal que soporta unos paneles de piel transparente de plástico y cristal.²⁶

Al entrar en el pabellón, el visitante veía de frente un águila gigante, con las alas extendidas, y muchos discos de plástico dorado que se hicieron brillar como flotando en el interior. Una escalera mecánica los llevaba hacia arriba desde la entrada, pasando por las vías de Minirail que atravesaban el pabellón, hasta una sección llamada "El Espíritu Americano". Los artículos en exhibición incluyeron adornos indios, garras del oso y collares de plata. También había señuelos de aves indias y obras de arte sobre lienzo, corteza y madera. Había sombreros americanos que representaban regiones y ocupaciones, pistolas de vaqueros, espuelas y hierros de marca, un jugador de béisbol de madera originalmente esculpido como figura de escaparate y un pequeño tótem de Alaska.

El arte popular estaba presente en una colección de guitarras y otros instrumentos musicales que pertenecían a cantantes populares como *Elvis Presley* y *Peter, Paul and Mary*. Había incluso una colección de recuerdos de las elecciones - las banderas, los botones, los carteles, etc, que fueron utilizados en pasadas elecciones presidenciales. (En la planta y la sección de las imágenes 38 y 39, los espacios marcados con la letra "a")

En el nivel superior a continuación del pabellón (En la planta y la sección de las imágenes 38 y 39, los espacios marcados con la letra "h", exposición "Destination Moon"), al que se accedía por una escalera extraordinariamente larga (38m, ver en imágenes 37, 38 y 39) hasta la plataforma más

²⁵ AMEZQUETA, A. *Los pabellones de Estados Unidos y Alemania Occidental en la Expo'67* Revista Arquitectura nº109, Madrid, 1968, Págs. 16-18.

²⁶ HEMEROTECA. ABC de Madrid del 21 de abril de 1967.

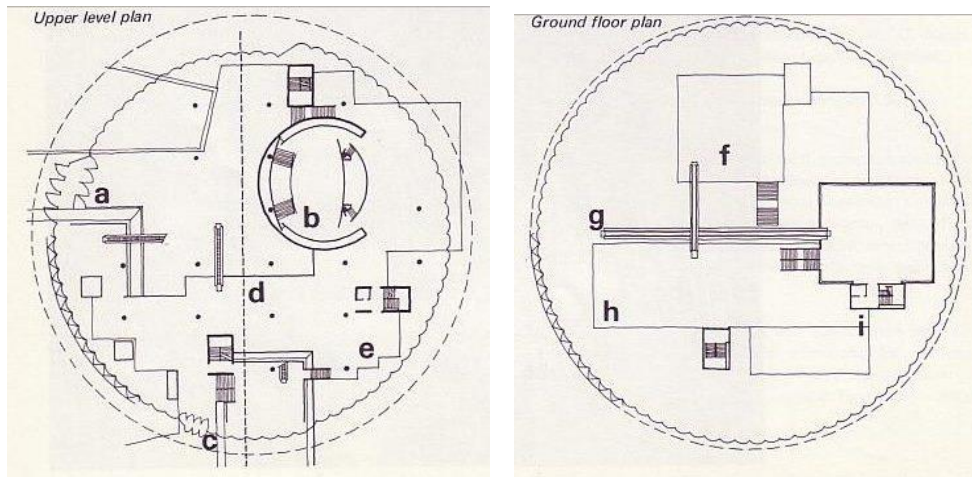


Imagen 38. I.Kalin, "Expo 67 Buliding Materials, Systems and Techniques" dept. Industry and Trade and Commerce, 1969. Fuente: Bruno Paul Stenson.

Leyenda: a) Entrada principal, b) Teatro, c) Salida, d) Línea del mirairil elevado, e) Exposición del Espíritu Americano, f) Exposición de pintores del momento, g) Escalera mecánica gigante (38m de longitud), h) Exposición "Destination Moon", i) Ascensor

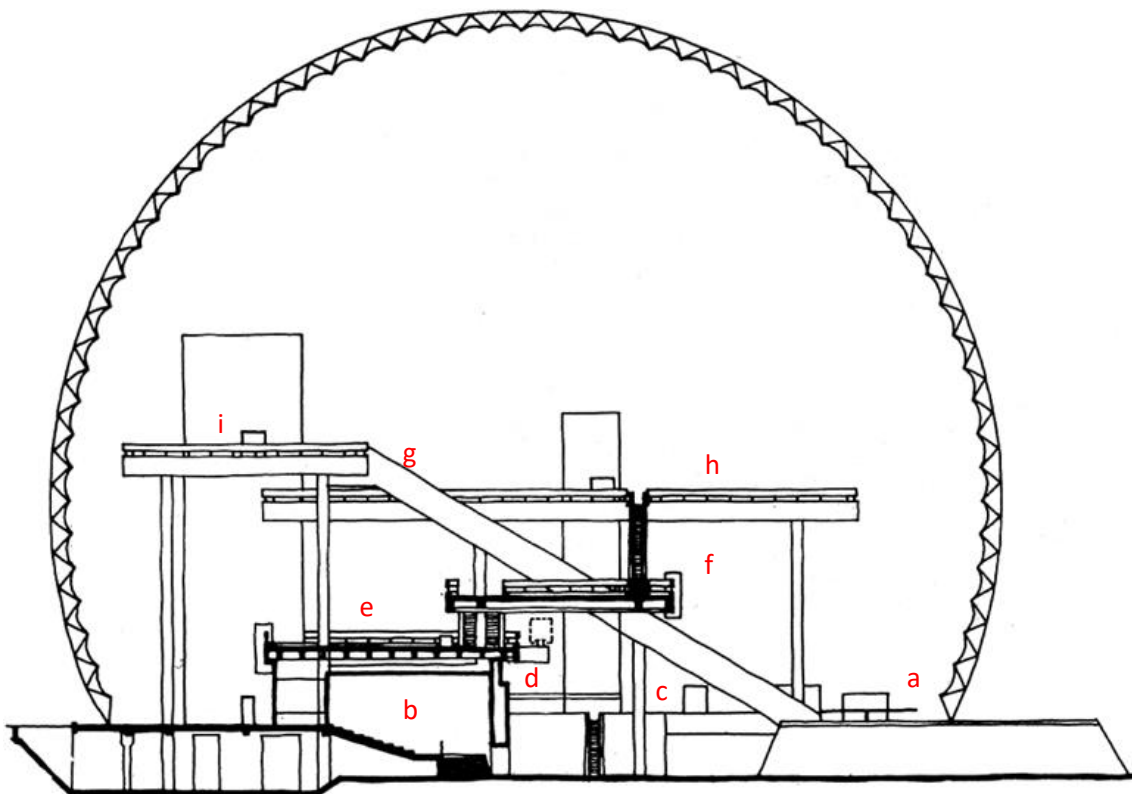


Imagen 39. I.Kalin, "Expo 67 Buliding Materials, Systems and Techniques" dept. Industry and Trade and Commerce, 1969. Fuente: Bruno Paul Stenson.

alta del pabellón, se mostró la tecnología estadounidense en el espacio. Allí se mostró la maquinaria que haría posible los cálculos necesarios para poder transportar a los astronautas americanos a la luna. Desde el techo de la cúpula se suspendieron varias cápsulas espaciales reales (Apolo y Géminis anteriormente citadas), modelos de satélites meteorológicos y de comunicaciones. Inmediatamente por encima de la plataforma de observación estaba un anillo de fotografías en color del programa espacial de los Estados Unidos acompañado de cintas de explosiones reales de Cabo Kennedy y conversaciones entre astronautas en el espacio y controladores de tierra. La exposición central, en el nivel debajo de la cubierta, estaba una cápsula tripulada por tres hombres que fue lanzada sin tripulación al espacio en una misión de prueba en agosto de 1966. También hubo un modelo de la nave espacial *Surveyor*²⁷ que aterrizó en la luna²⁸.

En otro nivel (En la planta y la sección de las imágenes 38 y 39, los espacios marcados con la letra "F", exposición "Pintores del momento") estaba una exposición de 22 pinturas americanas modernas, cuyos colores vivos y dimensiones enormes dominaron sobre todo el pabellón. Los artistas representaron todos los aspectos de la pintura moderna del arte óptico (más conocido como Op Art), del arte pop, y del expresionismo abstracto. Las pinturas, que medían desde 2 a 17m, fueron hechas por artistas populares como Roy Lichtenstein²⁹ y Andy Warhol expresamente

²⁷ El Programa Surveyor fue el tercer y último programa norteamericano de sondas lunares automáticas con capacidad fotográfica, de análisis químico y excavación del suelo.

Surveyor 1 (31 de mayo de 1966 / 2 de junio de 1966). Descendió en el Océano de las Tempestades a una velocidad de 22 m/min. Emitió 11.150 fotografías hasta el 13 de julio de 1966. El último contacto fue el 7 de enero de 1967. Portaba una cámara de TV y más de 100 sensores para medir las condiciones de la nave. Logró probar que el suelo lunar aguanta el peso de una nave, aunque la sonda soviética Luna 9 ya había alunizado meses antes. Alunizó a 2,5°S-43,2°W.

Surveyor 2 (20 a 23 de septiembre de 1966). Era una copia del Surveyor 1. Cayó a la superficie lunar por falta de estabilidad y se estrella a 5°N-25°W destruyéndose completamente. No se obtuvo, por tanto, ningún dato científico. En fechas cercanas a la inauguración del pabellón se estaba probando y era inminente la salida del Surveyor 3.

²⁸ FULFORD, R. *Expo 67, Commemorative Album from Montreal's World Fair*. McClelland & Stewart Ltd. Toronto, 1968.

²⁹ Roy Fox Lichtenstein (1923-1997) fue un pintor estadounidense de arte pop, artista gráfico y escultor, conocido sobre todo por sus interpretaciones a gran escala del arte del cómic.



Imagen 40. Incendio en 1976. La membrana plástica arde en escasos minutos.

para la ocasión. Éstas fueron quizás las pinturas más polémicas de la Expo, ya que algunos visitantes no las consideraban obras de arte³⁰.

Y finalmente, en el nivel de abajo (En la planta y la sección de las imágenes 38 y 39, los espacios marcados con la letra “e”, la exposición “Espíritu Americano”), había 33 fotografías gigantes mostrando actores y actrices que, desde los días del cine mudo hasta el presente, habían obtenido el estatus de estrellas de Hollywood: Humphrey Bogart, Marilyn Monroe, Clark Gable, Mary Pickford y Elizabeth Taylor. También tres mini-teatros mostraron películas continuas de cinco minutos, compuestas por algunos de los clips de cine más famosos del cine estadounidense.

En la planta baja (En la planta y la sección de las imágenes 38 y 39, los espacios marcados con la letra “b”) estaba un teatro que mostraba una película de 18 minutos en tres pantallas “*A Time to Play*” por el cineasta Art Kane. La película trataba sobre los niños jugando y cómo los preparaba para la vida adulta³¹.

A toda esta gran libertad espacial del pabellón; de acceso a muy diferentes alturas, de formas de plataformas muy distintas, etc, se sumó el hecho de que el monorraíl que conectaba todo el recinto de la exposición atravesaba el pabellón diametralmente en línea recta en un paso elevado, dando una sensación de movimiento libre desde distintas cotas que hasta entonces era inaudita.

La exposición fue todo un éxito, tanto que el gobierno de Canadá decidió seguir dando uso al pabellón. La esfera permanecería abierta al público durante nueve años hasta que un accidente en mayo de 1976, que implicaba un mantenimiento rutinario de una soldadura, provocó que la cubierta de acrílico se incendiase envolviendo toda la esfera en una espectacular bola de fuego con llamas durante 30 minutos. Cuando disminuyeron las llamas no se veía ninguna señal de las paredes acrílicas pero las vigas de acero de la cúpula permanecieron. Después del incendio la cúpula estuvo cerrada al público durante más de quince años conservándose únicamente la celosía de acero (Ver imagen 40).

El lugar permaneció cerrado hasta 1990, fecha en que Medio Ambiente de Canadá compró el solar, por 17,5 millones dólares, para convertirlo en un museo interactivo para la puesta en valor y la exploración de los ecosistemas de agua de los Grandes Lagos. El museo, inaugurado en junio

³⁰ FULFORD, R. *This was Expo* McClelland & Stewart Ltd. Toronto, 1968.

³¹ THEALL, D.F. *L'Expo- une form d'art unique en son genre*. Graphis Vol.23, No 132. McClelland & Stewart Ltd. Toronto, 1967.

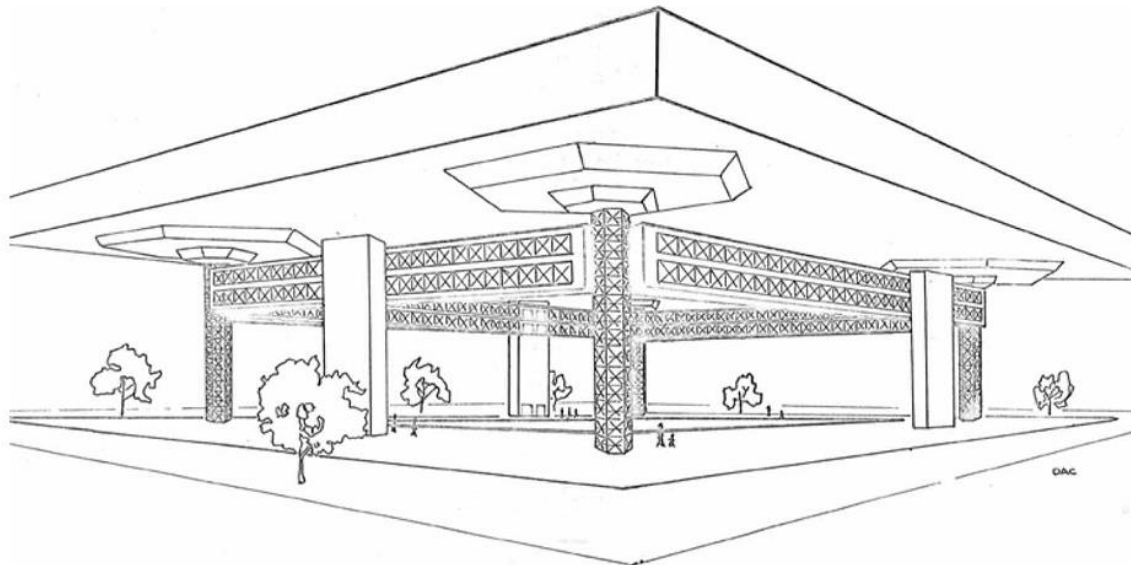


Imagen 41. Proyecto anterior propuesto al que se realizó diseñado por Sadao, McHale y Fuller para el pabellón de EEUU de la Expo'67.

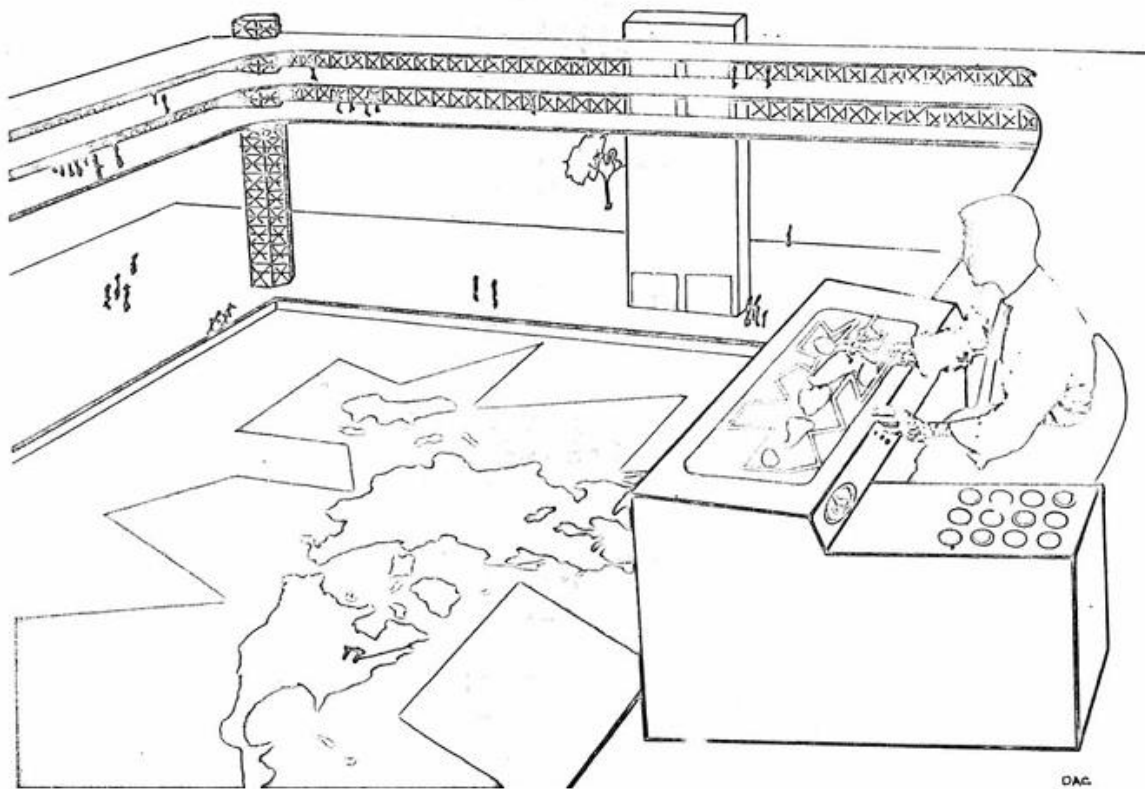


Imagen 42. "El mapamundi de Fuller", donde los países formaban una sola unidad, se materializaba a escala gigante, mostrado a través del desarrollo de un cuboctaedro.

de 1995, es un conjunto de edificios cerrados diseñados por Éric Gauthier, en el interior del esqueleto de acero original.

La cúpula reabierta no lucía acrílicos en su exterior esta vez debido a los costos de mantener la cúpula gigantesca caliente en invierno y fría en verano, y probablemente también para evitar futuros accidentes. Sin embargo, la cúpula fue golpeada con otro desastre en 1998 cuando una tormenta de hielo obligó a la biosfera a cerrar durante cinco meses.

La biosfera se reabrió y todavía alberga el museo. A pesar del fuego y las tormentas de hielo canadienses la Biosfera de Montreal permanece un robusto y hermoso ejemplo de la arquitectura geodésica de "Bucky".

2.4. Descripción de la cúpula: Arquitectura para albergar arquitectura.

Hubo un proyecto propuesto anterior al que se realizó diseñado por Sadao, McHale y Fuller para el pabellón de EEUU de la Expo'67. Consistió en un "mapamundi" gigante, donde los países formaban una sola unidad, mostrado a través del desarrollo de un cuboctaedro en una pantalla descomunal en el suelo y que se podría observar desde una altura de 15 metros completo, desde la cubierta del propio pabellón (Ver imágenes 41 y 42).

Después idas y venidas, el proyecto del pabellón de los Estados Unidos de América fue diseñado por Richard Buckminster Fuller como un objeto, ideado para poderse implementar en cualquier lugar y que pudiera albergar cualquier interior haciendo posible las condiciones mínimas de la vida humana en él. Una especie de hábitat idóneo dentro de un entorno no idóneo, algo así como una gran pecera humana que destacó sobre el recinto ferial de la Expo'67 como una enorme burbuja de plata. Durante el día su piel plástica brillaba a la luz del sol, y cuando la oscuridad caía, su iluminación interior le daba un brillo de distintas intensidades de color.

Fuller pensaba que el ser humano pronto dependería de fuentes de energía renovables, como la solar y la eólica. Por este motivo abogó por el principio que llamó "efemeralización" y que consistía en hacer más con menos. Por eso, en todo su trabajo y en especial en este pabellón, se basa en conceptos como "optimización" (el uso de la esfera como la única forma posible capaz de

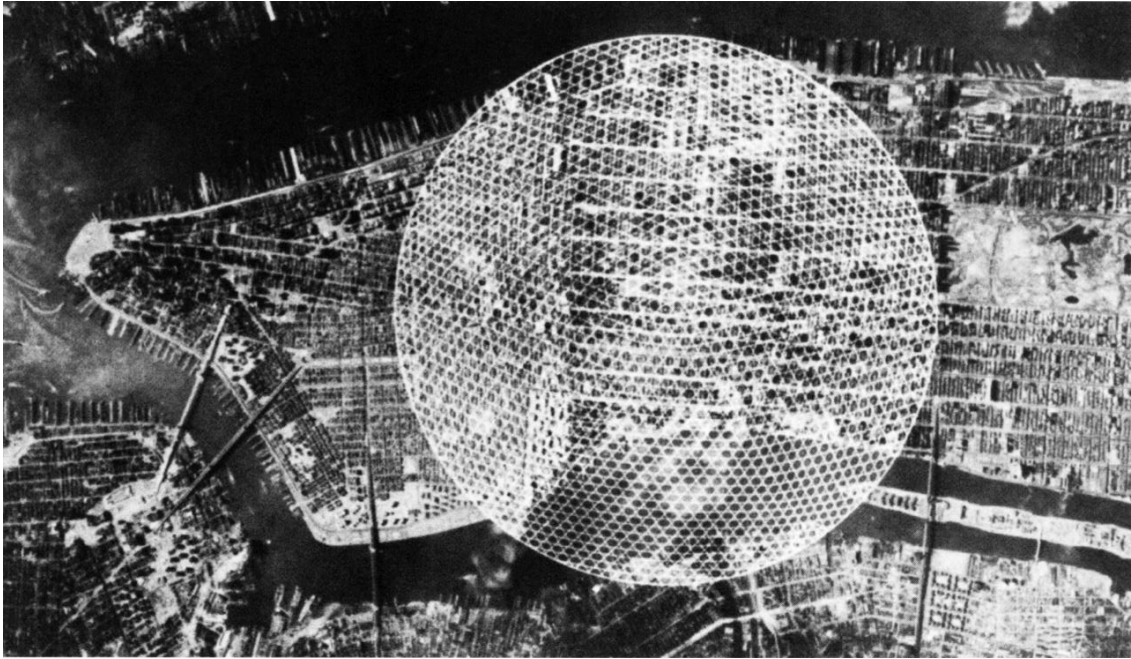


Imagen 43. Planta de la cúpula proyectada por Fuller para Manhattan



Imagen 44. Montaje fotográfico de la cúpula proyectada por Fuller para Manhattan

albergar el máximo volumen en la menor superficie de contorno), que tienen un papel fundamental en las obras de Fuller porque buscaba la única opción necesaria y posible³².

Otro de los conceptos que deriva de la optimización es el acuñado por él mismo; “**sinergia**”, muy utilizado hoy en día, nos habla de un máximo rendimiento de los elementos. También, desarrolló, aunque no en este proyecto, otros conceptos como la “**tensegridad**”, contracción de *tensional integrity* (integridad tensional), que se define como la característica de las estructuras cuya estabilidad depende del equilibrio entre fuerzas de tracción y compresión.

Estos y otros conceptos parecidos son los que circulan por la cabeza del inventor estadounidense al diseñar el pabellón. Sólo hacía falta ya la estructura necesaria que lo hiciera posible. Y eso se lo aportó su investigación en estructuras simples, extremadamente ligeras y estables³³, formando tetraedros, octaedros y conjuntos cerrados de esferas. Fuller afirmó que la geometría analítica natural del universo estaba basada en matrices de tetraedros³⁴.

En el desarrollo de la idea de las cúpulas geodésicas llegó a proyectar la cubrición de ciudades enteras. En sus experimentos ideó estructuras alrededor de la Tierra que, conectadas, permitirían viajar incluso por encima de los océanos... Fuller fue un soñador que imaginaba un futuro. Aunque recibió numerosos reconocimientos públicos después de muchos años de trabajo, la mayoría de sus invenciones no se llegaron a fabricar (Ver imágenes 31 y 32).

Después de varios cambios en el diseño del pabellón, finalmente Fuller se decantó por hacer tres cuartos de esfera de 76,2m de diámetro y 57,15m de altura (como si fuera un edificio de unas 16 plantas). Como todas las anteriores, la cúpula geodésica con origen en el icosaedro fue sólo un hemisferio, y el cuarto restante se construyó a base de 10 anillos horizontales que iban reduciendo su diámetro progresivamente hasta el suelo. Esta medida, que rompía la lógica del ritmo del

³² FRAMPTON, K. *Historia crítica de la arquitectura moderna*. 2ª ed., 1ª imp. de 03/2009 en Español Editorial Gustavo Gili, S.L. Dentro del capítulo *El New Deal: Richard Buckminster Fuller, Philip Johnson y Louis I. Kahn, 1934-1964*

³³ Ver “*Animation depicting Fuller’s geometric explorations - Whitney Museum*” sobre la geometría utilizada por Fuller. <https://whitney.org/collection/research/archives>

³⁴ Existe un tipo de molécula formada únicamente por átomos de carbono que lleva su nombre, los fullerenos, por el parecido con las cúpulas que diseñó Fuller.

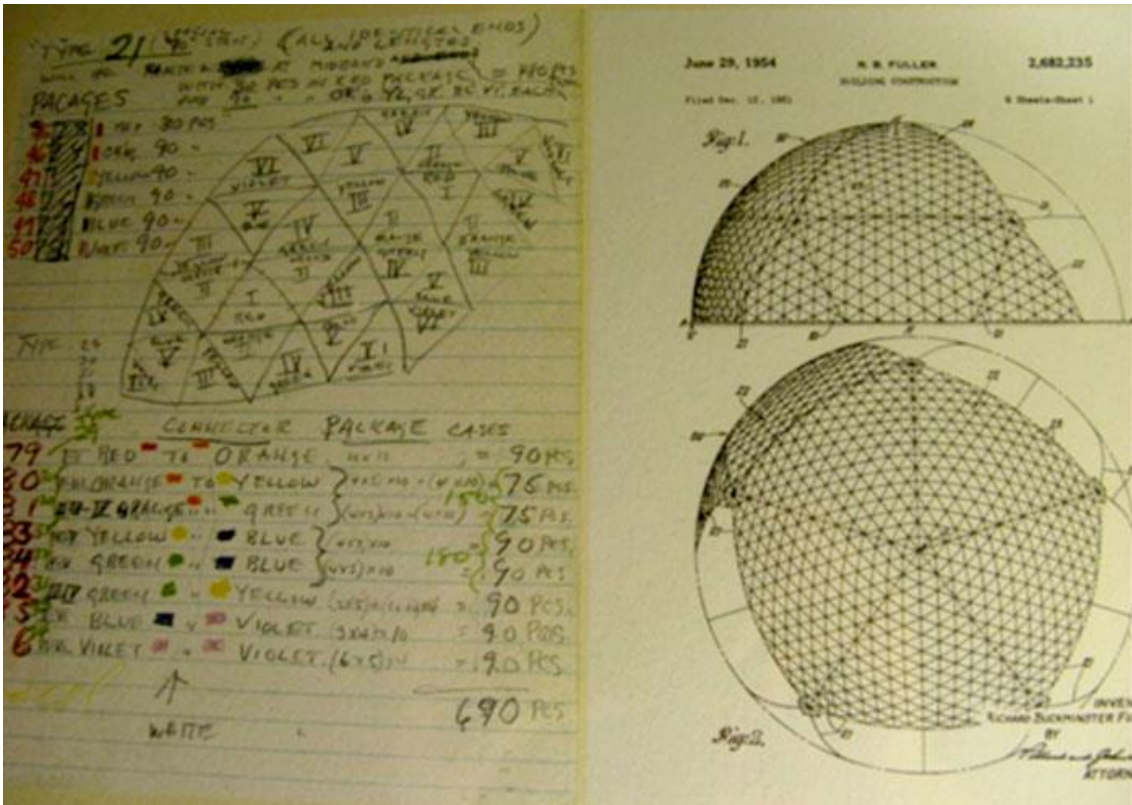


Imagen 45. Documentos de la patente de los domos geodésicos hecha por Buckminster Fuller en 1951. En <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/clases-teoricas/capitulo-08>

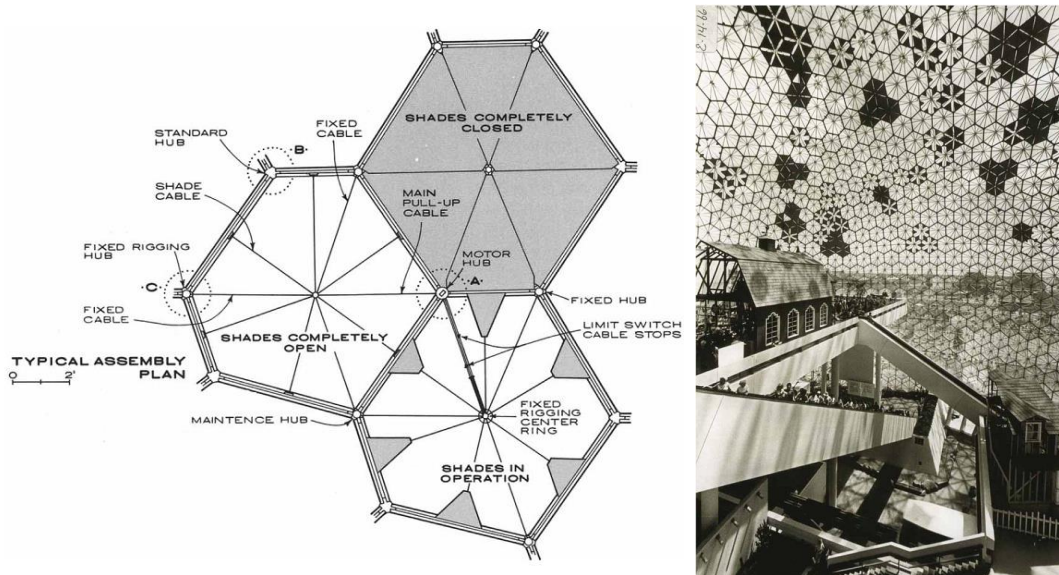


Imagen 46. Cortinas enrollables que tamizaron la luz del exterior del pabellón

hemisferio superior pero continuaba muy dignamente la aparente homogeneidad de la estructura hasta el suelo, se tomó por razones geométricas y estructurales. Si se hubiese continuado el ritmo del hemisferio superior, la toma de contacto con el suelo plano sería muy accidentada, mientras que los anillos horizontales daban la respuesta buscada al tocar suelo de una manera uniforme, sin romper el ritmo. La razón estructural es más sencilla, se trató de ordenar un poco los esfuerzos del resto de la cúpula en su contacto inferior.

2.4.1. La estructura y la cubierta

La estructura, estérea, está compuesta en su superficie exterior de una retícula de triángulos. Estos triángulos son la base de los tetraedros que dan inercia a la estructura (espesor a la cubierta, en torno a los dos metros, cuyos vértices interiores, conforman los vértices de los hexágonos de la capa interior de la cúpula.

En el interior de la cúpula estuvieron los polímeros rígidos de superficie curva apoyados sobre los lados de los hexágonos de la capa interior de la estructura. Estos polímeros cumplieron con todas sus expectativas: que fueran translúcidos, que pesaran poco, que su fabricación fuera moldeable. Al tratarse de un proceso térmico de fabricación, encajó perfectamente, aunque del diseño destacó negativamente que cada pieza, prácticamente, era distinta a otra y que, al no estar contenidas en un plano, la seriación fue muy compleja con la tecnología de fabricación de la época.

En el último nivel constructivo, el más interior, destacó la presencia de cortinas triangulares que se recogían gracias a rodillos accionados automáticamente en función de la exposición e intensidad del sol en una medición que se hacía desde el interior de pabellón seis veces al día. (Ver imagen 46)

Este sistema de tamización de la luz solar, que acompañaba armónicamente al sistema de climatización del pabellón, pretendía ser el complemento perfecto a la creación del hábitat pretendido en el interior de la esfera gigante.



Imagen 47. Primer experimento (fallido) de cúpula con láminas de vinilo de colores. Verano de 1948, Black Mountain College.



2.5. Trabajo con modelos físicos estructurales. Reflexión en torno al origen de las cúpulas geodésicas de Fuller: un solo modelo basado en la geometría.

Como ya se comentó en la introducción, esta tesis realiza un estudio que no se realiza desde una aproximación histórica al uso de los modelos y su incorporación en la mesa de trabajo de los arquitectos dentro de su labor creativa, sino que se desarrolla mediante el análisis de ciertas obras de arquitectura –próximas en el tiempo pero no en el espacio- que permiten identificar diversas operaciones con modelos; usos escalables de la maqueta al edificio, usos interpretados y traducidos de la escala de trabajo a la escala humana arquitectónica para la que fueron pensados. Con este estudio de casos, se construye un valioso espectro de sistemas de trabajo que han marcado un hito en la manera de construir.

Esta tesis pretende destacar estrategias, fórmulas del trabajo de varios arquitectos con modelos físicos, para hacer avanzar la ciencia aplicada, la técnica, de la arquitectura.

De la lectura de la bibliografía a la que con anterioridad hemos hecho mención nace, en cierta manera, el deseo de abrir brecha en la investigación de los “lugares comunes” entre estos proyectos, los casos de estudio, de procedencias muy distintas pero que comparten el haber “escuchado” qué tienen que aportar al proyecto, incluso en la forma, los materiales y las uniones entre ellos. La obra de Richard Buckminster Fuller, más concretamente sus cúpulas geodésicas, configura un hito, traído a esta tesis como caso de contexto al abrir una nueva vía en la investigación con estructuras compuestas por barras, con las que puso al límite la forma tradicional construida hasta entonces.

Para entender mejor el porqué del uso y materialización de la esfera por parte de Fuller y para saber si existe algo en la manera de trabajar del arquitecto e inventor estadounidense que podamos extraer para beneficiarnos es necesario preguntarse dónde tienen su origen estas cúpulas geodésicas de Fuller.

El origen de las famosas cúpulas geodésicas de Fuller se remonta a los veranos de 1948 y 1949 donde, como invitado en la Black Mountain College, erigió su primera cúpula geodésica.

El paso de Fuller por la Black Mountain College, y que ha asociado permanentemente su nombre al de esta institución de North Carolina, se limita a tres episodios:

- a) El experimento fracasado de erigir una cúpula geodésica con ayuda de los estudiantes en el verano de 1948 (Ver imágenes 47) donde, partiendo de la materialización de una

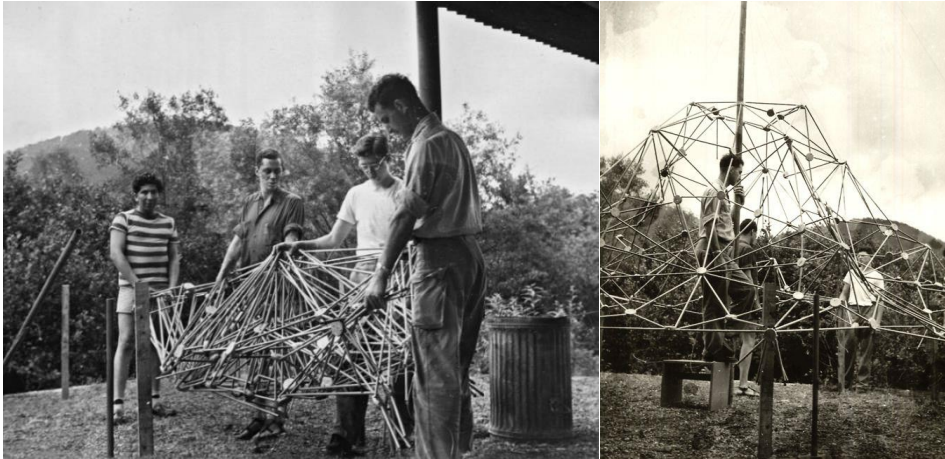
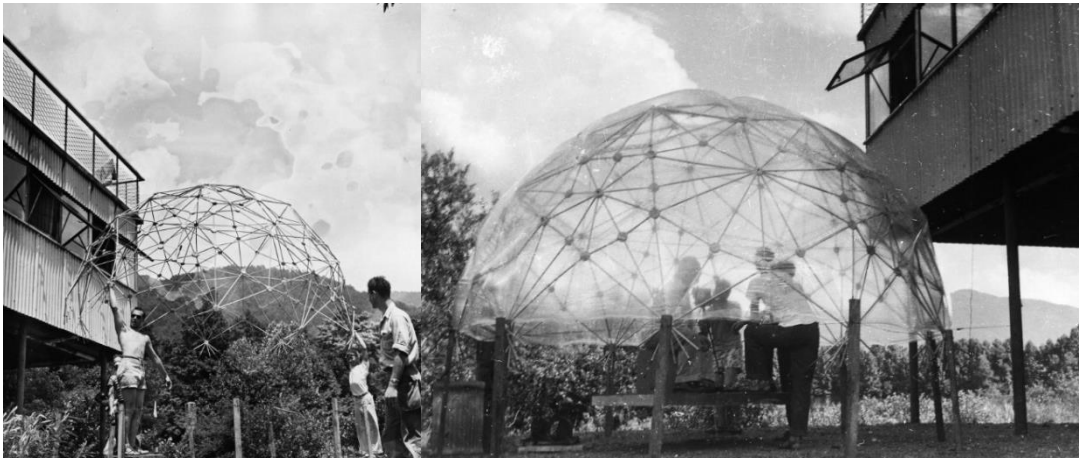


Imagen 48. Segundo intento de construcción de Cúpula Geodésica, esta vez con barras metálicas, cubierta por plástico transparente y calculado por ingenieros. Verano de 1949, Black Mountain College.



esfera en pequeñas dimensiones, pretende hacer una traducción literal al aumentar la escala y se da cuenta que hay elementos y mecanismos que no “funcionan” igual en cualquier escala. En este momento el arquitecto norteamericano experimenta en primera persona cómo la escalabilidad no es proporcional en algunos elementos.

- b) Su participación en la obra de Eric Satie promovida por John Cage y Merce Cunningham ese mismo verano, que ayudó a “eclipsar” el bochorno producido por su experimento fallido, después de las grandes expectativas levantadas.
- c) Su nuevo experimento con la cúpula geodésica en 1949, esta vez sí conseguido con ayuda del equipo de ingenieros que había realizado los cálculos estructurales. (Ver imágenes 48).

Es cierto que la mayoría del tiempo pasado en North Carolina fue dedicado por Fuller a sus conferencias y conversaciones con profesores y alumnos, a exponer sus teorías sobre los temas más diversos e incluso a la lectura de sus poemas. Pero queda en la memoria colectiva únicamente el dato de que fue allí, en la Black Mountain, donde Fuller erigió la primera cúpula geodésica de su carrera, una de las construcciones más identificadas con él y cuya ambición de cubrir grandes espacios, o incluso ciudades enteras, estaba muy lejos de lo limitado de ese primer ensayo con una burbuja de vinilo multicolor que no sobrepasaba las dimensiones de una cabaña.³⁵

2.6. Epílogo. Aportación de la reconstrucción tridimensional del Pabellón: la geometría como único patrón de “comportamiento”.

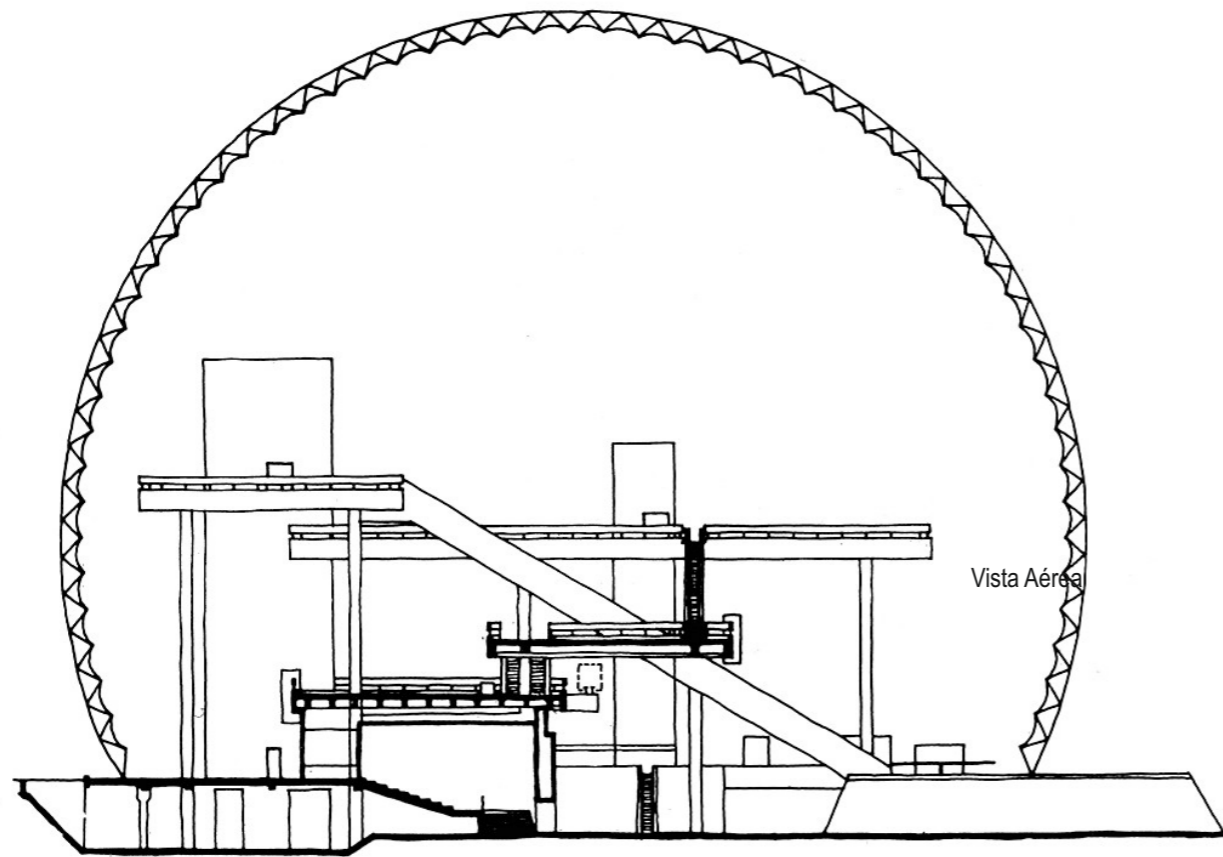
2.6.1. Discretizar la esfera

Discretizar es convertir algo continuo en algo discontinuo. En este caso es convertir la continuidad de las curvas que generan una esfera en la discontinuidad de una curva formada por segmentos que forman entre sí triángulos.

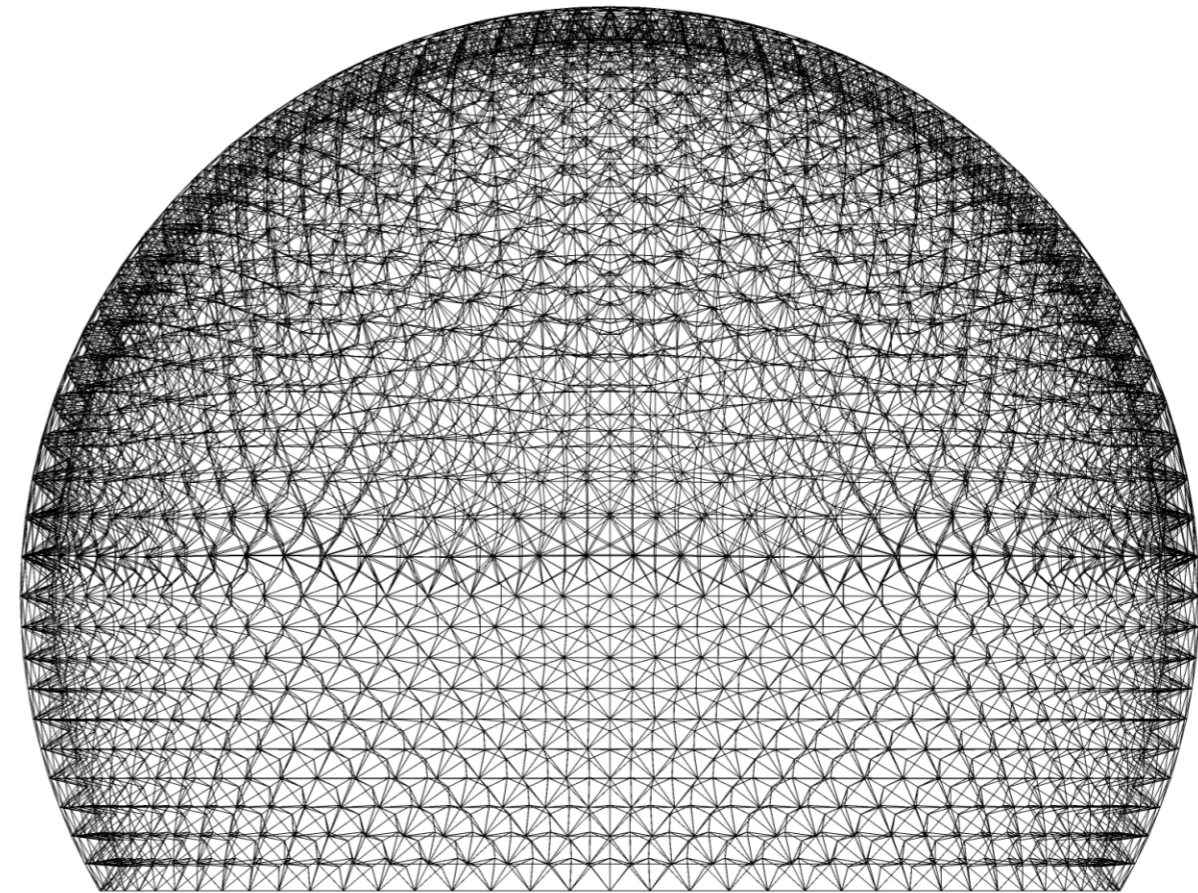
³⁵ MÚÑOZ, M.T. *Summer 1948. Buckminster Fuller at Black Mountain College. Architecture as an event*. Artículo para la revista “Proyecto, progreso, arquitectura” nº3, Sevilla, 2010. Págs. 94-109.



Imágenes 49. Mapamundi Dymaxion

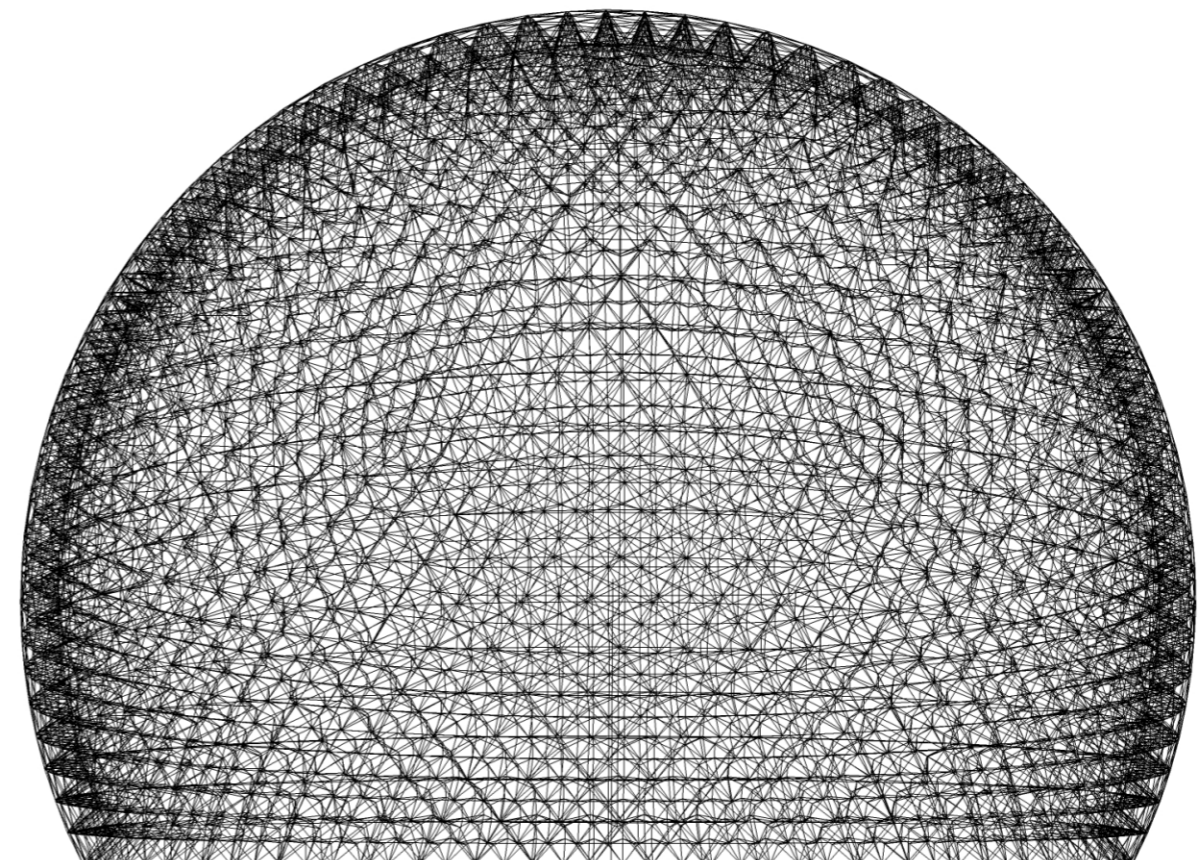


Construcción digital 3D para una mejor comprensión del modelo en perspectiva y vista ortogonal de la estructura de la cúpula. Al verlo de esta manera se aprecia claramente que el hemisferio superior es diferente del resto. Desde el ecuador hasta el contacto con el suelo se sigue una matriz de tetraedros formada por anillos paralelos al suelo.



Alzado en vista ortogonal

Reconstrucción 3D del Pabellón Alemán de la Expo de 1967 en Montreal



Alzado en perspectiva

Para discretizar una esfera lo más homogéneamente posible hay que partir de un sólido regular, que divida la superficie de la esfera en partes iguales. También hay que contar con la posterior construcción de esa estructura con lo que, es importante saber que necesitaremos triángulos si se va a construir una estructura espacial articulada.

El sólido elegido para dividir la esfera en partes iguales es el icosaedro. Si cortamos la esfera en los planos que forman las aristas con el centro, dividiremos la esfera en 20 triángulos regulares iguales. Cada una de esas 20 partes hay que conseguir subdividirlas lo suficiente para que se puedan hacer muchos tramos de segmentos rectos con el objetivo de que en conjunto forme una esfera sin discontinuidades.

¿Cómo se hace eso partiendo únicamente desde el icosaedro? En primer lugar, hay que aumentar el segmento que une el punto medio de cada arista con el centro, hacia fuera, hasta que sean de la misma distancia que el segmento que une los vértices con el centro (el radio de la esfera). Con esta operación se consiguen 30 vértices más; se pasa de los 12 vértices del icosaedro a los 42 de la cúpula geodésica de frecuencia 1. Así, de cada triángulo se sacan 4 uniendo los vértices y se pasa a tener 80 caras (4×20).

Cada vez que se realiza esta operación aumentamos en 1 la frecuencia de la cúpula geodésica, cuadruplicando el número de caras y triplicando el número de aristas, con lo que conseguimos que cada vez esas aristas sean más pequeñas y se va pareciendo cada vez más a una esfera.

2.6.2. Rigidización de la esfera discreta

Como hemos comentado anteriormente, Fuller era un ferviente defensor de que la geometría analítica natural del universo, que está basada en matrices de tetraedros. Al darse cuenta que estos poliedros eran los más elementales, la unidad mínima estable al articular las barras por sus extremos, y que apilados entre sí podía construir sólidos compuestos por barras más complejos (compartiendo sus caras con otros tetraedros) podía construir la geometría que quisiese.

Este último sistema es el que utilizó para construir la cúpula geodésica, la mayor parte de una esfera discretizada más grande del mundo, toda ella compuesta de tetraedros que comparten sus caras y barras.

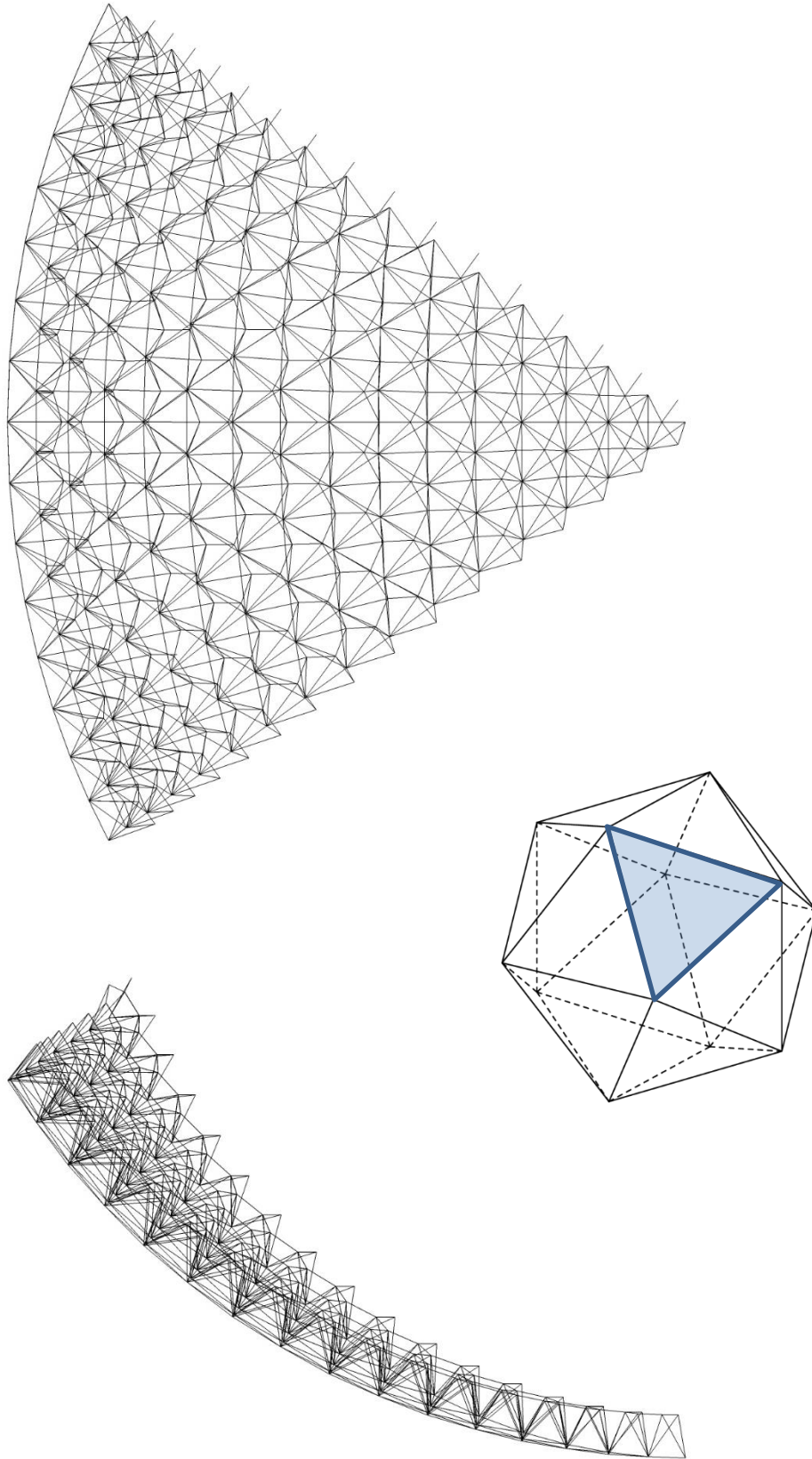


Imagen 51: Módulo de barras que se repiten en el hemisferio superior de la cúpula un total de 10 veces completo.

Después de discretizar la esfera en segmentos formando triángulos, decidió que cada uno de esos triángulos sería la base de un tetraedro y al unir los vértices, que no están en la primera esfera, se crea una segunda esfera formada por hexágonos.

El resultado final es que el exterior es una matriz de triángulos y el interior una matriz de hexágonos que no están en el mismo plano. El sistema que le daría la fama y que le permitiría, desde entonces, desarrollar su ámbito de investigación.

2.6.3. Reconstrucción tridimensional del pabellón de los Estados Unidos de América de la Expo'67 para su mayor comprensión

Dos proyectos descritos en esta tesis tienen una reconstrucción tridimensional muy similar: el pabellón de Estados Unidos de la Expo'67 y el Pabellón construido por Emilio Pérez Piñero para los Festivales de España de 1966.

En el caso del pabellón de Fuller, la idea de proyecto es tremendamente radical, se trata de la materialización de las tres cuartas partes de una esfera únicamente con segmentos rectos y de la manera más homogénea posible. Todo un reto. Con la realización del modelo 3D hemos podido constatar que es un reto.

El caso de la reconstrucción tridimensional del pabellón de Emilio Pérez Piñero como veremos más adelante es más sencillo por ser una estructura monocapa que fue diseñada para montarse en conjuntos de barras ya fabricadas.

Por un lado, en ambos casos hay que saber que es imposible que todos los segmentos sean de la misma longitud al discretizar una esfera, éstos tendrán que ser de la longitud más parecida posible, pero no idénticos.

Por otro, también ha de cumplir que todos los vértices del gran poliedro, han de estar todos a la misma distancia del centro.

Afortunadamente para el que representa tridimensionalmente y para el que fabrica los elementos de una cúpula geodésica como las que construyeron Fuller y Piñero, hay muchos elementos que se repiten y por tanto se pueden fabricar en serie. Y para el correcto curso de la construcción, tanto digital como física, hay que tener en cuenta dos aspectos fundamentales: seguir meticulosamente un orden estricto en el cálculo gráfico, y que la "plantilla" inicial que se vaya a

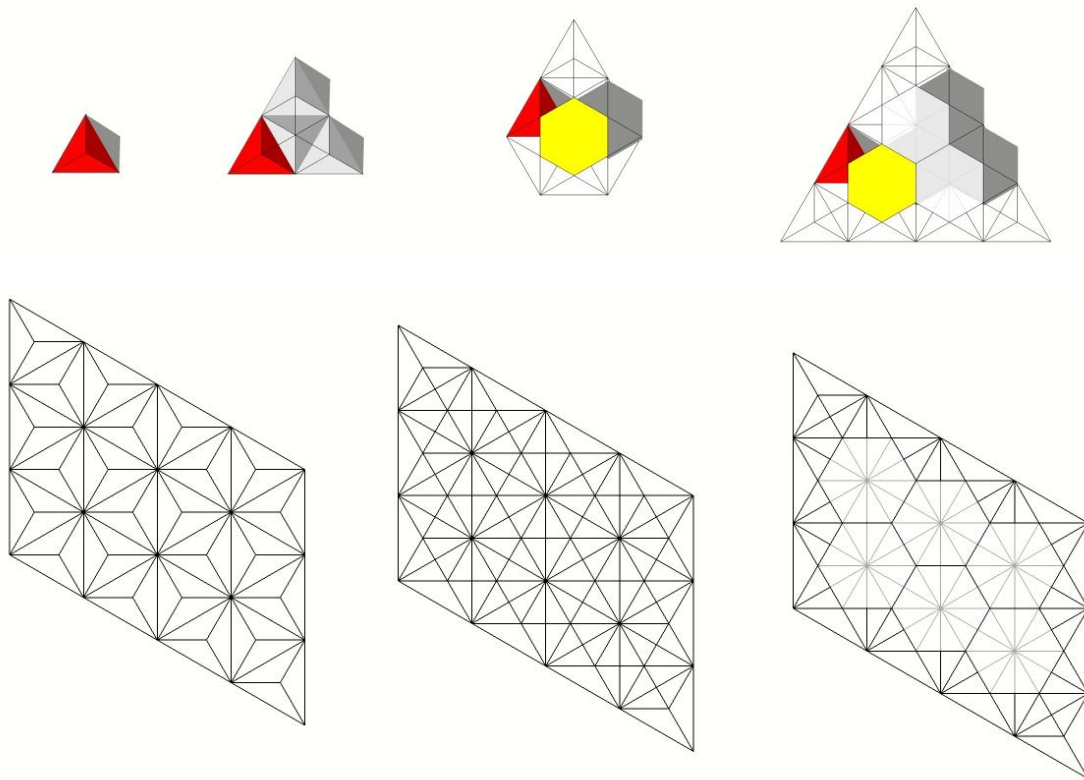


Imagen 52. Esquema de los la apilación de módulos de estructura de la cúpula y sistema de apilado de tetraedros y hexágonos de cubrición.

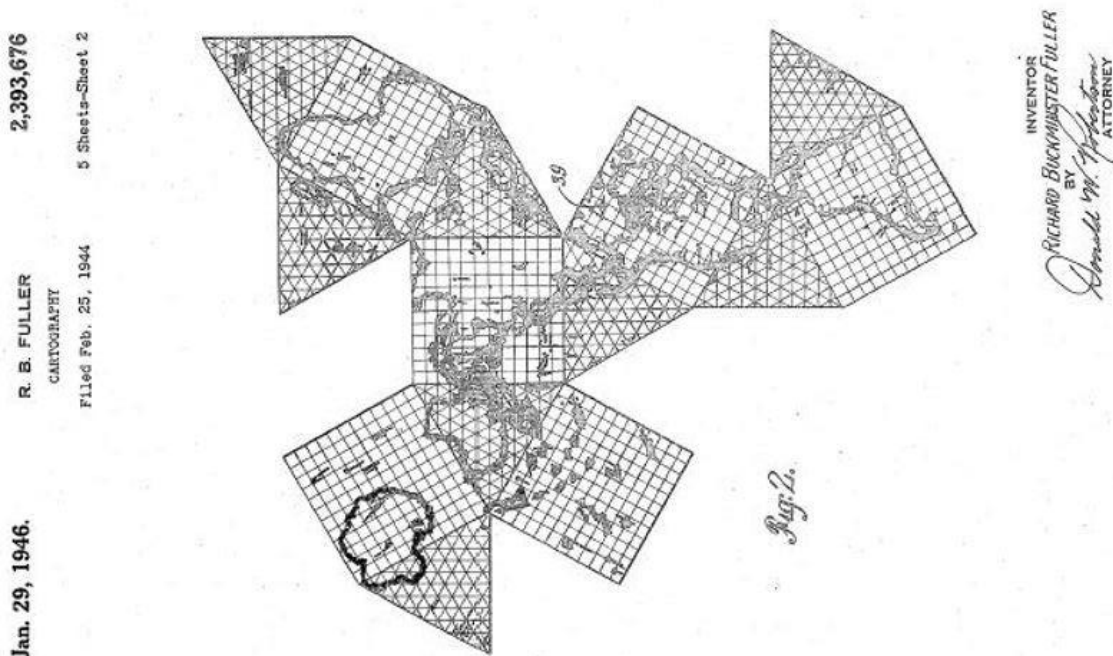


Imagen 53: Patente de desarrollo del mapa del mundo en cuadrados y triángulos.

hacer repetir sea especialmente precisa para que todas las piezas encajen a la perfección con el resto de la geometría de la cúpula.

No siempre fue éste el sistema utilizado por Fuller para discretizar la esfera. En los inicios de la investigación con cúpulas geodésicas la subdivisión del icosaedro fue de distinta forma, con un resultado menos homogéneo y con peor comportamiento al convertirla en estructura, que fue perfilando hasta el que hoy conocemos por la cúpula geodésica. Este sistema trataba de subdividir las caras del poliedro a través de la unión de las tres alturas del triángulo y tres segmentos que cortaban los triángulos cerca de sus ángulos.

El problema que más debió destacar entre los ingenieros que diseñaron la estructura fue conservar la homogeneidad geométrica de la subdivisión del icosaedro al entrar en contacto con la superficie del suelo

Desde el punto de vista de la técnica y los materiales utilizados, en el primer modelo, el del año 1949, las barras utilizadas eran rectas, pero estaban flexionadas, curvadas por un efecto de la incompatibilidad geométrica al unir sus barras, no cabían en el mismo plano y tenían que curvarse. Las uniones eran complejas por el número elevado de barras que conectaban y estaban hechas con empotramientos atornillados.

Este modelo daba muchos problemas al escalarlo; las barras no se flexionarían con la forma deseada de arcos de circunferencias y las resistencias de las barras serían muy distintas y cambiantes en función de la inclinación y los nudos a los que estuvieran anclados. La geometría del modelo fue evolucionando a través del conocimiento adquirido por las diferentes pruebas que se les hicieron a los modelos físicos y la solución final adoptada se basó en la más homogénea subdivisión de las caras del icosaedro en triángulos iguales.

Al hacer la reconstrucción digital se hace patente que el sistema utilizado por Fuller es de una sencillez admirable. Y esa sencillez, por el hecho de que esté toda la estructura formada por tetraedros, permite ciertas posibilidades.

Por un lado, se trata de un sistema de estructura que consta de dos superficies paralelas, una para el exterior y otra para el interior, una formada por triángulos y otra formada por hexágonos que podrían ir tanto en el exterior como en el interior indistintamente, y el comportamiento estructural sería idéntico, y entre ellas se sitúa un entramado de barras que las rigidizan.

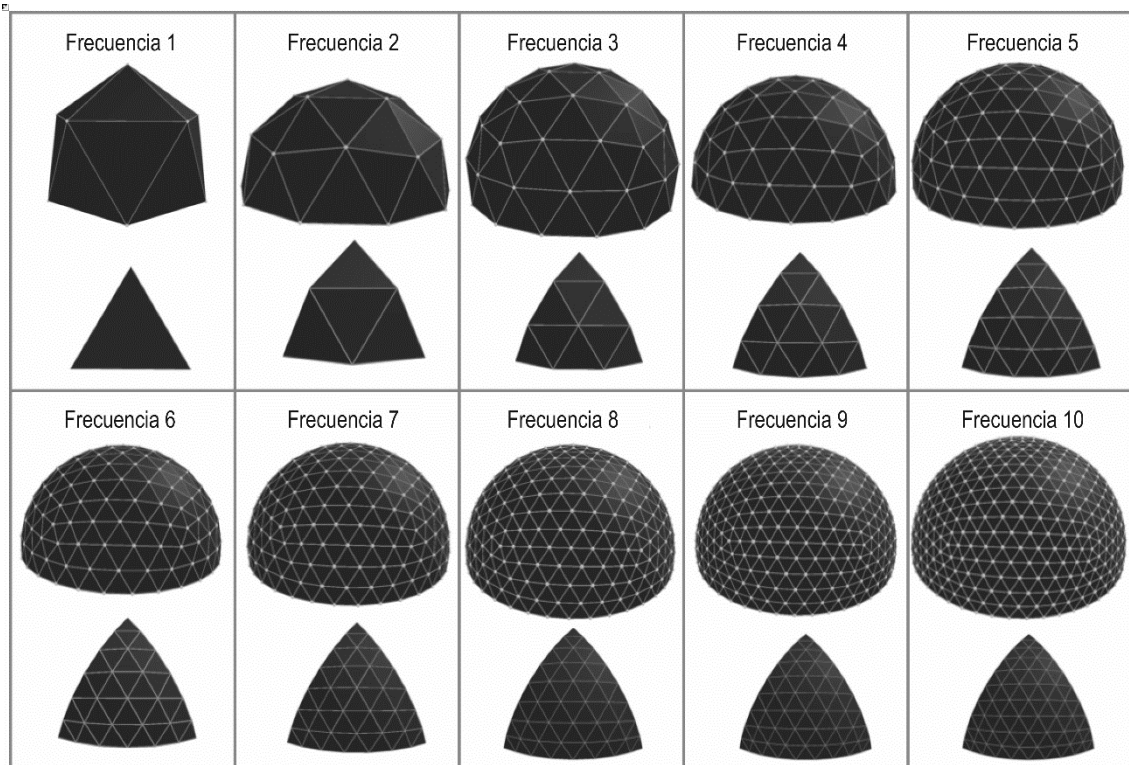


Imagen 54: Discretización de la esfera en segmentos y planos formando triángulos diferenciando las diferentes frecuencias (subdivisiones) de la esfera.

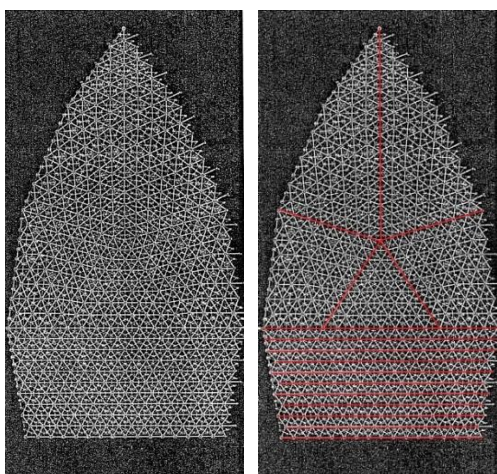
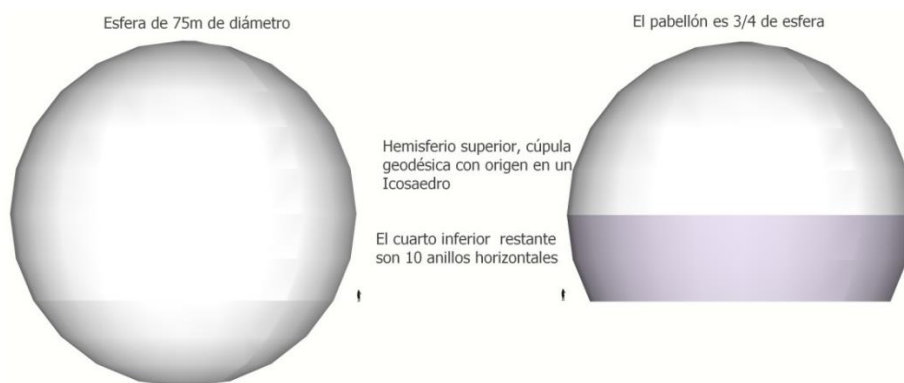


Imagen 55. Una quinta parte de la estructura del pabellón. Donde se ve cómo, a partir del ecuador hacia el suelo, están los anillos horizontales. Sin romper demasiado el ritmo de la estructura se consigue un adecuado contacto con el suelo con una distribución ordenada de las cargas.

Para este proyecto el arquitecto norteamericano eligió que la cara formada por triángulos estuviera en el exterior y que la cara formada por hexágonos estuviera en el interior y que además contuviera las placas translúcidas que aislarían el interior del exterior.

Esta decisión se dio porque de esta manera el número de placas, de forma hexagonal pues unía seis aristas, pero no en el mismo plano, era mucho más reducido que en el caso de haber cubierto la cúpula con triángulos.

No obstante, si se hubiera elegido cubrir la superficie interior de la cúpula con triángulos, todas las placas de cubrición serían planos y serían también más pequeños, con lo que hubiera sido más fácil su fabricación, transporte, apilado y montaje.

Esas placas de cubrición elegidas, las hexagonales, fueron fabricadas de un polímero rígido y curvadas con un tratamiento térmico que le dio cierta textura ondulada a la superficie de la cúpula.

Desde el punto de vista de la representación de la geometría del Pabellón, se observa un cuidadoso tratamiento de cada elemento para que nada, ni visual ni materialmente, desvirtuase su condición esférica: la longitud de cada barra, cuanto más pequeña más sensación esférica del poliedro construido; la homogeneidad, conseguida por asemejar lo máximo posible todos los elementos, etc. Todos estos cuidados provienen de una mente, la de Fuller, que se había ejercitado durante muchos años tratando de representar la superficie terrestre en un único plano, cuando patentó en 1946 su mapamundi Dymaxion a través de la geometría del icosaedro.

Una vez que encontró el sistema, al subdividir el icosaedro, el “problema” se centró, al igual que con la reconstrucción tridimensional que se ha realizado en esta tesis, en la correcta subdivisión de una vigésima parte de la esfera. Con el tiempo, el arquitecto estadounidense supo ver que cada una de esas veinte partes se podría subdividir a su vez en seis partes iguales, lo que le permitía centrarse en un pequeño sector que después se multiplicaría 120 veces, dando la posibilidad de que los elementos se pudieran fabricar en serie.

De la misma manera que ocurre en la representación, lo que ocurre también en la simulación del comportamiento estructural es que los elementos que se repiten en posiciones idénticas, pero en otros sectores de la cúpula, se comportan de manera idéntica, con lo que el comportamiento estructural es más ordenado.

EL PABELLÓN ALEMÁN DE LA EXPO'67 (1965-1967)

La tracción del modelo como hipótesis de proyecto.

Frei Otto + Rolf Gutbrod

3. EL PABELLÓN ALEMÁN DE LA EXPO'67 (1965-1967)

3.1. Introducción

3.2. Frei Otto (1925-2015)

3.3. El Pabellón alemán de la Expo'67

3.3.1. El proyecto en el concurso del Pabellón: el uso de la forma de las pompas de jabón

3.3.2. El porqué de estas formas: las películas de jabón y el "Problema de Plateau"

3.3.3. Descripción del Pabellón

3.3.4. Proceso de montaje y construcción en un tiempo récord:

3.3.5. Un "catálogo" de las aportaciones de Frei Otto para representar el avance de la tecnología alemana.

3.3.6. Al terminar la Expo

3.4. Antecedentes y precedentes del Pabellón: Trabajo con modelos físicos

3.4.1. Un modelo a escala 1:1 con vida propia: el edificio del Instituto de estructuras ligeras en Stuttgart.

3.4.2. Optimización como principio generador de forma.

3.4.3. Método de trabajo teniendo el modelo como hipótesis.

3.4.4. Metodología en los ensayos con modelos.

3.4.5. Intentos sistematizadores

3.4.6. Modelos físicos y modelos virtuales. La visión y la práctica del autor.

3.5. Epílogo y aportación de la reconstrucción tridimensional: El artista ha de hacer experimentos

3.5.1. Aportación de la reconstrucción tridimensional digital del Pabellón Alemán de la Expo'67 para su mayor comprensión

3.1. Introducción

Apenas a quinientos metros del Pabellón de los Estados Unidos en la Exposición Universal de 1967 de Montreal estaba el Pabellón Alemán. Se trataba de una extraña “tienda” gigante alzada por mástiles y atirantada por cables en sus extremos. Esta tienda representó, para gran sorpresa para público y prensa especializada, a la por entonces República Federal Alemana.

Diseñado por el joven arquitecto alemán Frei Otto, la construcción del Pabellón supuso una novedad por sus formas orgánicas irregulares, fruto de haber sido diseñado a través de una metodología muy novedosa, el trabajo con modelos físicos estructurales trabajando a tracción.

En este capítulo se recogen diez años de investigación del arquitecto con membranas trabajando a tracción. Estos han servido, sobre todo, para cubrir grandes espacios con muy poco material de cubrición.

Es preciso agradecer, antes de empezar a desarrollar este capítulo, al Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart (*Institut für Lichtstrukturen* IL) que haya accedido a facilitarme las 3 visitas que he hecho al Instituto en el transcurso de la tesis y también agradecer el acceso al archivo que el mismo Frei Otto comenzó en este edificio que sirvió como modelo a escala 1:1 de prueba antes de construir el pabellón alemán de la Expo'67. También es necesario hacer mención al archivo que se conserva en la Universidad de Karlsruhe (*Karlsruher Institut für Technologie*, KIT) y que está a cargo de George Vrachliotis, que visité al comienzo de la investigación en Frei Otto y la exposición que organizó en el *Zentrum für Kunst und Medien* (Centro de Arte y Medios ZKM) sobre la manera de trabajar con maquetas del arquitecto alemán que llevó por título “Denken in modellen” (“Pensar en modelos”).

Como ya se comentó en la introducción, esta tesis realiza un estudio que no se realiza desde una aproximación histórica al uso de los modelos y su incorporación en la mesa de trabajo de los arquitectos dentro de su labor creativa, sino que se desarrolla mediante el análisis de ciertas obras de arquitectura –próximas en el tiempo pero no en el espacio- que permiten identificar diversas operaciones con modelos; usos escalables de la maqueta al edificio, usos interpretados y traducidos de la escala de trabajo a la escala humana arquitectónica para la que fueron pensados. Con este estudio de casos, y en concreto en este capítulo sobre el pabellón alemán de la Expo'67 de Frei Otto, se construye un valioso espectro de sistemas de trabajo que han marcado un hito en la manera de construir.



Imagen 55: Aspecto exterior del Pabellón alemán de la Expo de 1967



Imagen 56: Maqueta de pequeñas dimensiones sobre una película de jabón

De la lectura de la bibliografía a la que se hará mención durante el desarrollo de este capítulo nace, en cierta manera, el deseo de abrir brecha en la investigación de los “lugares comunes” entre estos proyectos, los casos de estudio, de procedencias muy distintas pero que comparten el haber “escuchado” qué tienen que aportar al proyecto, incluso en la forma, los materiales y las uniones entre ellos.

3.2. Frei Otto (1925-2015)

El arquitecto e ingeniero estructural alemán Frei Otto (1925-2015), fue conocido por sus innovaciones en estructuras ligeras trabajando a tracción. Poco después de su muerte en 2015 fue galardonado con el Premio Pritzker, reconocimiento que le sigue a su previo galardón de la Medalla de Oro Real RIBA en 2006. Gran parte de su investigación en estructuras ligeras es tan relevante hoy como cuando las propuso por primera vez hace más de 60 años, y su obra continúa siendo sugerente a arquitectos e ingenieros hasta el día de hoy.

En muchos sentidos, Otto estaba muy adelantado a su tiempo y buscó nuevos métodos para utilizar la menor cantidad de material y energía para crear espacios, abarcando los principios de sostenibilidad mucho antes de que el término fuese acuñado en la arquitectura. Su interés en ir más allá de la disciplina es evidente en su fascinación por la experimentación, a la vez que hablaba de la necesidad de entender los procesos físicos, biológicos y técnicos que dan lugar a los objetos. Destaca en gran medida su interés en fenómenos naturales como los cráneos de aves, pompas de jabón, y telas de araña, traduciéndolas en formas artificiales que se muestran al usuario de sus edificios y pabellones increíblemente delicadas y elegantes.

Un importante punto de inflexión en la carrera de Otto estuvo marcado por el diseño del Pabellón alemán para la Exposición Universal de 1967 en Montreal. Este trabajo demuestra la creciente importancia de la tecnología, la prefabricación y la producción en serie en la arquitectura. Además atrajo, por primera vez, la atención de crítica y público internacional hacia sus estructuras tensadas. Sin embargo, sus intereses en las tensoestructuras comenzaron mucho antes, cuando construyó tiendas de campaña ligeras para sus compañeros prisioneros de la Segunda Guerra Mundial. Esta experiencia lo hizo consciente de la importancia de desarrollar una arquitectura capaz de funcionar bajo grandes limitaciones materiales y económicas, e inspiraron a lo que sería su carrera. En este capítulo nos centraremos en su trabajo hasta conseguir materializar este pabellón único.

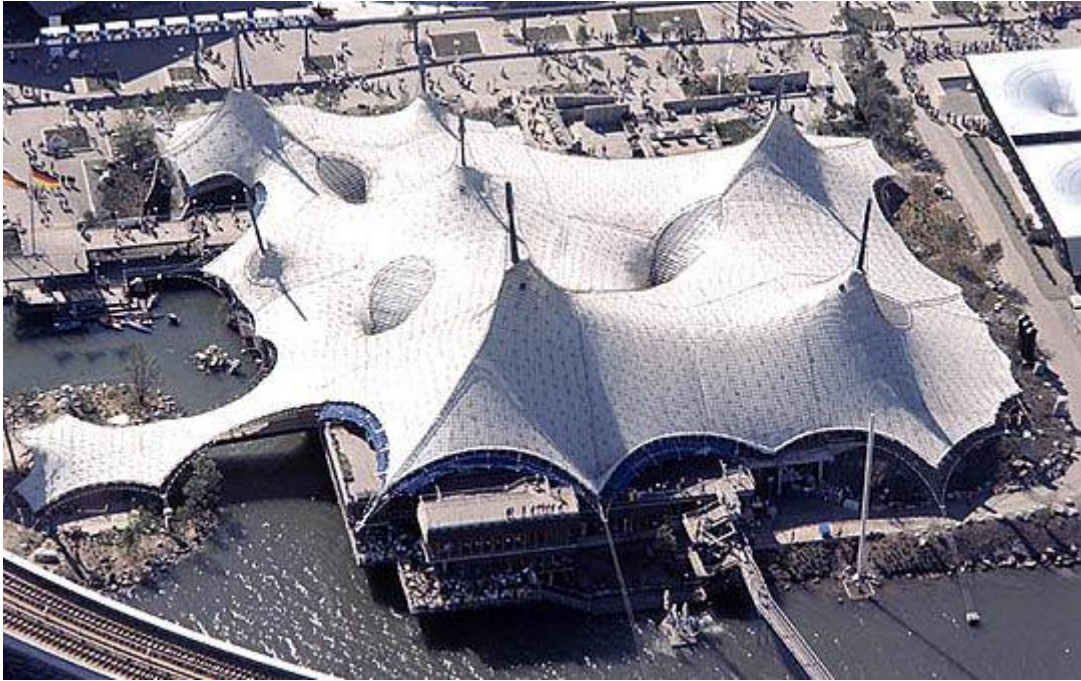


Imagen 57: Vista aérea del Pabellón

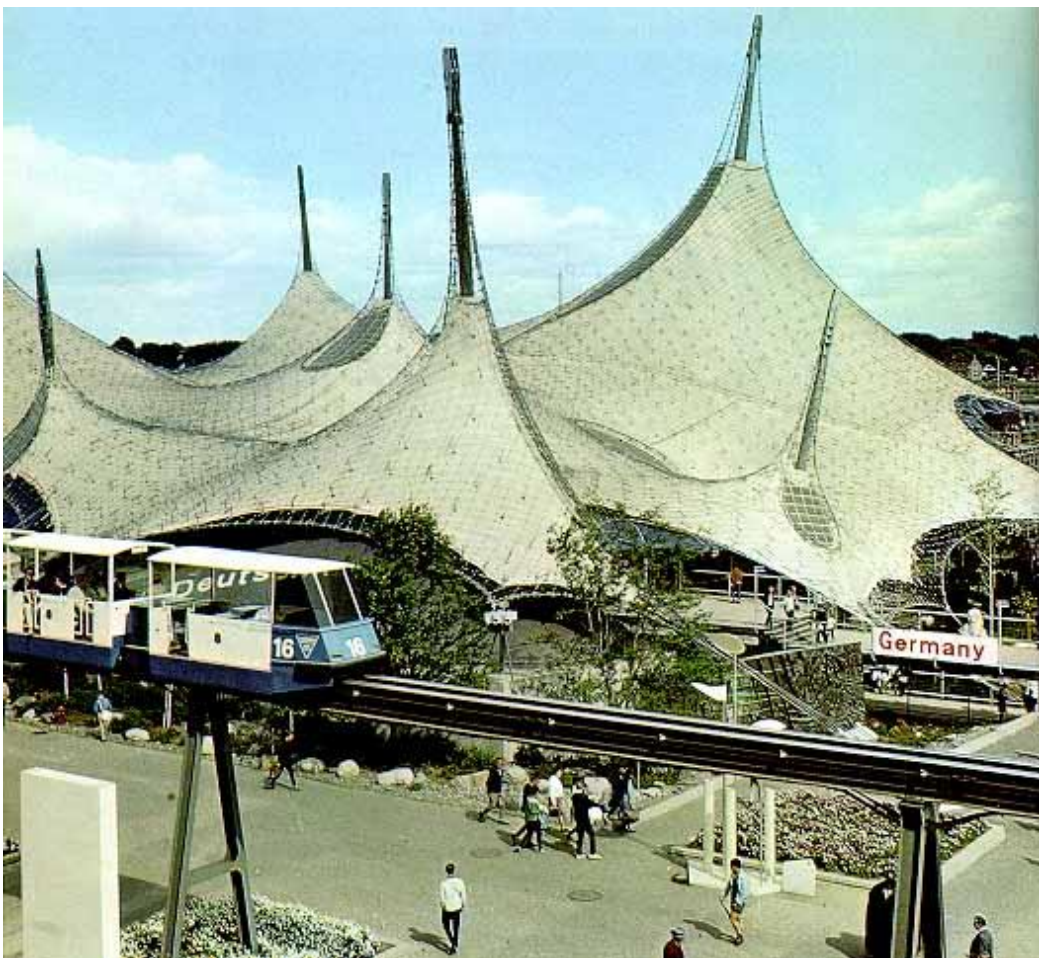


Imagen 58: Imagen exterior del Pabellón junto al tren elevado.

Tras abandonar la escuela en 1943, se alistó en las fuerzas aéreas alemanas y participó en la Segunda Guerra Mundial. Fue capturado por los Aliados en Chartres (Francia), donde permaneció dos años en trabajos de reparación y construcción de edificios.¹

Al concluir la guerra, ingresó en la Universidad Tecnológica de Berlín y posteriormente, entre los años 1950 y 1951, realizó un viaje por los Estados Unidos que le llevó a aumentar sus conocimientos y realizar sus estructuras de membranas ligeras en los años siguientes.

A Otto se le relaciona con la Bauhaus y el Estilo Internacional por su gran consideración de la función y las estructuras minimalistas, así como con la generación de arquitectos que surgieron en la postguerra por su estudio de la naturaleza y su aplicación de la ingeniería y tecnología en sus obras arquitectónicas.

Kenneth Frampton lo sitúa dentro de su libro *“Historia crítica de la arquitectura moderna”* en el capítulo *“Lugar, producción y escenografía: teoría y práctica internacionales desde 1962”*. En ese capítulo, el crítico inglés, enumera seis movimientos que se desarrollaron a partir de los años 60 del siglo XX en el panorama internacional: el populismo, el racionalismo, el estructuralismo, el posmodernismo, el neovanguardismo y el productivismo (donde sitúa al arquitecto alemán). Este último movimiento, cuyos preceptos básicos son la construcción de espacios adaptables, abiertos y flexibles, desde la estructura y las instalaciones hasta la forma exterior basada en ese funcionamiento interno, tienen como gran referente al Centro Pompidou de París, que mantiene en el exterior la estructura, los accesos y las instalaciones para poder encerrar un interior diáfano y adaptable. En este mismo movimiento, el crítico y arquitecto inglés lo sitúa a la altura de otros arquitectos como Norman Foster, Yukata Murata² y el ya citado anteriormente Richard Buckminster Fuller.

3.3. El Pabellón alemán de la Expo'67

De todos los pabellones de la Exposición de 1967 en Montreal, en este capítulo nos vamos a centrar primero en el pabellón de la, por aquel entonces, República Federal Alemana que desde la prensa española de aquel momento se describía así:

¹ ROLAND, C. *Frei Otto: Estructuras*. Editorial Gustavo Gili, S.L.; Edición: 1 (1 de septiembre de 1973) Pág 15.

² Yukata Murata (Niigata, Japón 1917- Tokyo, Japón 1988) conocido mundialmente por el diseño y la construcción del Pabellón Fuji que representó a Japón en la Expo'70 de Osaka en Japón.

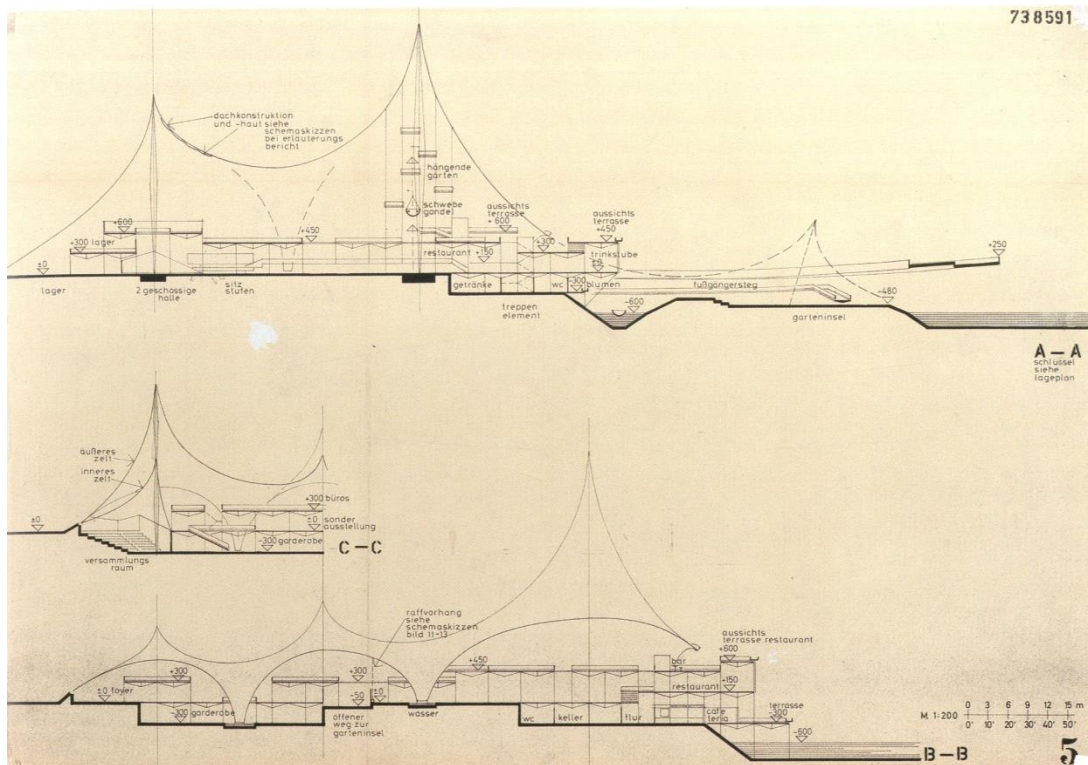


Imagen 59: Diseño del concurso. Secciones

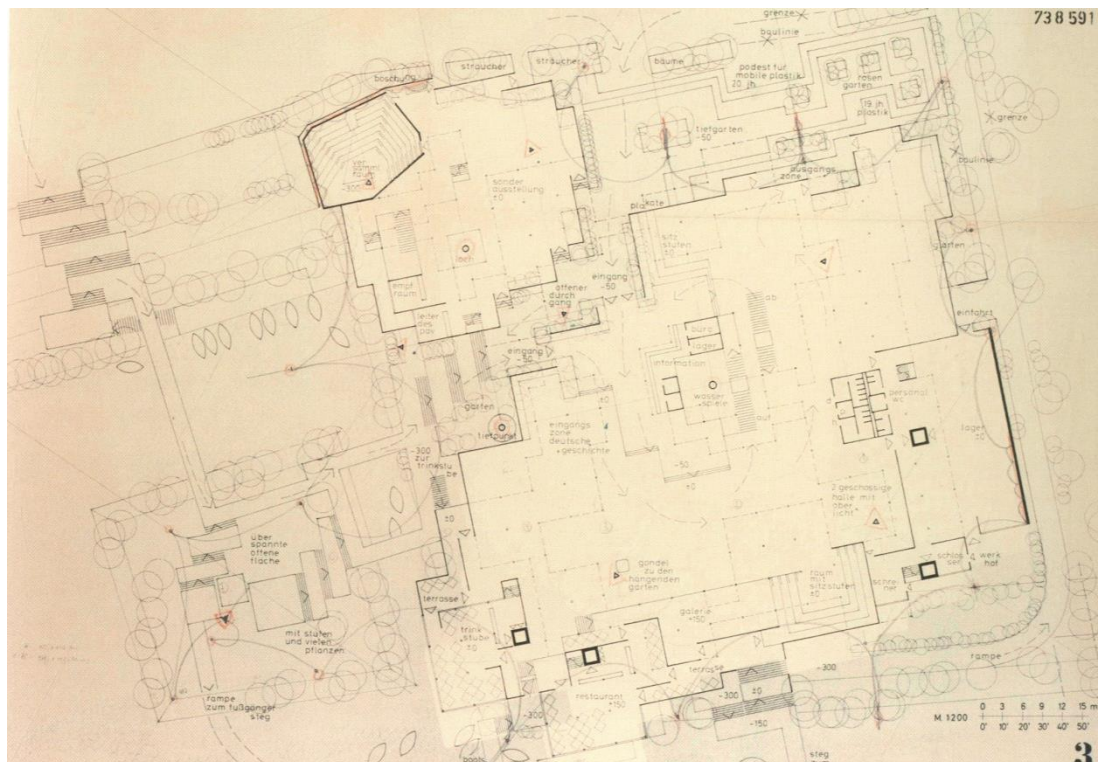


Imagen 60: Diseño de concurso. Planta de la cota del suelo.

“El decorativo recinto de Alemania, diseñado por Frei Otto y Rolf Gutbrod³, es una red de acero de la que pende una película de tejido transparente. Todo el techo, ondulante, se sostiene por la tensión producida por unos vástagos clavados en la tierra, semejante a gigantescas espigas de una tienda de campaña”.⁴

Centrémonos en el diseño de esta inaudita “tienda de campaña gigante”, una de las aportaciones más interesantes de Frei Otto al mundo de la arquitectura, en la que dedujo la “magia” geométrica de la burbuja de jabón humilde⁵. Para su diseño utilizó el comportamiento formal y tensional del jabón de la siguiente manera; partió de un conjunto de puntos fijos e hizo pasar por ellos una película de jabón que se extendería naturalmente ofreciendo la superficie abarcable más pequeña.

En esta osadía destacó la complicación del cálculo de la forma producida por la tensión superficial, no sólo para comprobar las distintas cargas sino, sobre todo, para poder controlar la forma de la cubierta. Frei Otto no podía esperar a que la técnica llegara a resolver cómo se representaba y calculaban este tipo de superficies y se metió de lleno en esa tarea:

“Ahora se puede calcular, algo que durante más de cuarenta años fue imposible. Yo no he esperado a que se pudiera calcular para construirlas”⁶

³ Konrad Rolf Gutbrod (Stuttgart 1910, Arlesheim, cantón de Basilea 1999) fue un arquitecto y profesor universitario alemán. Se hizo famoso sobre todo por ser el arquitecto que diseñó y construyó el Stuttgart Liederhalle, la primera sala de conciertos asimétrica en el mundo, con una planta libre curvada y el Pabellón Alemán para la Exposición Universal Expo 67 en Montreal, junto con Frei Otto.

⁴ HEMEROTECA. ABC de Madrid del 21 de abril de 1967.

⁵ Algunos de los principales experimentos fueron recogidos en vídeo y maquetas por el IL (Institut für Lichtstrukturen, Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart) desde 1950 hasta la muerte del arquitecto. Y éstos a su vez fueron mostrados por vez primera todos juntos en la exposición que organizó el KIT (Karlsruher Institut für Technologie, Instituto de Tecnología de Karlsruhe) en el ZKM (Zentrum für Kunst und Medien, Centro de Arte y Medios) de la ciudad de Karlsruhe, Alemania, con el título “Frei Otto, Denken in Modellen”. El siguiente video es sólo parte de uno de los vídeos de la exposición: “FREI OTTO - MODELING WITH SOAP FILMS”: <http://www.freiottofilm.com/>

⁶ WINTER, J. *Finding Form. Towards an architecture of the Minimal* dentro de “The Architectural Review”. Vol: 199. Iss: 1192. Londres, 1996. Pág 97

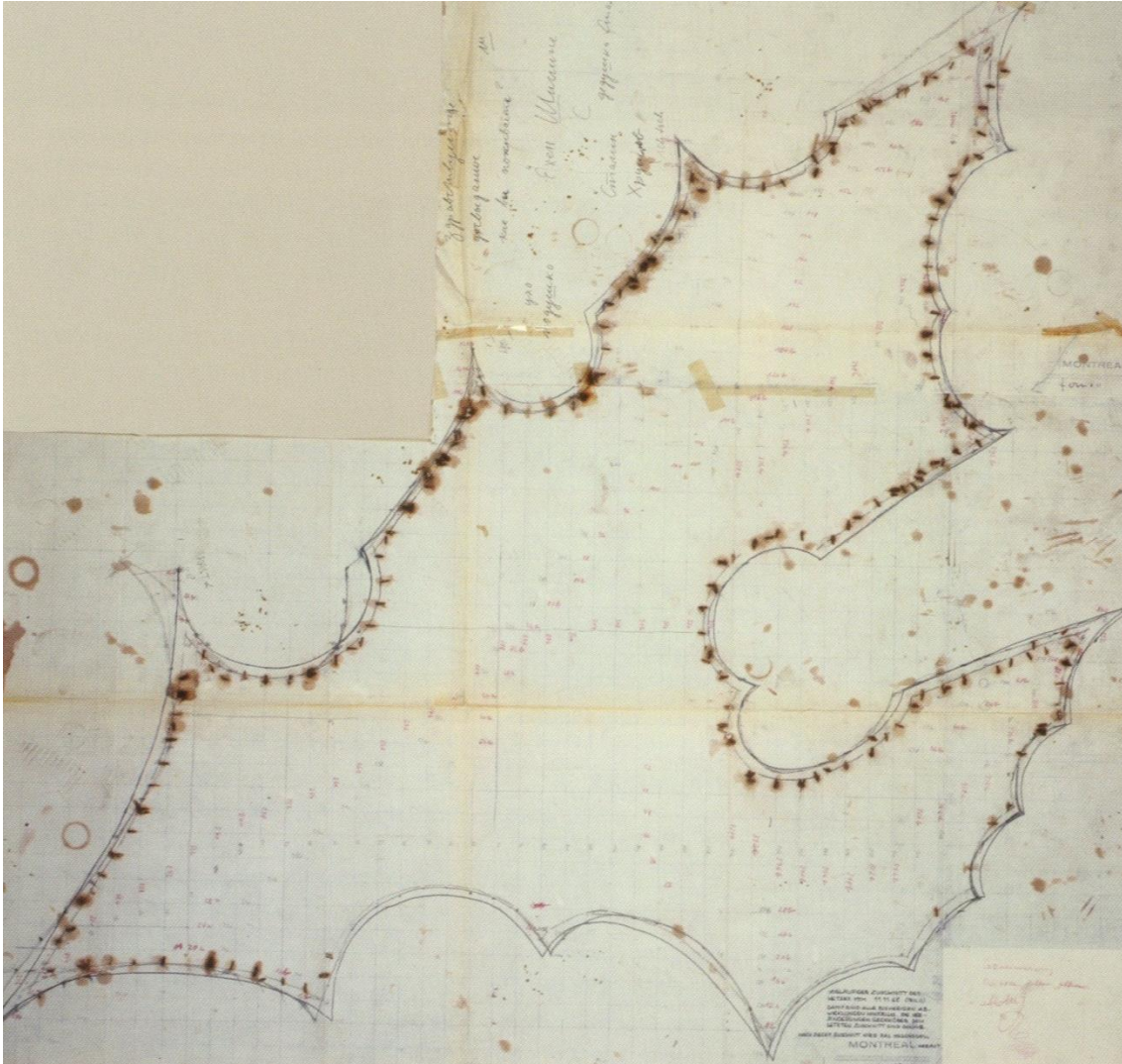


Imagen 61: Planta de cortes en arcos de la cubierta membrana para el modelo de mediciones.

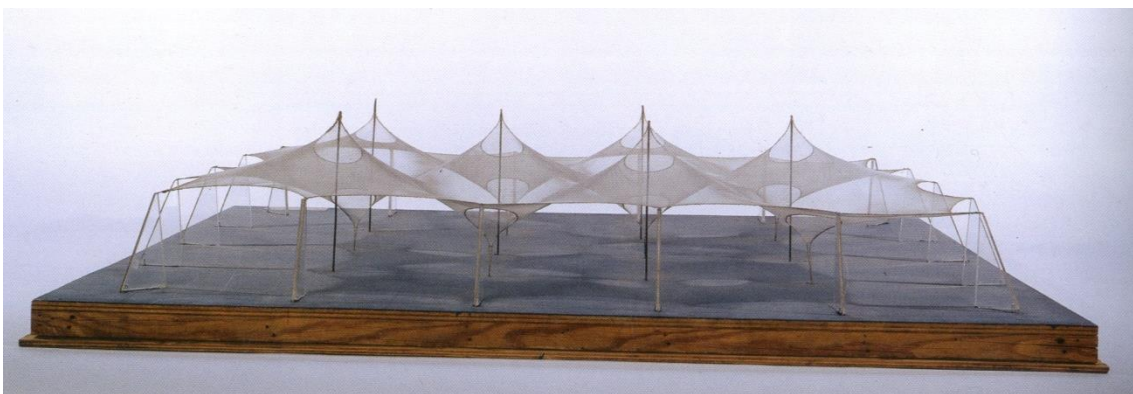


Imagen 62: Modelo regular (posteriormente desechado) del Pabellón

El arquitecto alemán era consciente de que manejar formas generadas por determinados comportamientos podría llevar consigo que el resultado formal no fuera armónico, pero la idea de poder llegar a nuevas formas a través del criterio optimizador que utiliza la naturaleza le empujaba a experimentar en pos de mejorar la arquitectura:

*“La buena arquitectura es más importante que la arquitectura hermosa. La arquitectura hermosa no es necesariamente buena (...) levantamos demasiados edificios derrochando espacio, tierra, materia y energía. Destruimos la naturaleza y la cultura”.*⁷

Esta idea se convirtió en la premisa de muchos de sus proyectos desde entonces: el aviario del zoológico en Munich, también para cubriciones mucho más grandes, para encerrar el estadio de natación en Munich en 1972 en los Juegos Olímpicos de Verano, el estadio olímpico de Munich, etc.

Estas aportaciones, gracias a diez años de investigación en la observación de fenómenos físicos aplicados a la arquitectura, supusieron para Frei Otto la consecución del Premio “*Kunstpreis für Architektur*” de la ciudad de Berlín y del Premio Perret de la UIA de 1967. Éstos fueron los primeros de una interminable lista de galardones que terminó días después de su muerte en 2015 con la consecución del Premio Pritzker.

Para la ejecución de este Pabellón, que contó con una parcela de 10.000m² de los que irían cubiertos 7.730m². Tuvo como promotor al “*Bundesbauabteilung*” el Departamento Federal de Construcción, y compartió autoría con Rolf Gutbrod con el que ganó el concurso, y tuvo como ingenieros auxiliares al equipo Leonhardt & Andrä⁸.

⁷ Ibid pág 97

⁸ El equipo Leonhardt & Andrä fue un prestigioso estudio de ingenieros encabezado por Fritz Leonhardt (1909- 1999), un reconocido ingeniero civil alemán que trabajó en numerosas obras junto a Frei Otto.



Imagen 63: "Modelo de diseño de pequeñas dimensiones" de una película de jabón modificada. IL 1961

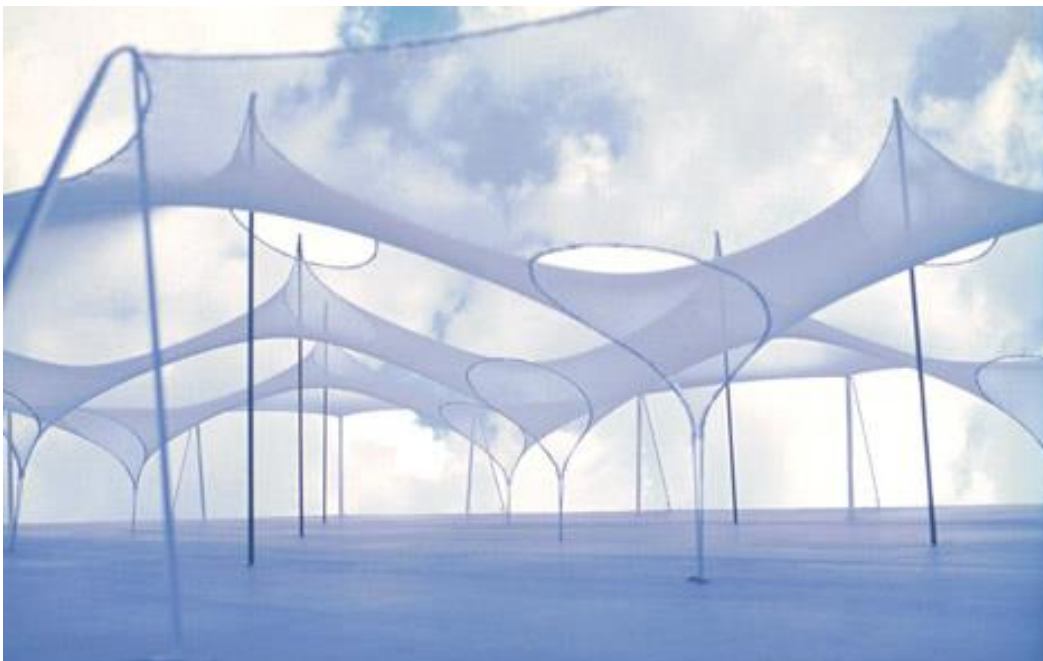


Imagen 64: Otro "modelo de diseño de pequeñas dimensiones" hecho con una malla. En este caso con medidas regulares. IL 1962

Del diseño de jardines se encargó Heinrich Raderschall⁹ y del diseño artístico del contenido de la exposición en el interior del Pabellón estuvieron Kurt Martin¹⁰ y Arnold Bode¹¹. El Pabellón diseñado tendría 36 metros de altura en algunos puntos y sólo pesaría 450 toneladas, con un coste total de 17,5 millones de dólares americanos.

3.3.1. El proyecto en el concurso del Pabellón: el uso de la forma de las pompas de jabón

En la construcción de este espacio, Frei Otto y Rolf Gutbrod se inspiraron en el tema de la Exposición, que trataba sobre la íntima relación e interdependencia entre la humanidad y la tierra.¹²

Para esto, diseñaron una imaginativa secuencia de paisajes hechos por el hombre, mutuamente superpuestos, relacionados entre sí, que armonizaban con la configuración natural de tierra y agua que rodeaban el lugar. Esta macla de artificios respondería a un auxilio universal que el hombre ha encontrado siempre al imitar la naturaleza, en este caso imitando el comportamiento natural de la tensión desde un extremo al opuesto, en varios elementos muy importantes de su interior: la

⁹ Heinrich Raderschall, (1916–2010) fue un arquitecto del paisaje alemán. En la década de 1950 a 1970, trabajó con gran parte del diseño verde de la ciudad de Bonn, la sede de su oficina. Su fama internacional llegó a través de la participación en la Exposición Internacional de Jardines en Hamburgo en 1963 y la Exposición Universal de 1967 en Montreal.

¹⁰ Kurt Martin (1899-1975) fue un historiador del arte alemán. Fue profesor de historia del arte. Su carrera comenzó en 1927 como curador del Museo Estatal de Baden Karlsruhe. De 1934 a 1956, fue director del *Staatlichen Kunsthalle Karlsruhe* (Galería Nacional de Arte de Karlsruhe). En 1940 fue nombrado jefe de los museos municipales de Estrasburgo y comisario jefe de los museos de Alsacia. En 1956 se convirtió en Director de la *Karlsruher Kunstakademie* (Academia de Arte de Karlsruhe) y en 1957 Director General de la *Bayerischen Staatsgemäldesammlungen* (Colección Estatal de Pintura de Baviera). En 1966 pese a estar alejado de su etapa más activa en relación con el mundo del arte, colabora, junto con Arnold Bode en el contenido expositivo del Pabellón alemán.

¹¹ Arnold Bode (1900-1977) es un pintor, arquitecto y diseñador. Trabajó como profesor universitario en Berlín de 1928 a 1933 sin embargo, cuando los nazis llegaron al poder se le prohibió su profesión. Al final de su vida recibió una condecoración alemana llamada Orden del Mérito de la República Federal de Alemania por sus méritos artísticos.

¹² V.V.A.A. *Monografía de análisis de autores: FREI OTTO*. Ed. Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Rosario. Autores: Luisina Biagetti, María Soledad Crosetti, Julián García, Franco López y Jimena Violante. Rosario, Argentina, 2010.

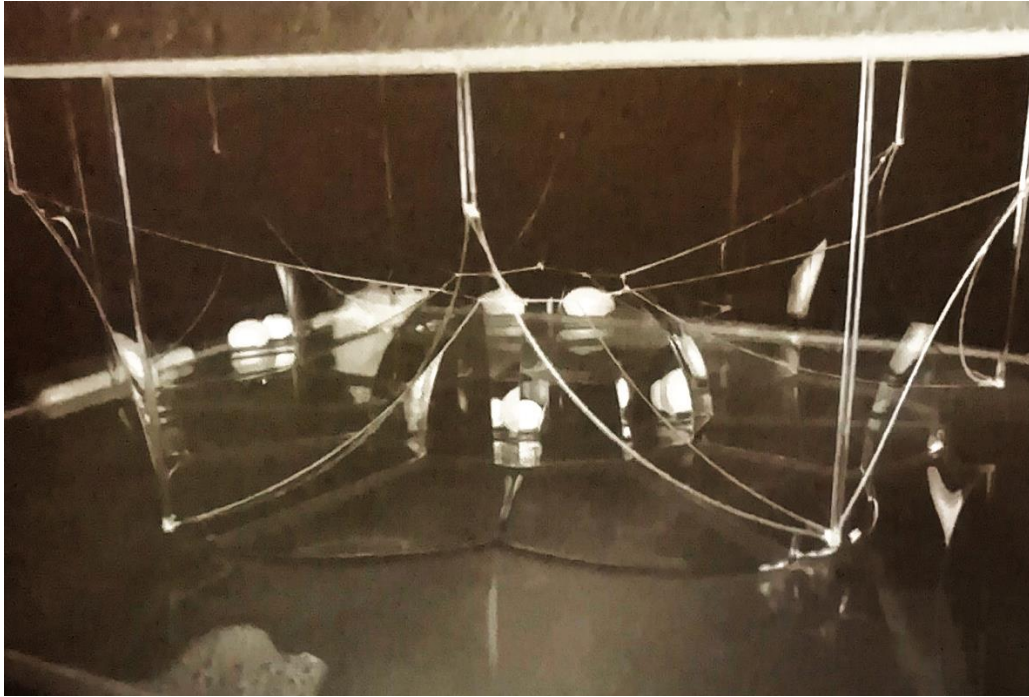


Imagen 65: Pruebas formales con modelos de láminas de jabón.

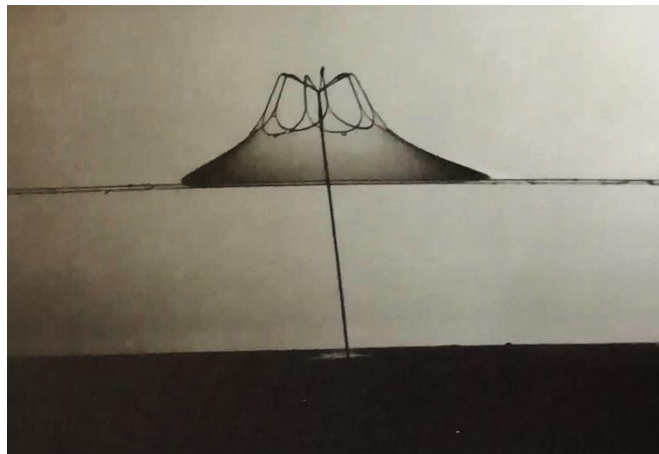


Imagen 66: Pruebas de elementos que permitan dejar pasar la luz con modelos de láminas de jabón.

cubierta traccionada y una cúpula formada por comprimir una celosía de madera como primicia de otro experimento que estaba llevando a cabo.

Dando unidad al proyecto estaría la cubierta. Ésta, translúcida y con un espesor casi imperceptible, liberaría casi completamente la planta ya que los mástiles que la sostendrían en el interior iban a tener muy poca presencia en ella.

La cubierta consistía en una red de cables de acero tensados, que formaban una malla de cuadriláteros de 50 cm de lado, de la cual se suspendía una membrana textil tensada, blanca y translúcida. En su totalidad, colgaba de ocho puntos altos sostenidos con mástiles, que la separaban del suelo desde tres puntos bajos que daban una forma de embudo a la membrana y a la malla de acero.

La membrana presentaba espacios transparentes para permitir el mayor paso de iluminación natural. Estos corresponden con las partes de la maqueta en los que se “pincha” la película de jabón con una aguja que tiene un hilo en forma de huso (ver imágenes 63 y 64), ubicados tal forma que se pudiera aprovechar al máximo.

La red de cables que formaba la malla se unía a un cordón perimetral, que era sujetado mediante uniones de acero a los cimientos de hormigón.

Con una idea inicial de estas características se planteaba otro proyecto adicional; el interior. En él, sin coacción de ningún género por parte de la cubierta excepto por determinadas zonas donde la cota era más baja y en aquellas zonas donde la membrana exterior dejaba pasar más la luz, se dispusieron recorridos distintos en dos alturas. Estos recorridos estaban formados sobre el suelo y sobre unos forjados prefabricados metálicos de muy rápido montaje. También se encontraba en el interior del Pabellón un reciente fruto de la investigación de Frei Otto, a modo de embrión dentro del Pabellón, una cúpula hecha por una celosía trabajando a compresión que había estado probando con sus alumnos en Essen y Berkeley¹³ anteriormente y que daría paso a grandes futuros proyectos como la Multihalle de Mannheim en 1975, pabellón que desarrollaremos más adelante como otro de los casos de estudio.

El espacio creado bajo la cubierta era de alrededor de 8000m² de superficie libre. Ese hecho producía la ventaja de la escasa presencia de elementos estructurales debido al poco espacio

¹³ Ver capítulo sobre el Multihalle de Mannheim, también de Frei Otto.

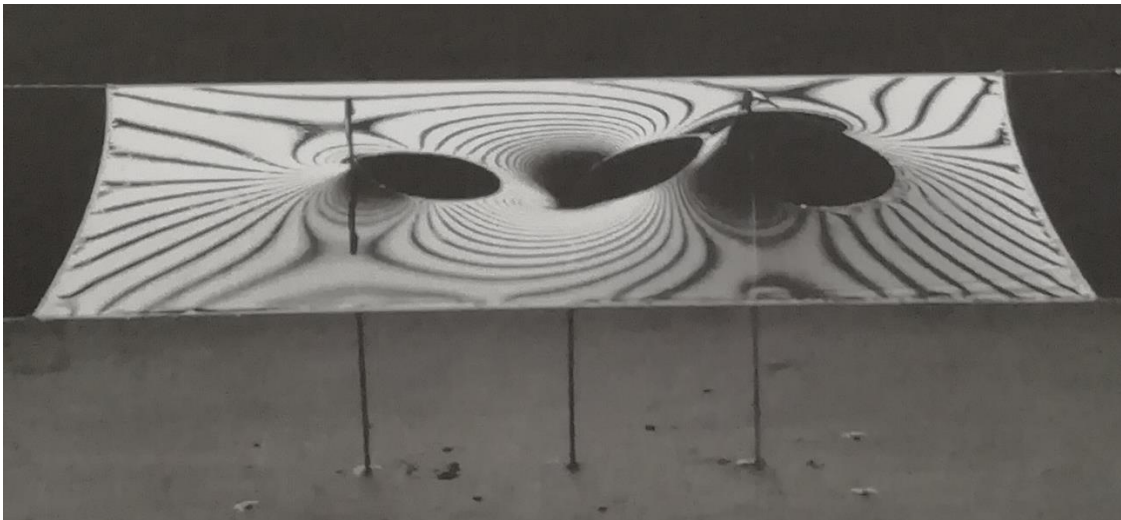
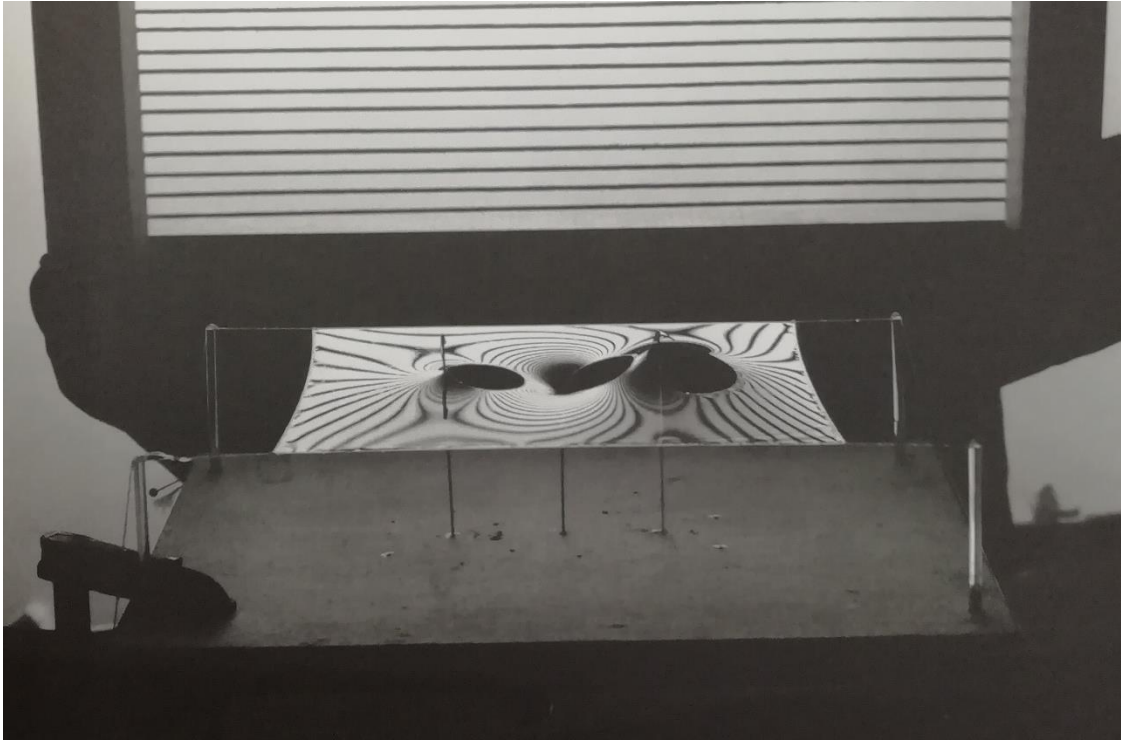


Imagen 67: Modelo construido con jabón reflejado líneas horizontales de luz con el fin de obtener, de una manera gráfica, la curvatura de la superficie.

ocupado por mástiles y sujeciones de la membrana al suelo. A lo largo de todo el perímetro se colocaron paredes de vidrio, deflectoras del viento, de 2,25m de altura. Estas no conformaban un cerramiento completo, ya que se dejó una parte superior abierta entre la membrana y estas paredes, para ventilación natural en verano, y que en invierno era cubierta para impedir que el frío pasara.

Pese a ser un modelo a seguir por el atrevimiento estructural y un avance sin precedentes en la construcción de un espacio fluido, también recibió algunas críticas, sobre todo en la manera en que el contenido de la exposición fue mostrado:

“[El Pabellón alemán] albergaba una colección multiforme de objetos y productos nada despreciables, pero diluidos completamente dentro de una estructura que no sólo no se plegaba a la presentación de dichos objetos, sino que prácticamente los eliminaba y desconectaba con su presencia”

“[Debido a que] sus caracteres distributivos fueron eliminados por completo, [el contenido de la exposición] ha sido completamente supeditado a la potencia del contenedor”¹⁴

Esta crítica al diseño del Pabellón pone de nuevo en pie la importancia en la arquitectura del contenido frente al contenedor, dilema omnipresente en la profesión sobre todo en el final del siglo XX y comienzos del XXI en el que este estudio no va a entrar. No obstante, sí es de destacar en la cita anterior la presencia y potencia de la cubierta sobre lo cubierto, y pone así en alza la capacidad expresiva de este tipo de arquitectura.

3.3.2. El porqué de estas formas: las películas de jabón y el “Problema de Plateau”

¿Son realmente las superficies de las películas de jabón la mínima superficie capaz de unir un contorno prefijado cerrado? ¿De dónde viene este razonamiento con tantas ventajas para la optimización de la construcción y en la que Frei Otto dedicó gran parte de su investigación?

¹⁴ AMEZQUETA, A. *Los pabellones de Estados Unidos y Alemania Occidental en la Expo'67* Revista Arquitectura nº109, Madrid, 1968, Págs. 16-20.

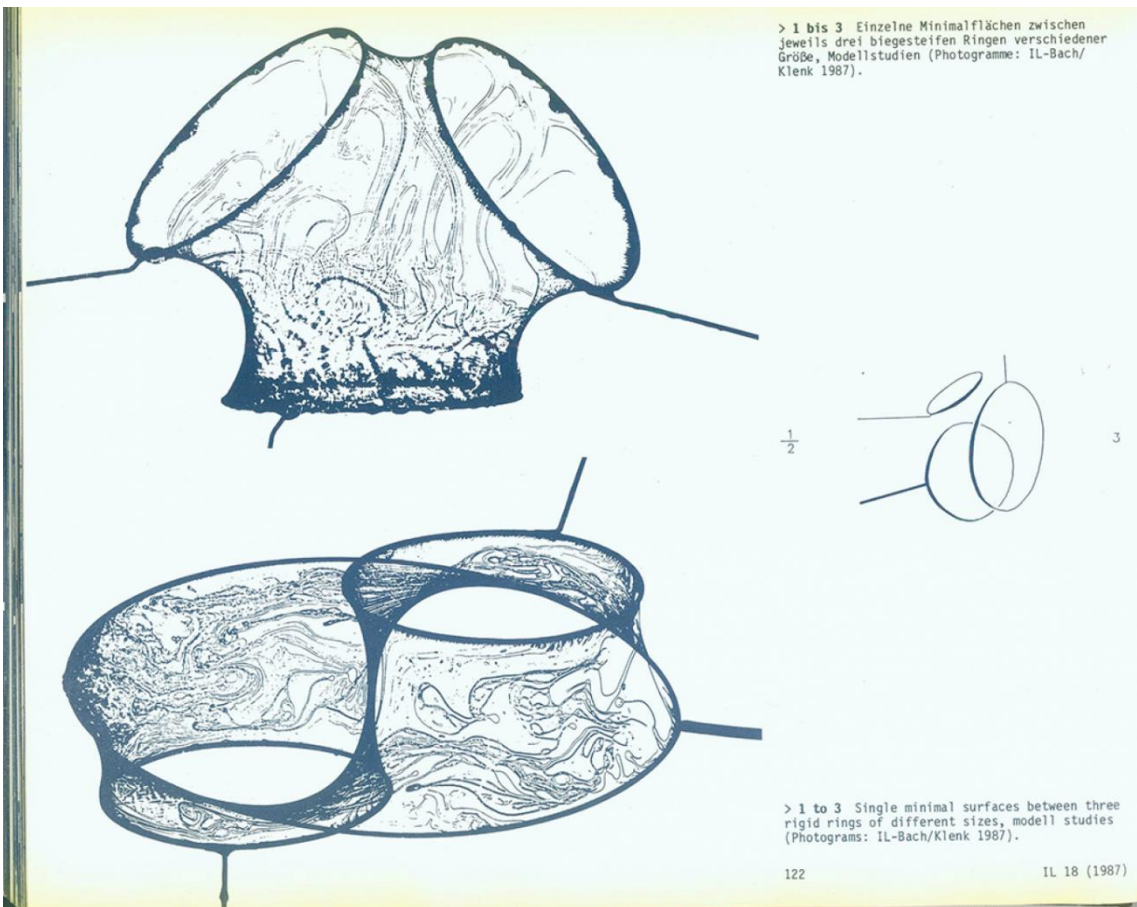
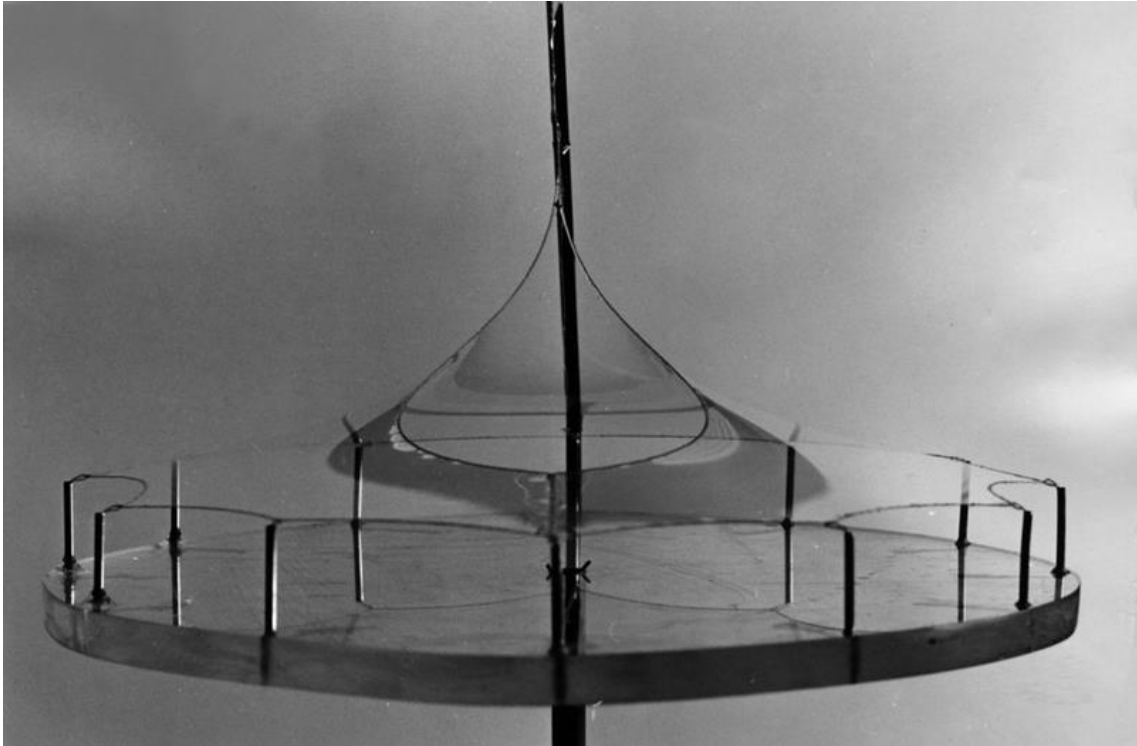


Imagen 68: Modelo en jabón para membrana con apertura

El estudio de las superficies minimales comienza con L. Lagrange¹⁵, quien en su memoria “*Essai d'une nouvelle méthode pour déterminer les maxima et minima des formules intégrales indéfinies*” (1762) desarrolló un algoritmo para el cálculo de variaciones que dio lugar a lo que hoy conocemos como ecuación diferencial de Euler-Lagrange. Este trabajo trató entre otros el problema de encontrar una superficie con contorno prefijado y área mínima, y como consecuencia estableció la ecuación que satisfacen los grafos minimales $f(x,y)$:

$$(1+f_y^2)f_{xx} - 2f_x f_y f_{xy} + (1+f_x^2)f_{yy} = 0 \quad \text{Ec.1}$$

Esta es una función casilineal elíptica de segundo orden. Lagrange también estudió este problema para variaciones de volumen constante. Son lo que hoy se conoce como “superficies de curvatura media $H=\text{constante}$ ” ($H=0$ en el caso minimal).¹⁶

Pero fue Euler¹⁷ el que buscó soluciones concretas no triviales de la ecuación y lo logró al rotar la curva “catenaria”, para así obtener una superficie minimal que llamó “alysseide” (Plateau le llamó posteriormente “catenoide”¹⁸, nombre que conserva hasta nuestros días)¹⁹.

¹⁵ Joseph-Louis Lagrange, (1736 - 1813), fue un físico, matemático y astrónomo italiano naturalizado francés, que aportó avances trascendentales en múltiples ramas de las matemáticas, desarrolló la mecánica Lagrangiana y fue el autor de novedosos trabajos de astronomía.

¹⁶ LAGRANGE, J. L. *Essai d'une nouvelle méthode pour déterminer les maxima et minima des formules intégrales indéfinies*, Miscellanea Taurinensia (1762); Oeuvres de Lagrange. Vol. 1, Gauthiers-Villars, Paris, 1867. Págs..173-95.

¹⁷ Leonhard Paul Euler (1707 – 1783) fue un matemático, físico y filósofo suizo. Se trata del principal matemático del siglo XVIII y uno de los más grandes y prolíficos de todos los tiempos, muy conocido por el número de Euler (e), número que aparece en muchas fórmulas de cálculo y física.

¹⁸ Catenoide es la superficie que se obtiene por la rotación de una catenaria alrededor de un eje coplanar, perpendicular al eje de simetría y que no la corte. El catenoide da origen a una superficie mínima, razón por la que adopta una película de jabón sometida a tensión superficial.

¹⁹ EULER, L. *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudeates sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti. Opera omnia* Fussli, Turici, 1952. Traducido al inglés parcialmente en D. J. Struik. “*A source book in mathematics*”, Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., Cambridge, 1969. Págs. 399-406.



Imagen 69: Modelo construido con tela para reflejar líneas de luz horizontales con el objetivo de representar las curvas de nivel de tan compleja superficie.

J. B. M. C. Meusnier²⁰ fue el que descubrió que la Ec.1 expresaba el hecho de que se anulase una cantidad geométrica asociada a la forma en que se curvaba la superficie en el espacio, cantidad que llamó a sugerencia de Sophie Germain²¹ “curvatura media H”. Por eso se ha llamado históricamente “superficies minimales” a aquellas que tienen curvatura media cero, sin tener en cuenta que en la mayoría de los casos no representan un mínimo para el área.

Pero el verdadero avance de las superficies minimales fue en la segunda mitad del siglo XIX, concretamente en 1842-1843, cuando E. Catalan²² probó que el helicoides es la única superficie minimal reglada²³. Y por esas fechas se probó también el problema que ahora nos planteamos: J. Plateau²⁴ observó que ciertas superficies minimales, la que producen mínimos para el área con frontera compacta prescrita, se pueden realizar físicamente siguiendo la forma que adoptan las películas de jabón que se apoyan en un contorno de alambre fijo, motivando lo que hoy se conoce como el *problema de Plateau*, es decir, la formulación matemática de la existencia o no de superficies que minimizan el área, o más generalmente superficies minimales con frontera

²⁰ Jean Baptiste Marie Charles Meusnier de la Place (1754 - 1793) fue un matemático francés, ingeniero y general revolucionario. Es mejor conocido por el teorema de Meusnier sobre la curvatura de las superficies, que formuló mientras estaba en la École Royale du Génie (Real Escuela de Ingeniería). Él también descubrió el helicoides.

²¹ Marie-Sophie Germain (1776 - 1831) fue una matemática francesa que hizo importantes contribuciones a la teoría de números y a la teoría de la elasticidad.

²² Eugène Charles Catalan (1814 - 1894) fue un matemático francés y belga que trabajó en la teoría de números. Trabajó en fracciones continuas, geometría descriptiva, teoría de números y combinatoria. Dio su nombre a una superficie única (superficie periódica mínima en el espacio R^3) que descubrió en 1855. Anteriormente había enunciado la famosa conjetura de Catalan, que fue publicada en 1844 y probada finalmente en 2002 por el matemático rumano Preda Mihăilescu. Introdujo los números de Catalan para resolver un problema combinatorio.

²³ Dato muy importante para la arquitectura por la facilidad constructiva de las superficies regladas, generadas por rectas conforman una superficie curva.

²⁴ Joseph-Antoine Ferdinand Plateau (1801 – 1883) fue un físico belga que definió en 1829 el principio de la persistencia de la visión. En 1832 inventó el fenaquistiscopio, uno de los precursores del cinematógrafo. Llevó a cabo investigaciones sobre la capilaridad entre láminas delgadas líquidas y en 1861 demostró que las superficies resultantes son mínimas. La generalización de estos resultados la enunció mediante las leyes de Plateau. El problema en matemática de obtener la superficie que contiene a una curva cerrada dada en el espacio, tal que el área abarcada por la curva sea mínima, es conocido como “*Problema de Plateau*” en su honor.



Imagen 70: Exterior del Pabellón



Imagen 71: Entrada en el recinto

prefijada. Ésta quedó completada en 1865 con la aportación de H. A. Schwarz²⁵, que obtuvo métodos para resolver el *Problema de Plateau* con borde un cuadrilátero prefijado.

En 1930, el matemático húngaro Tibor Radó²⁶ publicó una solución al problema de Plateau. En las décadas siguientes Jesse Douglas²⁷ resolvió varios otros problemas de la Teoría de superficies minimales²⁸. Su trabajo fue reconocido en 1936 con la Medalla Fields, la más alta distinción en Matemáticas.

Este estado de la cuestión es el que encuentra Frei Otto cuando se decide a aplicar a sus membranas la solución del problema de Plateau, para dar soluciones naturales de optimización de material. Lo consigue analizando cómo actúa la tensión superficial de las películas de jabón. En primer lugar discretiza la superficie de que quiere cubrir con la membrana, es decir, “divide” la superficie por sus líneas principales y luego “traduce” en cables traccionados esas líneas materializando así este tipo de superficies²⁹.

²⁵ Hermann Schwarz (1843–1921) fue un matemático alemán (aunque inició sus estudios como químico) conocido por su trabajo en análisis complejo. Desde 1875 trabajó en el Göttingen University, tratando los temas de teoría de funciones, geometría diferencial y cálculo de variaciones. Su trabajo de “búsqueda de una superficie mínima” lo acabó en la Academia de Berlín en 1867 pero no fue impreso hasta 1871, y reimpresso en su “colección de artículos matemáticos” (1890).

²⁶ Tibor Radó (1895 - 1965) fue un matemático húngaro que se mudó a los Estados Unidos después de la Primera Guerra Mundial. En la Segunda Guerra Mundial fue asesor científico del gobierno de los Estados Unidos, interrumpiendo su carrera académica. Se convirtió en presidente del Departamento de Matemáticas de la Universidad Estatal de Ohio en 1948. En la década de 1920, demostró que las superficies tienen una triangulación esencialmente única. En 1933, Radó publicó "Sobre el problema de la meseta" en la que dio una solución al *problema de Plateau*, y en 1935, "Funciones subarmónicas". Su trabajo se centró en la informática en la última década de su vida y en mayo de 1962 publicó uno de sus resultados más famosos en el Bell System Technical Journal

²⁷ Jesse Douglas (1897-1965) fue un matemático estadounidense. Nació en Nueva York y asistió a la Universidad de Columbia entre 1920 y 1924. Fue uno de los ganadores de la primera entrega de la Medalla Fields, otorgada en 1936. Se le premió por la resolución del problema de Plateau en 1930, que versa sobre si existe una superficie minimal acotada para una curva de Jordan. El problema, irresoluto desde 1769, cuando Lagrange lo planteó, forma parte del cálculo de variaciones. Douglas también contribuyó significativamente al problema inverso del cálculo de variaciones. En 1943 la Sociedad Estadounidense de Matemáticas le otorgó el Premio Bôcher.

²⁸ RADÓ, T. *The problema of the least área and the problema of Plateau*. Math Z. N°32. Ohio, 1930. Págs. 763-796.

²⁹ Ver video “FREI OTTO - MODELING WITH SOAP FILMS”: <http://www.freiottofilm.com/>



Imagen 72: Interior del Pabellón



Imagen 73: Interiores diáfanos y muy iluminados

3.3.3. Descripción del Pabellón

Si hay un adjetivo que define bien al Pabellón es el de liviano. Sobre todo por lo que se ha descrito con anterioridad del comportamiento y las formas naturales de las pompas de jabón. Su punto más peculiar es sustituir la solidez de la cubierta por la “fluidez” de una red de cables tensados. Pero también hay otro aspecto que hace destacar al Pabellón frente a las construcciones de su época: la adaptabilidad conseguida gracias a una sencillez tecnológica notable, que además aporta al proyecto una manifestación estética del funcionamiento de la estructura.

El diseño arquitectónico, a cargo de Frei Otto y Rulf Gutford, contó con el cálculo de los ingenieros Leonhart y Adrä, con el diseño de la exposición artística de Kurt Martin y Arnold Bode y con el diseño del jardín de Heinrich Raderschall. El promotor fue el Departamento Federal de Construcción del gobierno de la entonces Alemania Occidental.

El Pabellón está claramente compuesto de 4 elementos: mástiles, celosía de cables, membrana plástica translúcida y plataformas, además de todos los elementos de borde que mantuvieron al Pabellón en continua tensión.

La parcela, de 10.000 m², fue ocupada por la membrana del Pabellón de tejido de poliéster recubierto de PVC de 9.500m² que cubría 7.730m² de suelo y llegó a pesar únicamente 450 toneladas. El punto más alto alcanzado ascendía a 36m sobre el plano del suelo por el mástil principal. El resto de mástiles, fueron 8 en total de acero ST37, midieron entre 4 y 36m y en su punto más alto contenían una interrupción de la membrana translúcida para dejar paso a una pequeña apertura que dejaba pasar la luz con membranas transparentes. Frente a estos puntos elevados estaban las depresiones, es decir, tres embudos hasta el suelo que enriquecieron el paisaje interior.

La cubierta consistió en una estructura tensada mixta, combinación de cables y textiles, con una forma generada por la tensión producida entre los mástiles y los puntos de anclaje. De ahí el logro de Frei Otto al desarrollar, con sus estructuras livianas, una síntesis entre la transmisión de las cargas y la forma arquitectónica, generando una nueva tipología estructural.

El resultado final es una cubierta de red pretensada de cables de acero con picos y depresiones, de la que cuelga una membrana de poliéster translúcido. Y las plataformas interiores, formadas por la estructura espacial de perfiles de acero en doble T con perfil longitudinal triangular, conforman dos planos de suelo en el interior de Pabellón.



Imágenes 74: Operarios trabajando en la construcción del Pabellón. Una construcción atípica.



Imagen 75: Plegado de la celosía de madera

A lo largo de todo el perímetro se colocaron paredes de vidrio, deflectoras del viento, de 2,25m de altura, que no conformaban un cerramiento completo, ya que se dejó una parte superior abierta entre la membrana y estas paredes, para ventilación natural en verano, y que en invierno era cubierta para impedir el paso del frío.

3.3.4. Proceso de montaje y construcción en un tiempo récord:

Las obras empezaron a finales de 1965 y terminaron en abril 1967, por lo que fue una gran responsabilidad para el equipo de trabajo desarrollar la forma, estudiar y elegir los detalles estructurales, fabricar las partes de la estructura y del interior en Alemania, trasladar todo en barco hasta Canadá y erigir la construcción en el sitio previsto.

La prefabricación total de la red de cables, los mástiles y la membrana hicieron posible que el Pabellón fuera construido en el corto tiempo de 8 semanas, agregándole a este período, 5 semanas necesarias para conseguir, gradualmente, el estado final de tensión de la red de cables y la membrana.³⁰

En el proceso de construcción³¹, primero se colocaron los mástiles en posición y se estabilizaron con cables guías auxiliares. La red de cables fue montada alrededor de los mástiles y levantada a los puntos más altos de estos, mientras las secciones de la red más alejadas se iban agregando. Una vez completada la malla de acero, fue sujeta a los puntos exteriores y a los puntos bajos interiores. La tensión inicial se logró levantando los mástiles a su altura definitiva. La tensión definitiva fue lograda tensionando el cable perimetral. La membrana textil fue montada en partes

³⁰ V.V.A.A. *Monografía de análisis de autores: FREI OTTO*. Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Rosario. Autores: Luisina Biagetti, María Soledad Crosetti, Julián García, Franco López y Jimena Violante. Rosario, Argentina, 2010.

³¹ Video del proceso de montaje: <http://www.freiottofilm.com/> y <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/763574/video-pabellon-aleman-expo-1967-frei-otto-premio-pritzker-2015>



Imagen 76: Cúpula celosía del interior del Pabellón.



Imagen 77: Doble cúpula del interior del Pabellón construida con celosía trabajando a compresión.

en el suelo, incluyendo las partes transparentes de la misma, y fue sujeta en puntos reforzados a la malla de cables de acero.³²

3.3.5. Un “catálogo” de las aportaciones de Frei Otto para representar el avance de la tecnología alemana.

Y ¿por qué Frei Otto? ¿por qué sus estructuras ligeras para representar a Alemania? Desde el principio en 1951 (con 26 años, un año antes de finalizar sus estudios de arquitectura) con el primer proyecto de cubierta colgante para la sala de conciertos junto al Litzensee en Berlín³³, había conseguido cautivar al pueblo alemán con sus estructuras y membranas tensadas, pero faltaba dar el salto internacional, todavía hacía falta ver si se atrevería a llevar a cabo semejante proyecto, todavía experimental, sin hacer pruebas.

Las obras más significativas de Frei Otto hasta el momento eran la Exposición de Jardines Federales de la BUGA³⁴ y el Bandstand de Kassel en 1955, la iglesia de San Lucas de Bremen en 1963, y muchos estudios de estructuras temporales que hicieron de su sistema de estructuras de membranas tensadas un gran reclamo en el que los organizadores de la exposición por parte de Alemania vieron una oportunidad inmejorable de representar a su país.

En el Pabellón había dos sistemas de estructuras ideados por Frei Otto. Era consciente de que era la ocasión en la que poder poner en práctica las dos líneas de investigación que tenía en marcha: las estructuras de membranas que funcionaban a tracción, la cubierta del Pabellón, y una muy reciente “beta” nueva; las celosías curvadas a compresión, que desarrollaría en proyectos posteriores (ver capítulo sobre el Multihalle de Mannheim).

³² V.V.A.A. *Monografía de análisis de autores: FREI OTTO*. Ed. Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Rosario. Autores: Luisina Biagetti, María Soledad Crosetti, Julián García, Franco López y Jimena Violante. Rosario, Argentina, 2010.

³³ ROLAND, C. *Frei Otto: estructuras: estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. Ed. Gustavo Gili, D.L. Barcelona, 1973.

³⁴ La Bundesgartenschau (abrv. BUGA) es la exhibición hortícola bienal Federal de Alemania. También cubre temas como el ajardinamiento. Tiene lugar en diversas ciudades, cambiando la localización en un ciclo de dos años.



Imagen 78: Instituto de Estructuras ligeras de Stuttgart

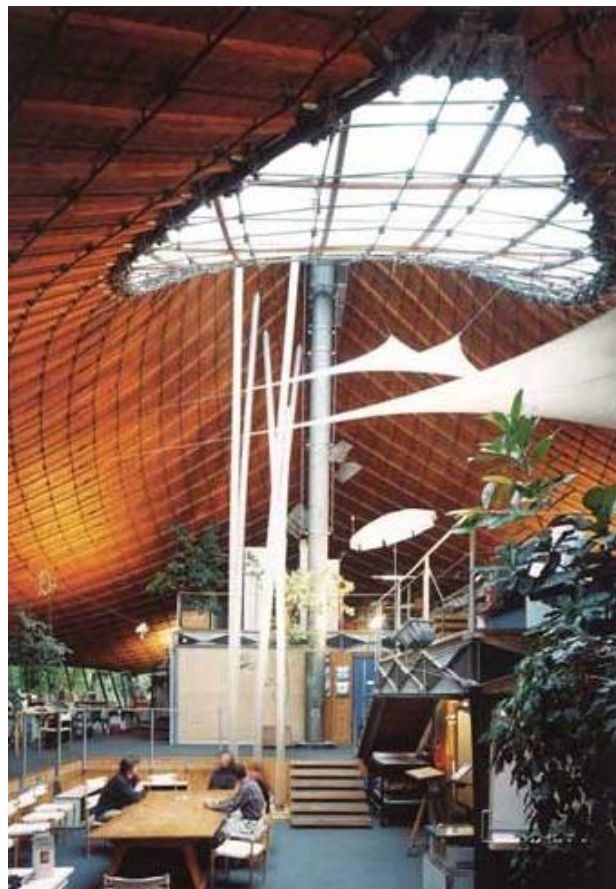


Imagen 79: Interior del Instituto

3.3.6. Al terminar la Expo

Tras el cierre de la expo, se intentaron conservar varios pabellones, pero lógicamente el número de visitantes decreció y con él también decrecieron los ingresos para mantener estas instalaciones. Hasta que, en 1975, el área de la Isla de Notre Dame fue reconstruida y acondicionada para acoger los Juegos Olímpicos de Montreal 1976.

Aunque el Pabellón alemán iba a permanecer en su sitio, porque había sido un punto importante en la planificación, se planteó la posibilidad de desarmarlo y reconstruirlo en otro lugar. La ciudad de Montreal adquirió el Pabellón, que alojó posteriores muestras y eventos. En noviembre de 1972, se decidió una demolición sin relocalización de la estructura, ya que el lugar iba a ser utilizado para construcciones deportivas de las Olimpiadas.

A mediados de mayo del año 1972, se suspendió el mantenimiento del edificio, lo que produjo que durante la temporada de nevadas se acumulara una carga dos o tres veces mayor a la permisible, y la estructura se viera comprometida. Como consecuencia, algunos cables que llegaban a un mástil se dañaron, provocando que la red y el mismo poste colapsaran. La reparación de la red fue solucionada rápidamente mediante la colocación de uniones en los cables cortados. Afortunadamente, el área dañada fue pequeña y la estructura pudo permanecer entera, a pesar del nuevo estado de equilibrio.³⁵

La membrana no sufrió daños, pero el poco interés por mantener el edificio llevó a que fuese demolido en marzo del año siguiente 1973.³⁶

3.4. Antecedentes y precedentes del Pabellón: Trabajo con modelos físicos

Es necesario analizar de dónde procede todo este esfuerzo en investigación. El Pabellón alemán de la Expo'67 fue la culminación de más de una década de investigación intensiva sobre formas y estructuras hechas con membranas livianas que cubrían grandes espacios; redes, y mallas. Además, este Pabellón marcó un avance hacia una nueva forma de construir, que ya es adoptada

³⁵ V.V.A.A. *Monografía de análisis de autores: FREI OTTO*. Ed. Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Rosario. Autores: Luisina Biagetti, María Soledad Crosetti, Julián García, Franco López y Jimena Violante. Rosario, Argentina, 2010. Págs 19-25.

³⁶ *Ibid.* Págs 19-25.



Imagen 80: Exterior del Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart, que sirvió como modelo 1:1 de comprobación para la elaboración del Pabellón Alemán de la Expo'67



Imagen 81: Frei Otto con alumnos y colaboradores en el Interior del Instituto en 1969.

y tenida en cuenta por todos los proyectistas y constructores gracias al trabajo con modelos físicos estructurales.

3.4.1. Un modelo a escala 1:1 con vida propia: el edificio del Instituto de estructuras ligeras en Stuttgart.

En su inicio el Instituto de estructuras ligeras en Stuttgart (IL) se construyó a mediados de 1966 como estructura de ensayo para el Pabellón alemán de la Expo de Montreal 67, y lo pudo llevar a cabo gracias al apoyo de Berthold Burkhardt, Friedemann Kugel, Gernot Minke y Bodo Rasch. También con los ingenieros Fritz Leonhardt y Harald Egger³⁷.

Utilizando este modelo a escala real, Frei Otto podía desarrollar y comprobar los métodos de instalación de la cubierta y otros muchos detalles. La estructura ensayada cubría 460 metros cuadrados, un 6 % del tamaño del Pabellón de Montreal. Dos redes simétricas conformando superficies alabeadas, con forma de silla a montar, cuelgan a cada lado de un mástil de 17 m de altura y de 42 cm de grosor. Entre las redes hay un gran ojo cubierto por una tercera red. Las dos redes principales están limitadas por cables y sujetadas con pernos de anclaje por 12 caballetes tubulares de acero con la altura de un hombre.

En 1967, cuando la construcción ya había servido como modelo de ensayo, Frei Otto la transformó en el edificio del Instituto de Estructuras Ligeras. Para acomodarla al nuevo uso fue aislada y cubierta en el interior con paneles de madera. El ojo se mantiene transparente con paneles de acrílico transparente, permitiendo el uso de la energía solar. Las paredes exteriores son de vidrio.

La estructura del tipo tienda contiene elementos del sistema de terraza que se desarrolló para la Expo así como sillas y otros muebles de la serie que se fabricó para la misma a partir de los diseños de Frei Otto. Esta estructura experimental recibió grandes elogios en los años 1970 como edificio de investigación. En los años 1990 fue renovado por Bodo Rasch, un antiguo miembro del IL. A diferencia de muchos de los edificios efímeros de Frei Otto, esta “tienda” todavía existe y permite a los visitantes experimentar la atmósfera de un edificio con una gran cubierta de malla.

³⁷ Todos ellos miembros colaboradores del Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart durante la segunda mitad de la década de los 60 y principios de los 70.

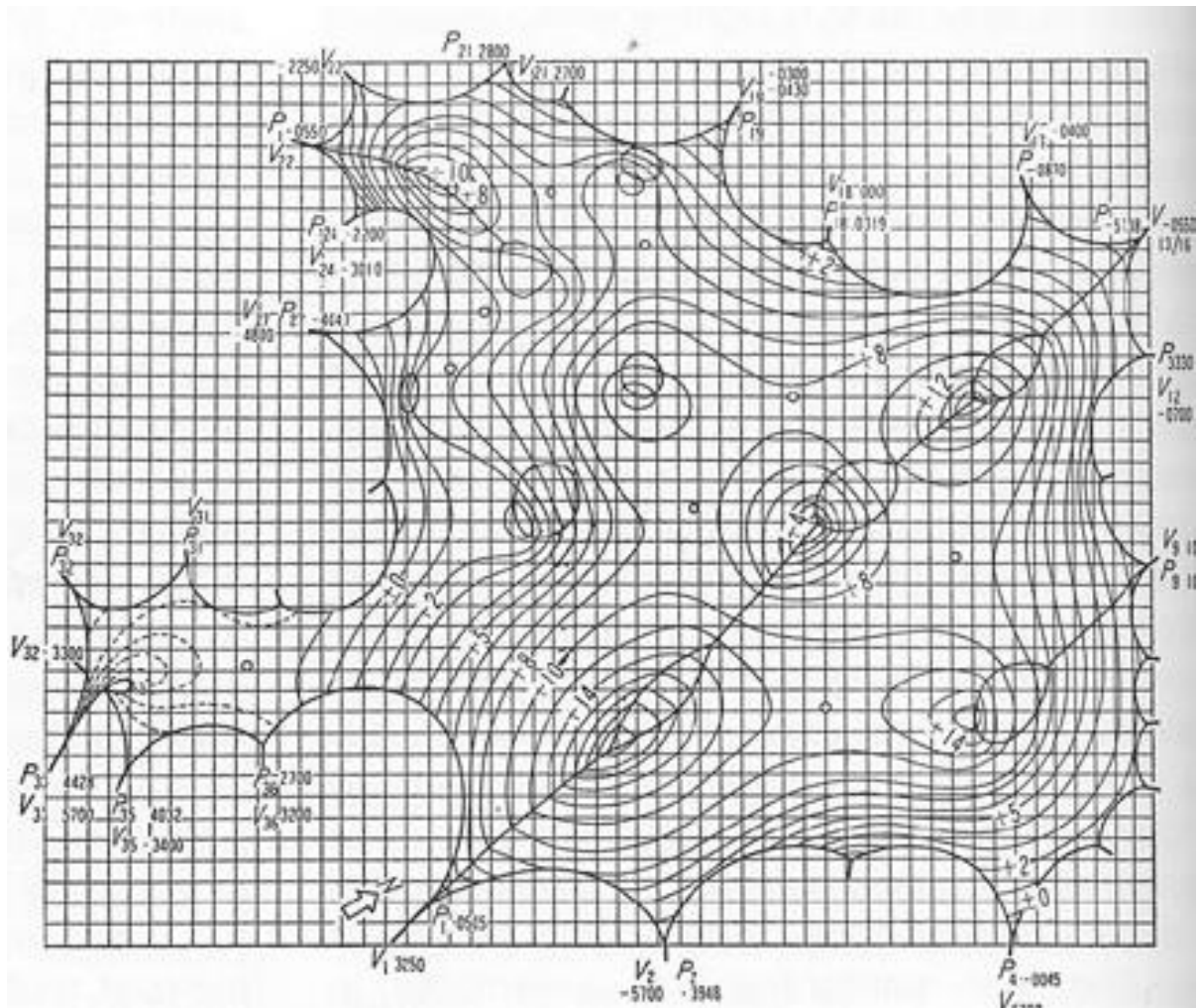


Imagen 82: Kalin, "Expo 67 Building Materials, Systems and Techniques," Dept. of Industry and Trade and Commerce, 1969. Germany floor plan graciously provided by Bruno Paul Stenson, MA.

Actualmente, Werner Sobek, el sucesor de Frei Otto al frente del instituto IL (conocido hoy como *ILEK: Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren*, Instituto de Diseño Liviano e Ingeniería), da clases sobre métodos para construcciones ligeras y es un lugar de referencia a nivel mundial en el ámbito de las estructuras ligeras.

3.4.2. Optimización como principio generador de forma.

"Llevar a cabo una tarea con un uso mínimo de materiales es, finalmente, el único problema interesante" Bernard Lafaille.³⁸

"La estética en ingeniería y en arquitectura, son dos cosas que marchan juntas y se siguen la una a la otra: una está ahora en su apogeo, y la otra en un lamentable estado de retroceso. El ingeniero, inspirado en la ley de la economía, se rige por el cálculo matemático, se pone de acuerdo con la ley universal; logra la armonía."³⁹ Le Corbusier

"Esto [La Optimización] establece que los objetos tienden hacia un tipo que está determinado por la evolución de las formas entre el ideal de la máxima utilidad y la satisfacción de los necesidades de una fabricación económica, que inevitablemente ha de adaptarse a las leyes de la naturaleza".⁴⁰ Le Corbusier

Las teorías de Le Corbusier proporcionan una conexión genuina con las técnicas de formahallazgo (form-finding) de Frei Otto que, de hecho, utilizan la acción de la "ley natural universal". Y es que uno de los recursos más utilizados por el arquitecto alemán en sus proyectos fue sacar de la naturaleza de los materiales (de su manera de ser) la forma de sus proyectos.

³⁸ DREW, P. *Frei Otto. Form and structure*. Ed. HarperCollins Distribution Services; Edición: 1ª ed. (1976) Del capítulo "Form Finding".

³⁹ JEANNERET, CH-E (Le Corbusier). *Towards a New Architecture*. Ed. Martino Fine Books (2014). Londres, 1927, Pág. 7.

⁴⁰ BANHAM, R. *Theory and Design in the first machine age*. MIT Press Ltd; Edición: 2 (1980). Londres, 1960, Pág. 211.



Minimal Surface Study

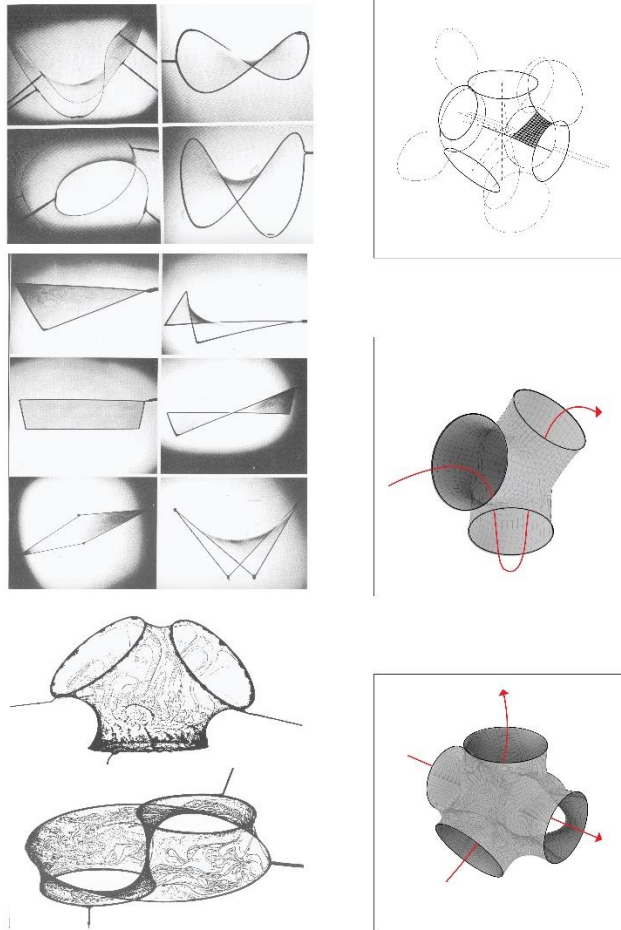


Imagen 83: Experimentos relacionando forma y rendimiento del material con Superficies minimales generadas por pompas de jabón.

Frei Otto no tenía una idea preconcebida de la forma de sus proyectos, aunque sí que la intuía. Se limitaba a establecer cuáles iban a ser los puntos de la superficie del proyecto tenían que tener más altura, cuáles debían ser los más bajos y cuál sería su contorno. El resto; la forma de sus cubiertas, se las daría el propio material utilizado al estar sometido a una determinada fuerza: la gravedad, la tracción, la compresión, ...

La solución de las formas constructivas de un proyecto es distinta según se trabaje con modelos o con los métodos tradicionales de diseño, en cuyo caso la evolución del mismo está condicionada por una idea preconcebida de la forma.⁴¹

Sabía bien del comportamiento de los materiales que utilizaba, buscaba un material que pudiera “funcionar” correctamente a tracción, los cables de acero, que resistirían bien las cargas con muy poco material. El problema fue la manera de encontrar otro material ligero que se adaptara bien a la red de cables formalmente, que debería poder encargarse de evacuar el agua, la nieve, no dejar pasar el viento, que soportara bien los efectos de succión contrarios a la dirección de la gravedad... de eso se encargaron las membranas.

De las diferentes soluciones estructurales y materiales del proyecto, nos habla el Frei Otto en estas palabras:

La mejor solución estructural de un proyecto debe aparecer casi espontáneamente en las primeras fases del desarrollo del mismo, cuando todavía se trabaja sin coacciones de ningún tipo, y esta solución surgirá cuando la estructura modelada responda con mayor exactitud a las sollicitaciones que presente el proyecto. En este proceso proyectual, Frei Otto se considera únicamente como un ayudante. La forma constructiva es, pues, el resultado lógico y natural de este proceso, con lo que gana en amplitud y lógica, características éstas que nos asombran en las carpas, en las construcciones neumáticas y en las mallas espaciales.⁴²

⁴¹ “ROLAND, C. *Frei Otto: estructuras: estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. Ed. Gustavo Gili, D.L. Barcelona, 1973. Ensayos con modelos. Págs. 1 y 2.

⁴² Ibid. Pág 2.



Imagen 84: Frei Otto con sus alumnos en el exterior del Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart 1969.



Imagen 85: Comprobaciones en el propio modelo con sus alumnos y colaboradores

En conclusión, el estudio de Frei Otto trabaja con la respuesta de la naturaleza a las solicitaciones, hace que los materiales utilizados adopten la forma de menor gasto y esa forma es la que utiliza porque tiene una belleza orgánica predecible hasta cierto punto. Su trabajo consiste en traducir esos comportamientos naturales en respuestas constructivas duraderas para hacer habitables los espacios generados por estas cubiertas.

3.4.3. Método de trabajo teniendo el modelo como hipótesis.

El trabajo de Frei Otto se describe mejor como de arquitectura experimental, no sólo porque trata de encontrar respuestas a los nuevos problemas, sino también porque adopta las rutinas y procedimientos del experimentador. En multitud de formas estructurales que inventa, en que usa las disciplinas de la ciencia, se ve obligado a depender de criterios estéticos. A este respecto, el trabajo de Frei Otto pretende cerrar la brecha entre la ciencia y el arte.

En muchos casos pretende “enormecer” los fenómenos físicos que ocurren en modelos pequeños naturales y se encuentra con muchos problemas, fundamentalmente de índole técnica pero también encuentra problemas formales que impiden la habitabilidad de ciertos espacios.

El arquitecto alemán habla detenidamente sobre su trabajo con maquetas en una entrevista concedida a Juan María Songel⁴³ en 2004. A continuación, haremos frecuente mención de las preguntas hechas en esa entrevista, con un marcado interés por las ventajas de su investigación con modelos físicos, y las respuestas, todas ellas impregnadas de la seguridad que aporta la experiencia de más de 50 años de investigación con modelos físicos estructurales.

En la pregunta 1 recogida en el Anexo 1 de esta tesis, Songel pone encima de la mesa al arquitecto alemán la controvertida cuestión de la frecuente imposibilidad de tomar a la maqueta como herramienta de cálculo por el diferente funcionamiento de los materiales a diferentes escalas. La respuesta de Frei Otto al respecto ilumina bien el camino a seguir si se quiere trabajar con ellas.

⁴³ Juan María Songel es profesor titular del Dpto. de Composición Arquitectónica de la ETS Arquitectura de Valencia. En 2008 publicó un libro llamado “Frei Otto. Conversaciones con Juan María Songel”. Este libro recoge una conversación que el arquitecto y profesor mantuvo con Frei Otto en su taller-estudio de Warmbronn en 2004, junto a un elocuente texto, ‘Fundamentos de una arquitectura del mañana’, publicado en 1997.



Imágenes 86: Tomando medidas sobre las maquetas en el IL de Sttutgrat.

Este trabajo de investigación, saltando continuamente de maquetas para averiguar formas a maquetas para conocer acerca del comportamiento interno, le lleva a hallar las geometrías que mejor conjugan forma, gasto y resistencia, las que denomina las más interesantes; las optimizadas.

A la pregunta 2, continuando con el tema de la escala, pero esta vez más concretamente descendiendo a la aplicación en dos de sus más conocidas obras, el Estadio Olímpico de Múnich y el Pabellón de Alemania en la Expo'67, Otto responde que hizo un tratamiento similar en los dos casos porque las luces eran parecidas, aunque un proyecto fue mucho más grande que el otro. Lo único que cambió es la soltura adquirida por la experiencia en el proyecto anterior, que le permitió ir un paso más allá en los acabados.

Lo que verdaderamente fue un avance en el proyecto del Estadio de Múnich respecto al Pabellón de Alemania en el trabajo con modelos como instrumentos de cálculo fue saber cómo era el comportamiento estructural en cada punto (lo que destaca el riesgo asumido en Montreal):

En el caso de Múnich medimos los esfuerzos reales en cada cable; probablemente se trate de la primera edificación en la que realmente supimos lo que ocurría en su interior. También conocíamos los peligros que podrían derivarse de las sobrecargas y lo que ocurría en la estructura cuando la sobrecargamos.⁴⁴

Bien sabía Frei Otto que su trabajo con modelos no se basaba únicamente en cambios de escala, eso sería una "traducción literal" de lo que ocurre en el modelo a lo que ocurre en la realidad y ese ejercicio sólo se puede hacer con algunos elementos de ninguna o una dimensión como por ejemplo articulaciones, cables... Los elementos de 2 y 3 dimensiones han de pasar un minucioso examen antes de saltar a otra escala.

El hecho de construir una maqueta y que ésta sea material implica considerar en una primera y somera aproximación ciertos aspectos que vinculan de algún modo forma y materia. Cualquier proyecto, por su geometría, implica unas limitaciones materiales relacionadas con la resistencia de estos. Aunque desde Galileo es bien sabido que la escala influye en el comportamiento

⁴⁴ Ibid.

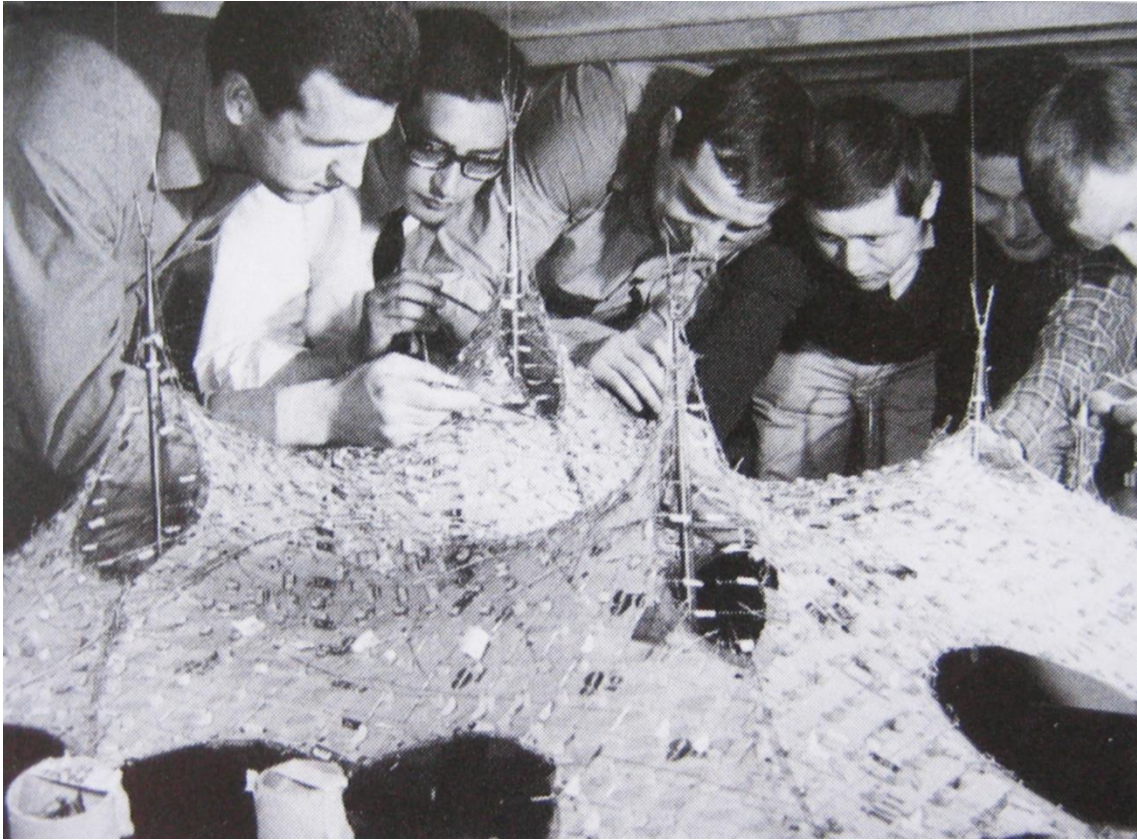


Imagen 87: Instrumento creado en el IL para la representación de superficies complejas a través de fotografía ortogonal.

estructural⁴⁵ –por el hecho de que la resistencia depende de la sección mientras el peso, y con él las solicitaciones, del volumen- incluso en la miniatura de la maqueta ciertos aspectos estructurales están presentes. Del mismo modo, igual que en la arquitectura construida no todos los materiales son adecuados dependiendo de la geometría del proyecto, también en la maqueta se verifica este hecho.

La ley cuadrado-cubo de Galileo afirma que cuando un objeto se somete a un aumento proporcional en tamaño, su nuevo volumen es proporcional al cubo del multiplicador y su nueva superficie es proporcional al cuadrado del multiplicador. Por eso la multitud de problemas que se presenta al intentar traducir de una escala que podríamos llamar de miniatura a la escala real, mucho más grande.

Estas maquetas no son conceptuales, son medios para domesticar la forma generada por determinados comportamientos estructurales que han de ser traducibles a escalas muy superiores que con las que se trabaja. En el texto que se incluye en la pregunta 3 se vuelve a incidir en la cuestión de la escala, pero esta vez refiriéndose a las maquetas generadoras de forma. El alemán responde a esta pregunta con casos concretos de materiales que sí que funcionan a cualquier escala y sí se pueden tomar como instrumentos fiables de cálculo y materiales que no funcionan a cualquier escala.

Para Frei Otto trabajar con modelos supone la comprobación necesaria para comprobar sus ideas. Donde maduran las ideas formales al “entrar en carga”. La necesidad de construir una maqueta para el cálculo es absolutamente necesaria para el arquitecto alemán, aunque expresa la necesidad de su uso, también entiende necesario su comprobación física. Los cálculos hacen más fácil esa última comprobación y hacen más comprensible sus resultados.

⁴⁵ La ley cuadrático-cúbica es un principio matemático-geométrico, aplicado en varios campos científicos y técnicos, que describe la relación entre volumen y área de un cuerpo a medida que aumenta o disminuye su forma o figura. Fue descrita por primera vez en 1638 por Galileo Galilei en su libro *Dos nuevas ciencias: Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a due nuove scienze*.

En términos generales este principio establece que, cuando una forma crece en tamaño, su volumen crece más rápido que su superficie. Cuando se aplica al mundo real, este principio tiene muchas implicaciones que son importantes en campos que van desde la ingeniería mecánica a la biomecánica. Esto ayuda a explicar gran variedad de fenómenos, por ejemplo, el por qué a grandes mamíferos como los elefantes les cuesta más enfriarse, que a los más pequeños, como los ratones, y por qué hay límites fundamentales para el tamaño de los castillos de arena.

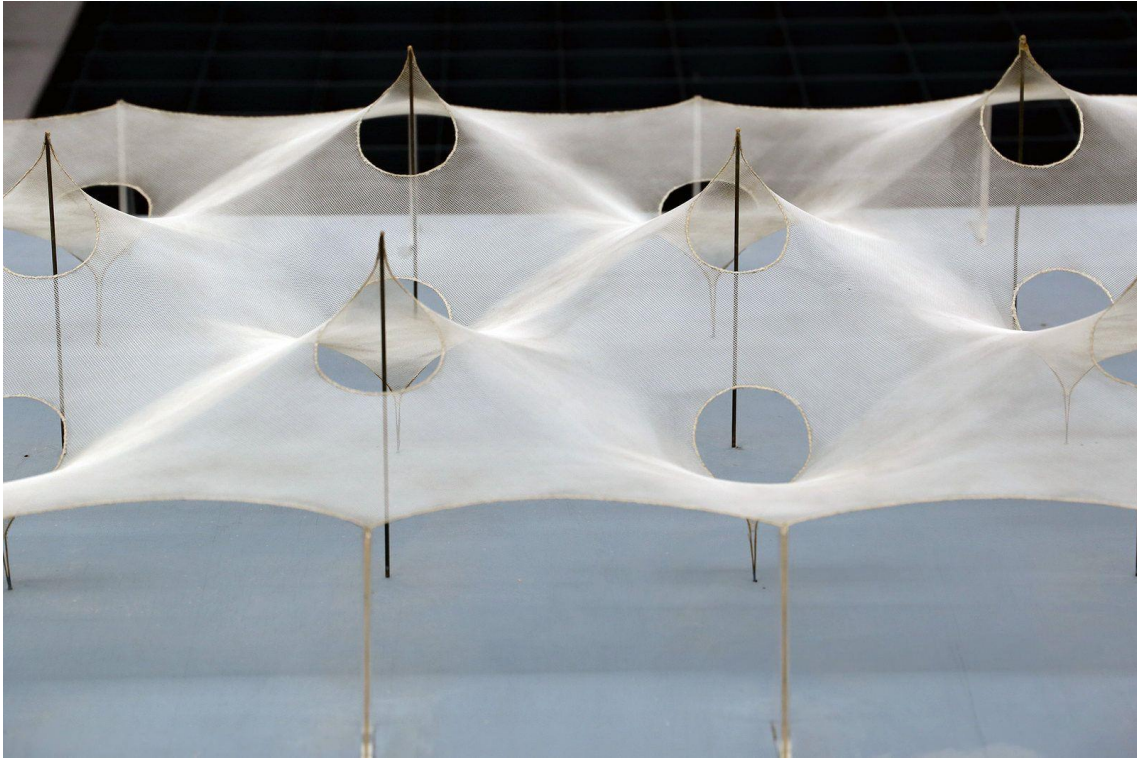


Imagen 88: Distintos trabajos con las maquetas en el IL

3.4.4. Metodología en los ensayos con modelos.

Desde muy temprana edad empieza a comprobar sus ideas, según cuenta JM Songel era frecuente que contara su experiencia en el taller de su padre, cuando empapaba un paño de yeso y lo colgaba para, una vez endurecido, poder invertirlo. Fue allí cuando intentó por primera vez construir estas formas invertidas.

Aunque empieza de una manera autodidacta con los experimentos y comprobaciones de sus ideas al manipular los materiales bajo distintas sollicitaciones no es el primero en hacer un estudio sistemático con ellos; ya en la Bauhaus una de las investigaciones más frecuentes estaba en la información que de los materiales se podía sacar para futuros proyectos. En la entrevista que JM Songel hace en 2004 a Frei Otto le pregunta por la relación que podría tener el trabajo llevado a cabo en la Bauhaus con el suyo en Stuttgart en la pregunta 4 del Anexo 1. La respuesta de Frei Otto fue que su trabajo con modelos físicos no estuvo influenciado por el trabajo de la Bauhaus ni con otros grandes referentes como Gaudí en las maquetas para generar forma a través del comportamiento estructural.

Por otra parte, en la pregunta 5 que queda también recogida en el Anexo 1 de la presente tesis, Songel pregunta a Otto por la relación de este tipo de investigación en maquetas con la docencia, al poder ser estas maquetas utilizadas como herramientas didácticas. A esta pregunta el arquitecto alemán contesta que las ventajas de la construcción de la maqueta permiten una mayor comprensión del comportamiento de la estructura que si sólo siguiéramos un modelo de cálculo virtual o abstracto-matemático. Cita varios ejemplos de la antigüedad en la que se logró construir edificaciones complejas y hoy a veces siguen sin saberse utilizar correctamente por haber abandonado el uso de maquetas de cálculo para el diseño de los edificios.

A priori, por aquella época, sin contar con el desarrollo tecnológico con el contamos ahora, era imposible desarrollar y estudiar con exactitud un proyecto que presenta complicadas formas espaciales alabeadas solo con la forma tradicional de representación gráfica. Sólo los modelos garantizaban una representación exacta de las formas alabeadas y permitían a Frei Otto una visión clara de la forma y el espacio.⁴⁶ Por ello el cálculo matemático y formal fue posible gracias a métodos aproximados.

⁴⁶ ROLAND, C. *Frei Otto: Estructuras*. Editorial Gustavo Gili, S.L.; Edición: 1 (1 de septiembre de 1973) Pág 15. Ensayos con modelos (págs. 1 y 2)

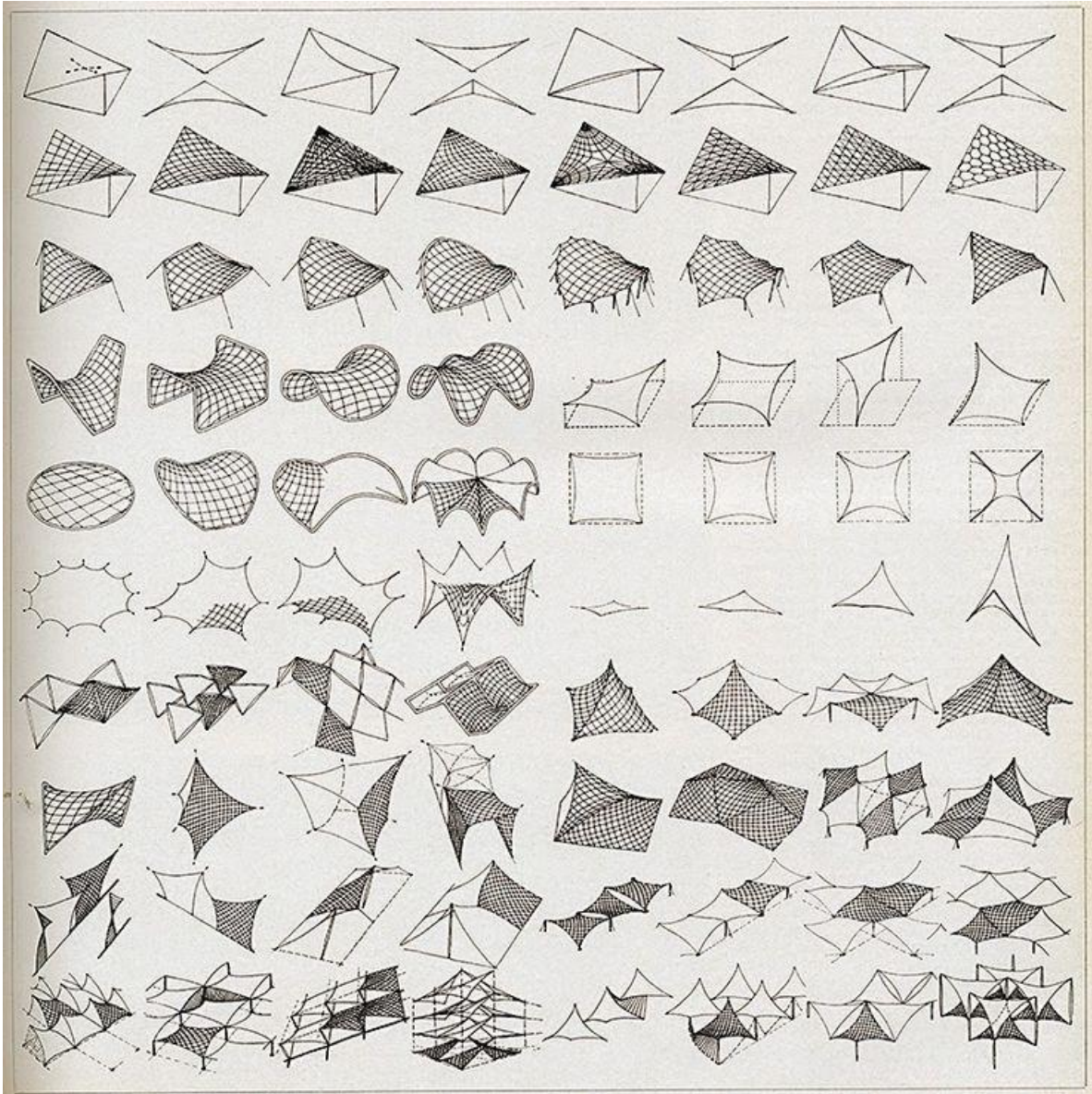


Imagen 89: intentos sistematizadores de formas para combinarlas entre ellas

La forma de trabajar de Frei Otto con maquetas seguía siempre el mismo orden que él mismo se impuso:

En primer lugar, trabajaba el **“modelo de diseño de pequeñas dimensiones”**: membranas elásticas o telas finas que le aportaban información sobre ese diseño sin una idea preconcebida de la forma. Esa forma natural generada únicamente tras establecer unas condiciones “innegociables” de perímetro; altura, superficie, etc. Esas maquetas, las más famosas son las que generaba a base de finas películas de jabón, eran todavía insuficientes para poderlas traducir a la realidad, pero sí que le daban una información muy valiosa acerca de la forma.

Por ello, después de realizar el modelo de pequeñas dimensiones, elaboraba lo que él llamaba el **“modelo de mediciones”**, de dimensiones mayores, hechas con hilos, cables o cadenas para la medición de esfuerzos y también para dimensiones y formas de la estructura. Los elementos utilizados para estas maquetas ya eran más fácilmente “traducibles” en elementos constructivos: cables de acero y lonas que soportarían a la perfección las tracciones deseadas.

Para terminar, construía un **“modelo de mediciones estáticas”** para hacer las pruebas de carga con pesos fácilmente traducibles ante un cambio de escala. Estos modelos eran mucho más ajustados a las medidas reales, proporcionales a los tamaños y a los pesos, con los que empezaba a obtener la información necesaria para saber qué cantidad de material y en forma tenía que utilizarlos. Estos son los modelos que sí traducía literalmente en proporciones dependiendo de qué tipo de material, cuántas dimensiones utilizaba (una, dos o tres).

3.4.5. Intentos sistematizadores

Una de las cosas que llama más la atención de la investigación de Frei Otto es que combina cada experimento con los anteriores en búsqueda de nuevas soluciones que no partan de una idea preconcebida de la forma. Son famosas sus listas de formas tensadas para combinarlas entre ellas.

El porqué de estos intentos deriva de su gran compromiso con la docencia y una honradez muy fuera de lo común con la personal investigación tal y como quedan reflejados en la preguntas y respuestas 6 y 7 del Anexo 1. En este caso Songel pregunta, citando varios casos de arquitectos que también se dedicaron a la docencia, por la importancia que tienen en su investigación sus intentos sistematizadores. La respuesta de Otto es precisamente un cuestión docente, estos

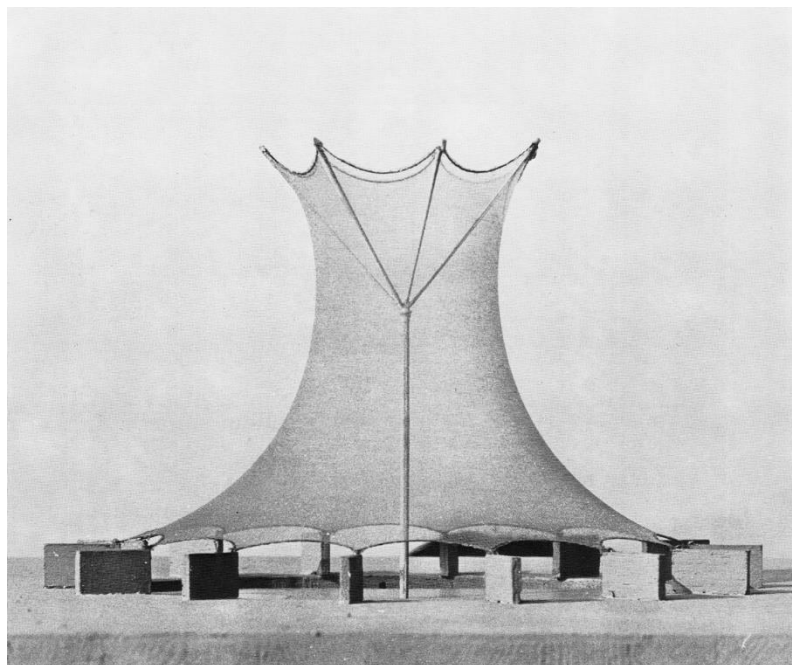


Imagen 90: pruebas de diferentes formas con membranas tensadas.

intentos sistematizadores procedían de una búsqueda de orden formal, de posible clasificación geométrica para poder enseñar de una manera más adecuada.

Este intento de ordenar el estado de la cuestión en cuanto a tipos de estructuras le lleva a hacer croquis de cada una de ellas para poder ordenarlas mejor. Sólo a través de la experimentación con modelos físicos fue capaz de llevar a cabo este nuevo sistema estructural capaz de plasmar las formas orgánicas que el comportamiento tensional de la estructura generaba. El hecho de contar dentro del proceso de diseño y cálculo con lo fortuito o casual de la aportación física y material de la maqueta hace al arquitecto alemán único en esta manera de trabajar y sus proyectos materializados son también muy distintos a los que se había visto hasta entonces.

3.4.6. Modelos físicos y modelos virtuales. La visión y la práctica del autor.

En todo este proceso de trabajo con modelos es imposible no preguntarse si han quedado obsoletas todas esas prácticas con la llegada y el rapidísimo avance de la tecnología. ¿Sigue siendo útil trabajar con modelos? ¿Qué aporta el ordenador, la creación de modelos virtuales, en el proceso de proyecto? ¿Qué aporta el modelo físico?

No nos detendremos mucho en este asunto sobre el que hay mucho escrito⁴⁷, nos ha parecido más interesante recoger qué piensa el autor sobre estas cuestiones aprovechando que ha podido vivir antes y después del gran despliegue de las nuevas tecnologías.

⁴⁷ Principal bibliografía consultada al respecto:

- BENJAMIN, W. *La obra de arte en la época de su reproductibilidad técnica*. Walter Discursos Interrumpidos I, Taurus, Buenos Aires, 1989.
- CARAZO, E. *Maqueta física, modelo virtual*. Actas del 13 Congreso internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica, Valencia. 2010. Págs. 177-183.
- GUTIÉRREZ, P. *El tiempo del modelo (virtual y real) de representación de la arquitectura*. Revista EGE nº9, Edita APEGA, Madrid, 2012.
- PALLASMAA, J. *Los ojos de la piel*. Gustavo Gili. Barcelona, 2006
- CARAZO, OLIVARES y MARCOS. "Fenomenología y percepción en arquitectura. De la escala 1/1 a la miniaturización de los modelos físicos y virtuales" Eduardo Carazo (Universidad de Valladolid,) Joel Olivares (Universidad Gestalt de Diseño de México), Carlos L. Marcos, Jorge Domingo, Ángel Allepuz, Pablo Juan, Justo Oliva, Ramón Maestre, Carlos Martínez, Mercedes Carbonell. (Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía. Escuela Politécnica Superior Universidad de Alicante). CARAZO, E. (2011), "Maqueta o modelo digital. La pervivencia de un sistema". EGA, Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica, Nº 17, 30-41.

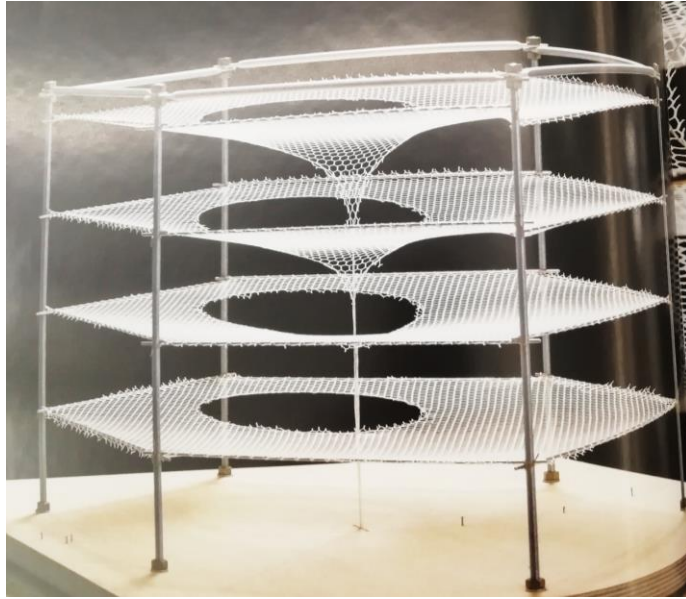


Imagen 91: Modelo de forjados de lona emulando la geometría de las superficies minimales



Imagen 92: Instrumento creado en el IL para obtener las coordenadas de los puntos de una superficie compleja.

Frei Otto es consciente de que muchos avances en el ámbito del trabajo con modelos de los que es autor han enriquecido este ámbito de investigación en la simulación digital.

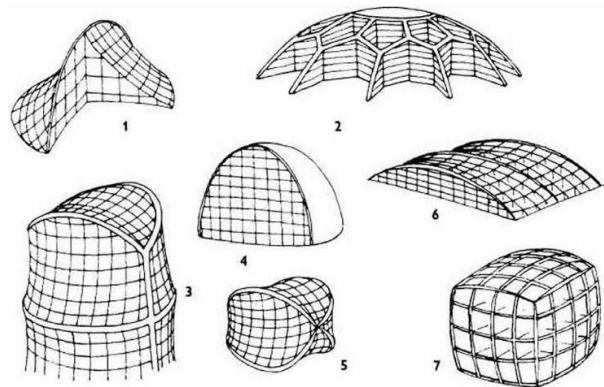
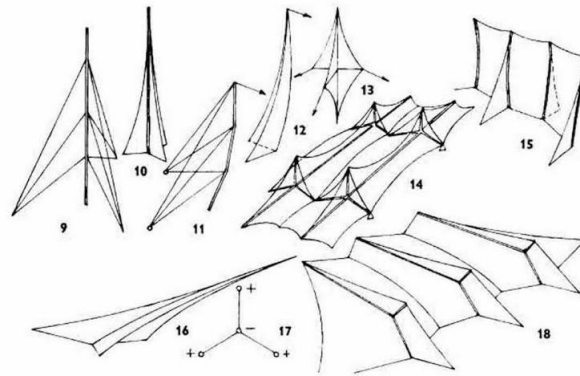
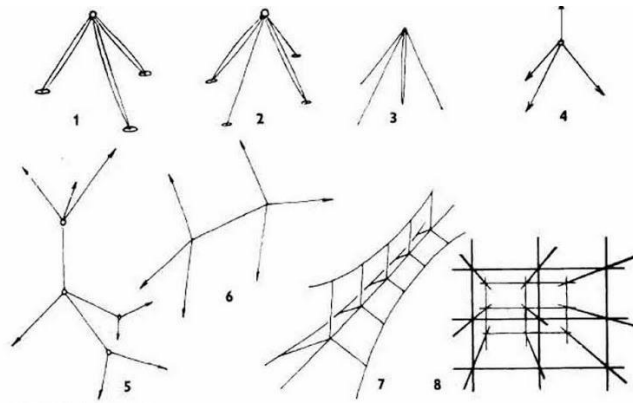
En el caso del ordenador, al ser un soporte inmaterial, salta a la vista la aportación de las siguientes cualidades insustituibles: capacidad de repetición sin esfuerzo, medible, exactitud, de fácil modificación, enlazable con otras aplicaciones... todas ellas derivadas de haber conseguido que la falta de materialidad que permite el modelo digital se haya convertido en una ventaja.

Y en el caso de trabajar con modelos físicos ¿Qué aporta el modelo físico?... Parece evidente remarcar temas que pueden pasar desapercibidos trabajando con ordenadores: en la realidad todo lo material siempre tiene 3 dimensiones, no hay elementos que puedan estar superpuestos en el mismo lugar en el mismo tiempo. También otros elementos clave de la materialidad: la textura, que en el ordenador es sólo apariencia formal, la incidencia y diferentes intensidades de la luz, la capacidad didáctica, diría que mayéutica, del modelo físico y muchas otras consecuencias materiales de los modelos.

Recogiendo palabras textuales del autor en la respuesta a la pregunta 8 del Anexo 1, con la perspectiva vivida del despliegue de los medios técnicos que antes no existían, habla de, los que, desde su punto de vista, son las ventajas e inconvenientes de los medios físicos y los virtuales:

El ordenador sólo puede calcular lo que ya está conceptualmente dentro de él; en los ordenadores sólo encuentras lo que buscas. Sin embargo, con la experimentación libre se puede encontrar lo que no se ha buscado. Me resisto a la mentira que afirma que con el ordenador se ha encontrado todo, pues de él no pueden salir nuevas invenciones, sólo se puede sacar lo que en él ya se ha metido.

En realidad, donde se crea todo es en nuestro cerebro, un ordenador mucho más eficiente, que puede hacer combinaciones mucho mejores, aunque de forma imprecisa e inexacta y muy a menudo torpemente, pero es capaz de hacerlo. Por ello quienes sólo confían en el cálculo por ordenador son los torpes de nuestra profesión.



Imágenes 93: Combinaciones de diferentes formas de tensor la estructura

Debo añadir que desde 1965 todos mis edificios han sido calculados con el ordenador. Esto es algo muy natural que no hace falta poner en duda, pues es una práctica habitual en la actualidad.⁴⁸

Aunque Frei Otto no minusvalora el trabajo con los ordenadores dentro del proceso de diseño, la necesidad de encontrar elementos con los que no contaba en su diseño mental y virtual anterior como los que aporta el trabajo con modelos físicos estructurales, hacen que su trabajo con materiales sea la parte más importante en sus procesos de diseño.

3.5. Epílogo. Aportación de la reconstrucción tridimensional: El artista ha de hacer experimentos

Tal como dice Charles S. Peirce⁴⁹ en su obra, al igual que en la ciencia, en el arte es necesario trabajar sobre una primera “luz” que puede ir modificándose, “corrigiéndose”, a medida que se trabaja sobre ella. Es preciso explicar y “probar” las hipótesis artísticas, que de otro modo se verían reducidas a meras emociones. En arquitectura, esas “hipótesis” son el dibujo y, de una manera distinta añadiéndole características y cualidades físicas, las maquetas⁵⁰.

De una manera especial las maquetas han tenido un importante papel en la obra de Frei Otto. Bajo un principio básico claro en el que la forma es resultado del comportamiento estructural, Frei Otto comienza sus diseños con una idea que sabe que no es la definitiva. Una idea a la que empieza a enriquecer con solicitaciones de carga, cuya forma final no sabe dónde acabará.

El trabajo de Frei Otto se describe mejor como de arquitectura experimental, no sólo porque trata de encontrar respuestas a los nuevos problemas, sino también porque adopta las rutinas y procedimientos del experimentador. En multitud de formas estructurales que inventa, en el que usa las disciplinas de la ciencia, se ve obligado a depender de criterios estéticos. A este respecto,

⁴⁸ SONGEL, JM. *Frei Otto: Conversaciones con Juan María Songel* Ed. Gustavo Gilli, Valencia, 2012.

⁴⁹ Charles Sanders Peirce (1839 - 1914) fue un filósofo, lógico y científico estadounidense. Es considerado el fundador del pragmatismo (escuela filosófica creada en los Estados Unidos a finales del siglo XIX por John Dewey, William James y él mismo. Su concepto de base es que solo es verdadero aquello que funciona, enfocándose así en el mundo real objetivo) y el padre de la semiótica moderna (disciplina que estudia el signo en tanto entidad que participa del fenómeno de semiosis).

⁵⁰ BARRENA, S. *La belleza en Charles S. Pierce: Origen y alcance de sus ideas estéticas*. Ediciones Universidad de Navarra. Pamplona, 2015.

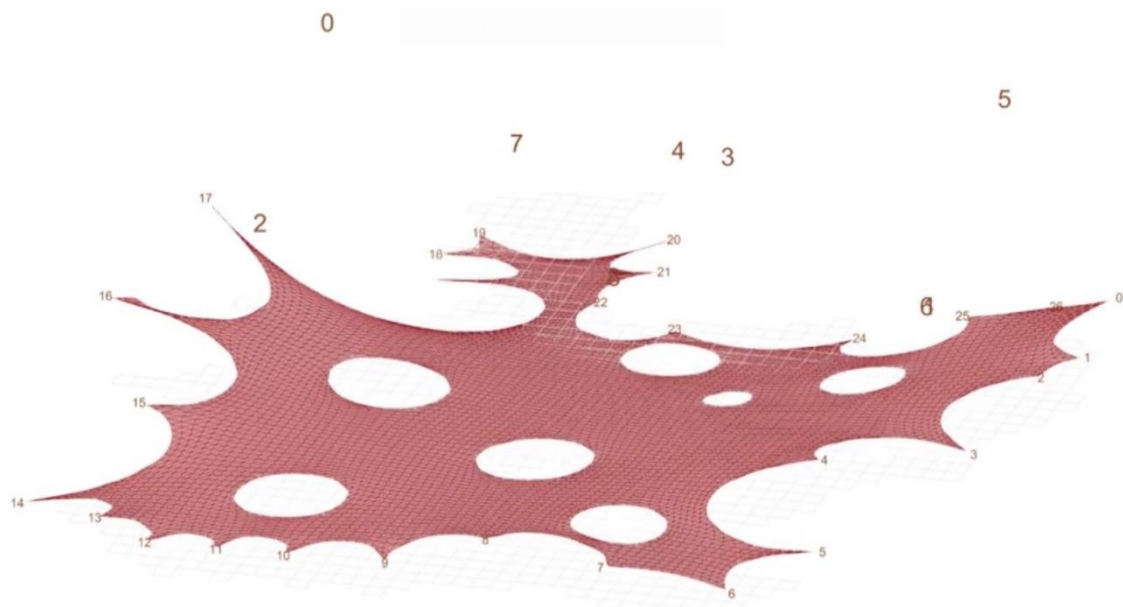


Imagen 94: Proyección horizontal de la membrana del Pabellón Alemán de la membrana del Pabellón.

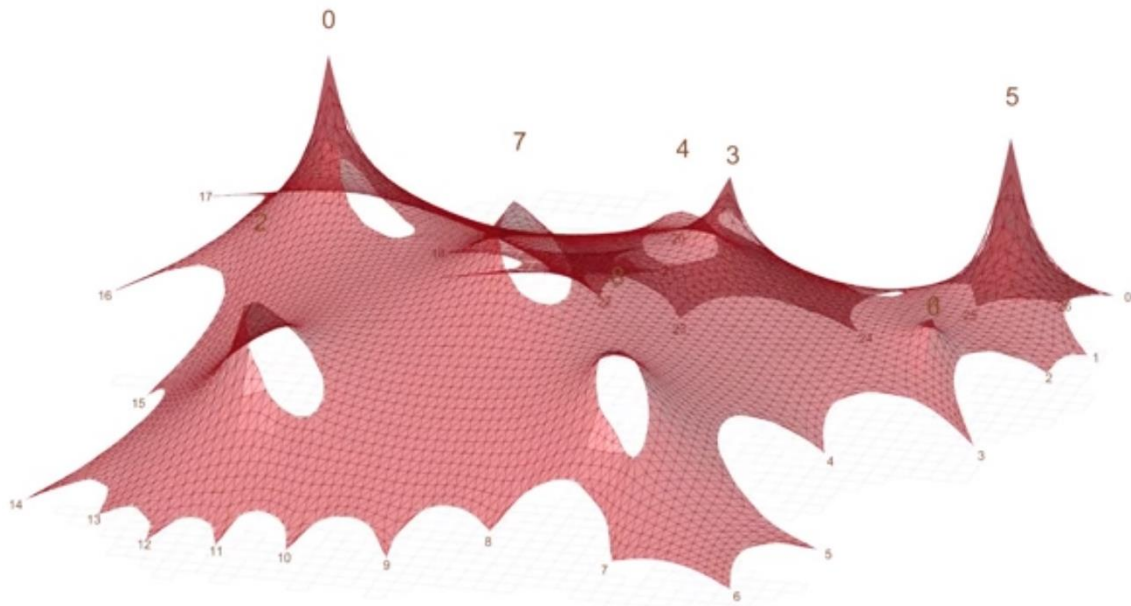
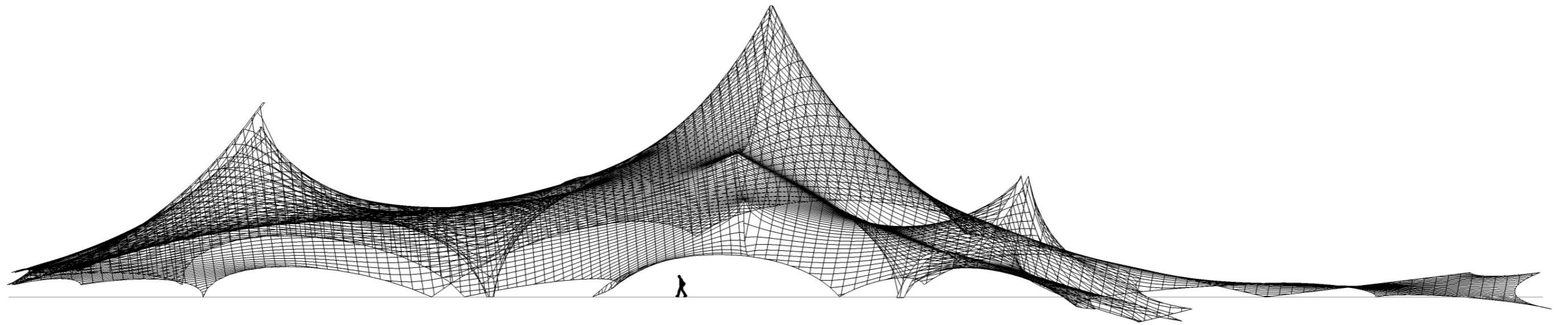
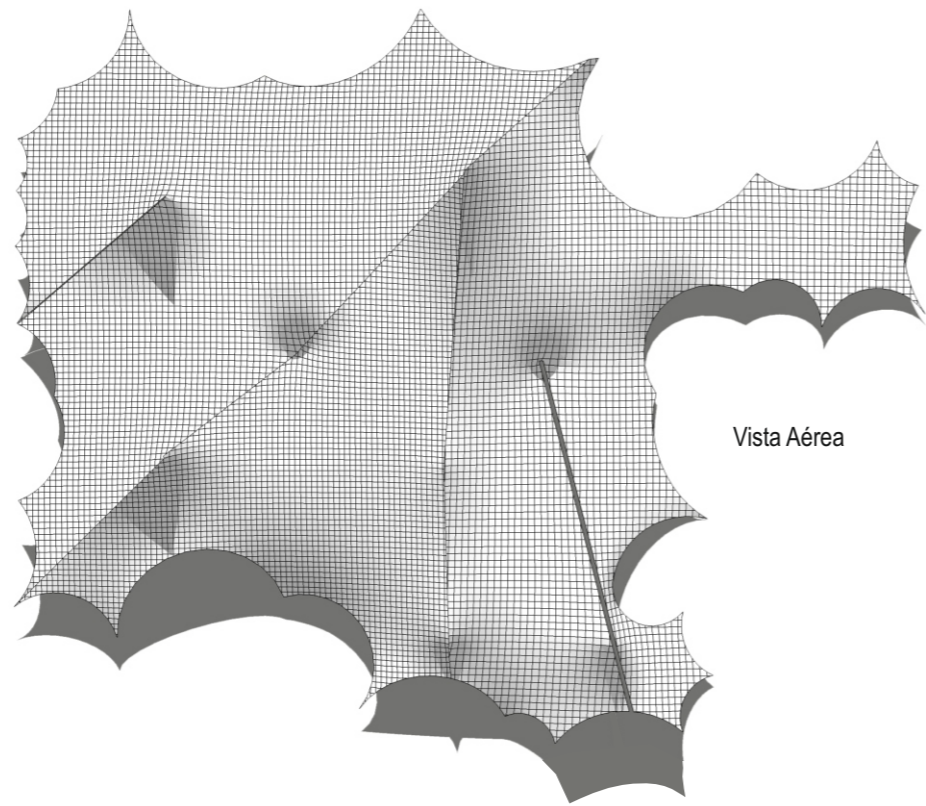


Imagen 95: Simulación 3d del comportamiento tensional de la membrana del Pabellón

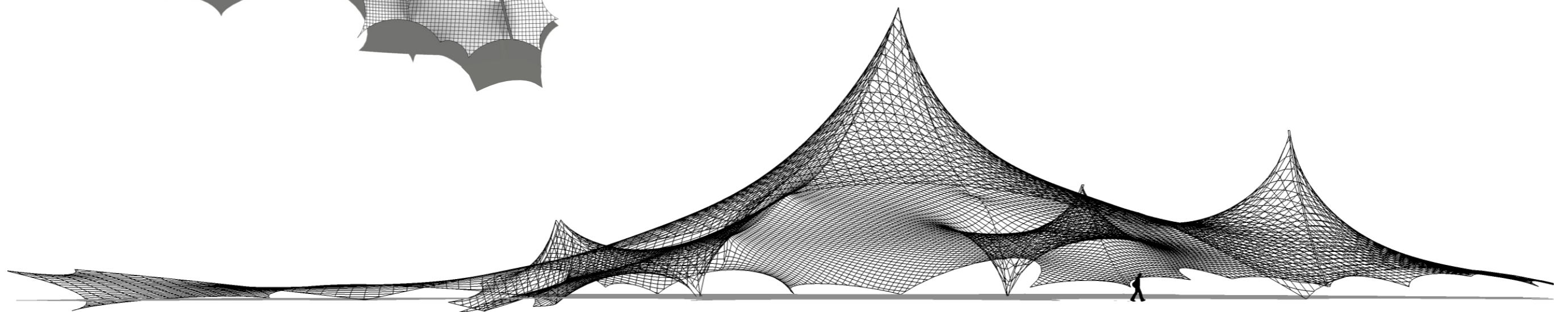


Alzado Norte



Vista Aérea

Reconstrucción 3D del Pabellón Alemán de la Expo de 1967 en Montreal



Alzado Este

al que hacíamos referencia también anteriormente, se cierra la brecha entre la objetividad de la ciencia y la técnica, y la subjetividad de las emociones: el arte, que lleva a conmover al usuario, y para ello es preciso una capacidad de observación que analiza objetivamente primero, para ser enriquecida con la subjetividad, el bagaje que el arquitecto trae consigo al enfrentarse con cada proyecto.

En la pregunta y respuesta 9 del Anexo 1 se hace referencia al desarrollo de la capacidad de percibir y apreciar lo que se presenta de modo casual. Para Otto la observación de la naturaleza inerte, la viviente le parece mucho tan compleja que se le vuelve impenetrable, es la fuente de su investigación.

Y, junto con esos análisis de la naturaleza, Otto hace referencia en la respuesta a la pregunta 10 del Anexo 1 a experimentaciones efectuadas por grandes de la arquitectura del siglo XX como Maillart, Torroja, Freyssinet, etc, que le permitieron diseñar utilizando estas formas naturales, aunque estos experimentos, que algunos de ellos sólo eran posible realizar en escala 1:1, no funcionaron. De ahí el riesgo y el mérito de este tipo de investigación.

Si tuviéramos que definir el trabajo de Frei Otto en pocas palabras esas serían asumir riesgos y contrastarlo con los modelos, incluso si estas pruebas han de hacerse en el edificio terminado y resultan negativas. De ahí su importancia en encontrar los modelos de comprobación y experimentación adecuados.

3.5.1. Aportación de la reconstrucción tridimensional digital del Pabellón Alemán de la Expo'67 para su mayor comprensión

Al representar esta superficie hay que tener en cuenta que se trata de representar la forma de la optimización de las superficies. Esto quiere decir que cada uno de los puntos de la superficie tiene una posición que está en función de la posición del resto de los puntos, y éstos a su vez están en función de la forma del contorno.

Como se ha anotado anteriormente, esta forma es la que adoptan las películas de jabón, pero en el caso de del pabellón alemán Frei Otto llegó un poco más lejos. A las superficies que generaba con sus modelos de películas de jabón les introdujo puntos singulares a los que hizo destacar respecto al resto de la superficie. Esos puntos serían los puntos más altos del pabellón, en la cima

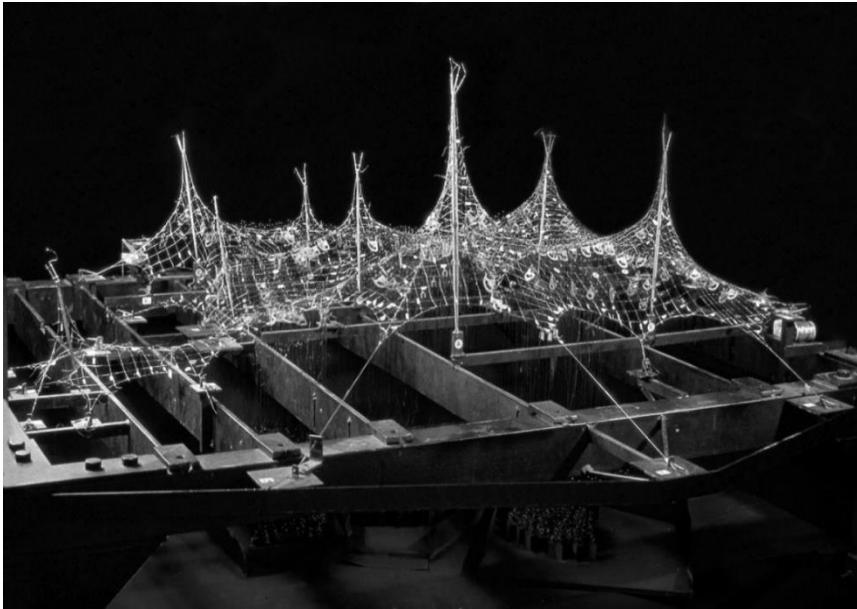
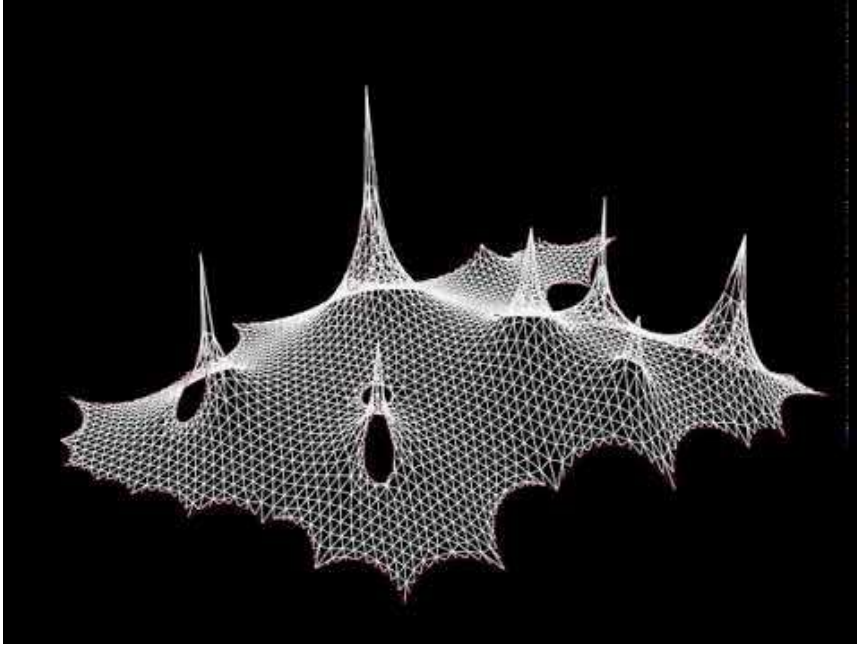


Imagen 97: Comparación del comportamiento físico con el cálculo virtual tridimensional

de los mástiles, y también los puntos que conectó con el suelo produciendo una variedad de espacios muy novedosa.

Una prueba que también añadió a esta generación de superficies fue la posibilidad de introducirles huecos, para que hicieran la función de lucernarios, en esos puntos singulares antes descritos. Para ello tuvo que añadir a los puntos singulares unos nuevos contornos, a modo de marcos de puertas y ventanas con geometrías orgánicas, que permitieron este fin.

Una vez hechas estas pruebas con pompas de jabón, el reto a continuación fue cómo representarlas. El objetivo de esta representación fue que con ella se facilitase trazar una matriz de cables capaz de comportarse de igual manera y, por tanto, generando las mismas formas orgánicas.

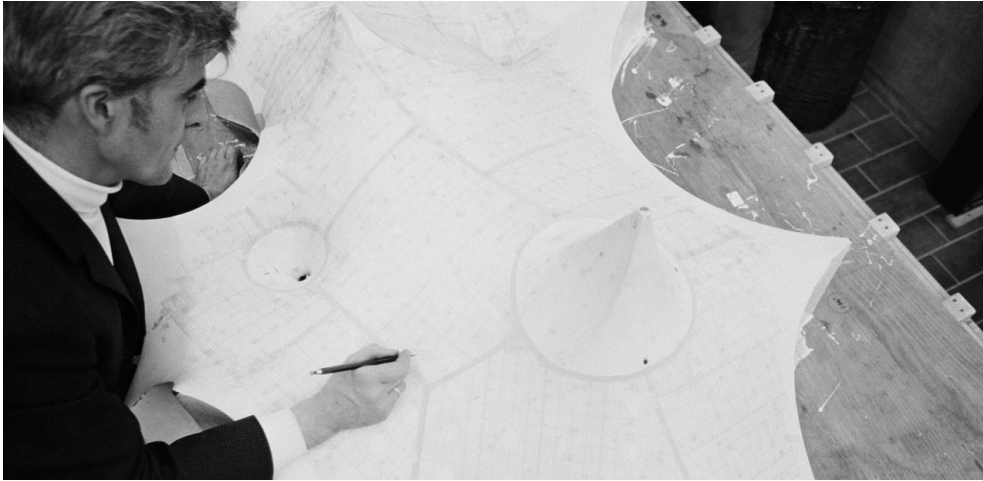
Al tratarse de un comportamiento tensional, el arquitecto alemán necesitó materiales que fueran fácilmente tensables y que pudieran adquirir la forma deseada. Por esta razón la elección de los cables era perfecta porque tienen un comportamiento igual al que tendrían infinitas articulaciones conectadas. Entre esos cables, aportando unidad al conjunto, se encontraron los conectores. Anclados a esos conectores estos conectores estarían las membranas, que tuvieron que estar hechas a medida y en fragmentos no muy extensos por tener que abarcar una superficie muy distinta al plano. Y, para terminar, los cables de contorno desde los que se tensaría la cubierta entera.

Cada uno de estos elementos debía poder permitir que el funcionamiento de cubierta fuera enteramente solidaria y que, salvo los previstos, no hubiera puntos singulares sino una sola continuidad.

Los conectores cumplieron con esa función gracias a ser una articulación que fijaba dos cables en dos direcciones superpuestas.

Todos los elementos, esencialmente cables y conectores, funcionaron como diferenciales perfectos de superficies minimales. El problema residió en el despiece de la membrana. Esas formas orgánicas no podían representarse en un solo plano y hubo que idear un sistema de líneas de nivel para poder representar y hacer el despiece de las membranas.

En el caso de la simulación tridimensional digital efectuada para el estudio de este caso es mucho más sencillo en cuanto se tiene la matriz de cables; al triangular los cuadriláteros generados se puede apreciar la superficie.



Imágenes 98: Pruebas a distintas escalas de los proyectos de Frei Otto.

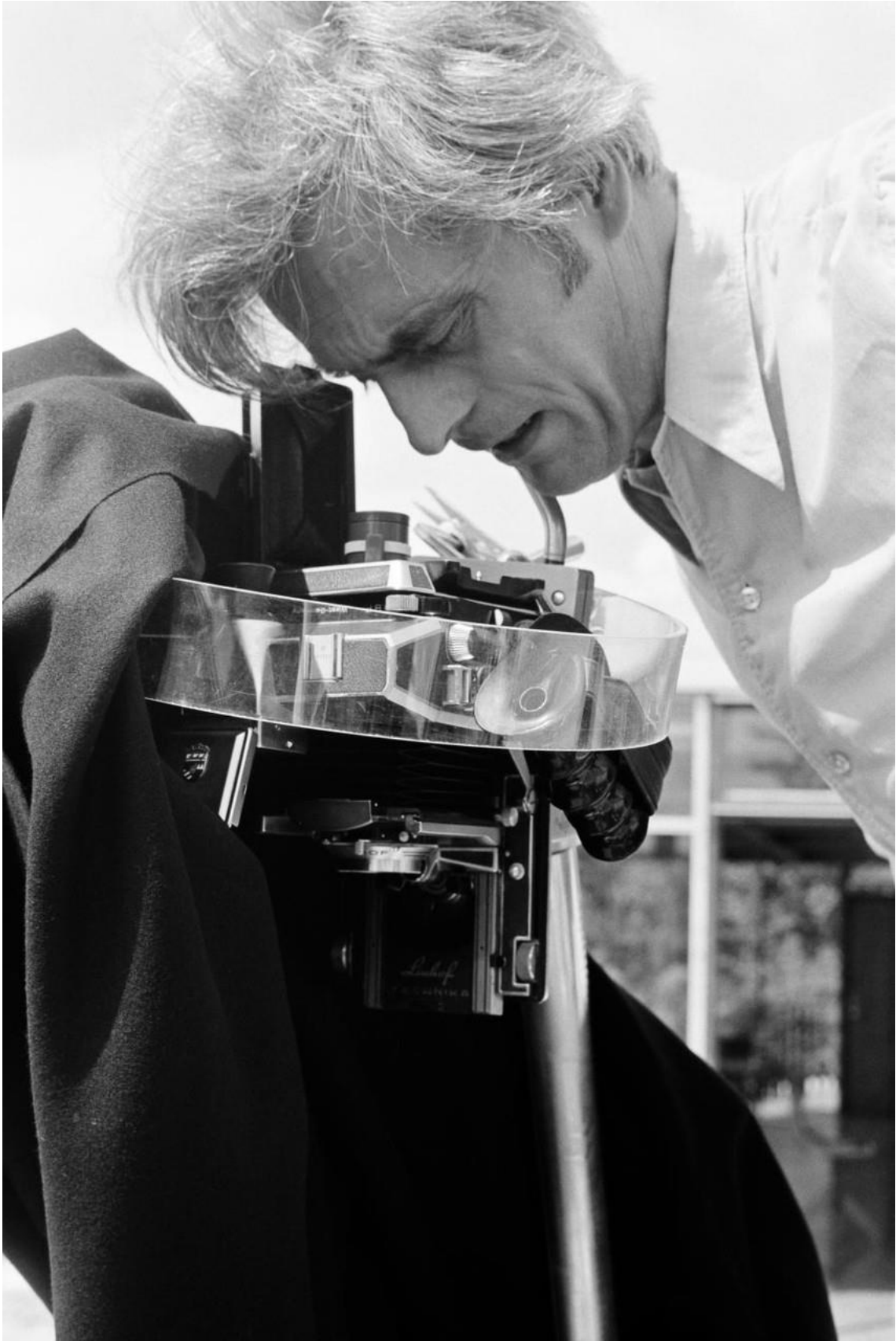


Imagen 99: Frei Otto con un instrumento de medición de sus modelos a través de la fotografía



Imagen 99b: Frei Otto subido a la estructura de cables que sirvió de modelo físico estructural de pruebas para el pabellón alemán en 1967.

EL MODELO PARA EL VI CONCURSO DE LA UIA 1961

Movimiento y transporte del modelo como desencadenante de proyectos

Emilio Pérez Piñero

4. EL MODELO PARA EL VI CONCURSO DE LA UIA 1961. (1961-1972)

4.1. Introducción.

4.2. Emilio Pérez Piñero (1935-1972).

4.3. Un punto de inflexión: el concurso de UIA como ejercicio de clase

4.4. Puesta en práctica en obra real de su estructura desplegable: el Pabellón Transportable para la Exposición XXV Años de Paz (1964). Madrid, San Sebastián y Barcelona.

4.4.1. Descripción del Pabellón.

4.4.2. El Concurso.

4.4.3. Fabricación y construcción en tiempo récord

4.4.4. Reconstrucción tridimensional de la estructura plegable para el Pabellón conmemorativo de los XXV años de Paz para su mayor comprensión.

4.5. Puesta en práctica de su conocimiento sobre cúpulas: Teatro Transportable para Festivales de España. Un hallazgo en la transportabilidad en 1966.

4.5.1. Reconstrucción tridimensional de la estructura del Pabellón de los Festivales de España de 1966 para su mayor comprensión.

4.6. Epílogo.

4.1. Introducción

Como ya se anticipó en la introducción, los casos de estudio son pabellones que han puesto al límite modos de desarrollar el proyecto arquitectónico a través del trabajo con modelos físicos estructurales. Dos de esos casos son de contexto y los otros tres introducen una novedad metodológica en el uso de los modelos dando como resultado proyectos de gran novedad técnica y formal.

Los dos casos de contexto son la cúpula que hizo de cubierta del Pabellón de Estados Unidos en la Expo'67, y la doble cúpula maclada que diseñó Emilio Pérez Piñero para los Festivales de España en 1964 que se desarrollará a continuación en este capítulo. Junto a este proyecto, también del mismo arquitecto, se desarrolla otro de los pabellones que introducen una novedad metodológica, el pabellón plegable para los XXV Años de Paz después de la Guerra Civil Española.

Por tanto, en el capítulo que ahora comienza se estudiarán estos dos proyectos que resultan parte del auge de una manera de construir y proyectar y la aplicación de novedades de comportamiento de las estructuras.

Como se comentó en la introducción, esta tesis realiza un estudio que no se realiza desde una aproximación histórica al uso de los modelos y su incorporación en la mesa de trabajo de los arquitectos dentro de su labor creativa, sino que se desarrolla mediante el análisis de ciertas obras de arquitectura –próximas en el tiempo pero no en el espacio- que permiten identificar diversas operaciones con modelos; usos escalables de la maqueta al edificio, usos interpretados y traducidos de la escala de trabajo a la escala humana arquitectónica para la que fueron pensados. Con este estudio de casos, en el que en este capítulo se desarrollará más concretamente el caso de dos de las estructuras que investigó Emilio Pérez Piñero, se construye un valioso espectro de sistemas de trabajo que han marcado un hito en la manera de construir.

De la lectura de la bibliografía y archivos a la que se hará mención a continuación nace, en cierta manera, el deseo de abrir brecha en la investigación de los “lugares comunes” entre estos proyectos, los casos de estudio, de procedencias muy distintas pero que comparten el haber “escuchado” qué tienen que aportar al proyecto, incluso en la forma, los materiales y las uniones entre ellos.



Imagen 101: Emilio Pérez Piñero y su esposa Consuelo Belda. Su matrimonio fue 1956, 5 años antes de ganar el concurso de la UIA como alumno de cuarto curso de la ETSAM.



Imagen 102: Emilio Pérez Belda, hijo de Emilio Pérez Piñero y actual presidente de la Fundación Emilio Pérez Piñero

4.2. Emilio Pérez Piñero (1935-1972).

Emilio Pérez Piñero (1935 – 1972) fue un arquitecto de trayectoria profesional muy atípica.

Nació en Valencia donde su padre, militar de profesión, se encontraba destinado. Muy pronto se trasladó con su madre a la población de Calasparra en la Región de Murcia de donde eran naturales sus padres. Allí pasó su infancia, hasta que, por influencia de su padre, se trasladó a Madrid para cursar los estudios de arquitectura.

En la escuela de Madrid destaca por una gran visión espacial unida a una magnífica habilidad manual, que convierten rápidamente al joven estudiante en un alumno aventajado, cuyos proyectos, que combinan movimiento, geometría, resistencia y precisión, presentan una nueva tendencia que hasta entonces no solían darse entre ejercicios de alumnos y arquitectos.

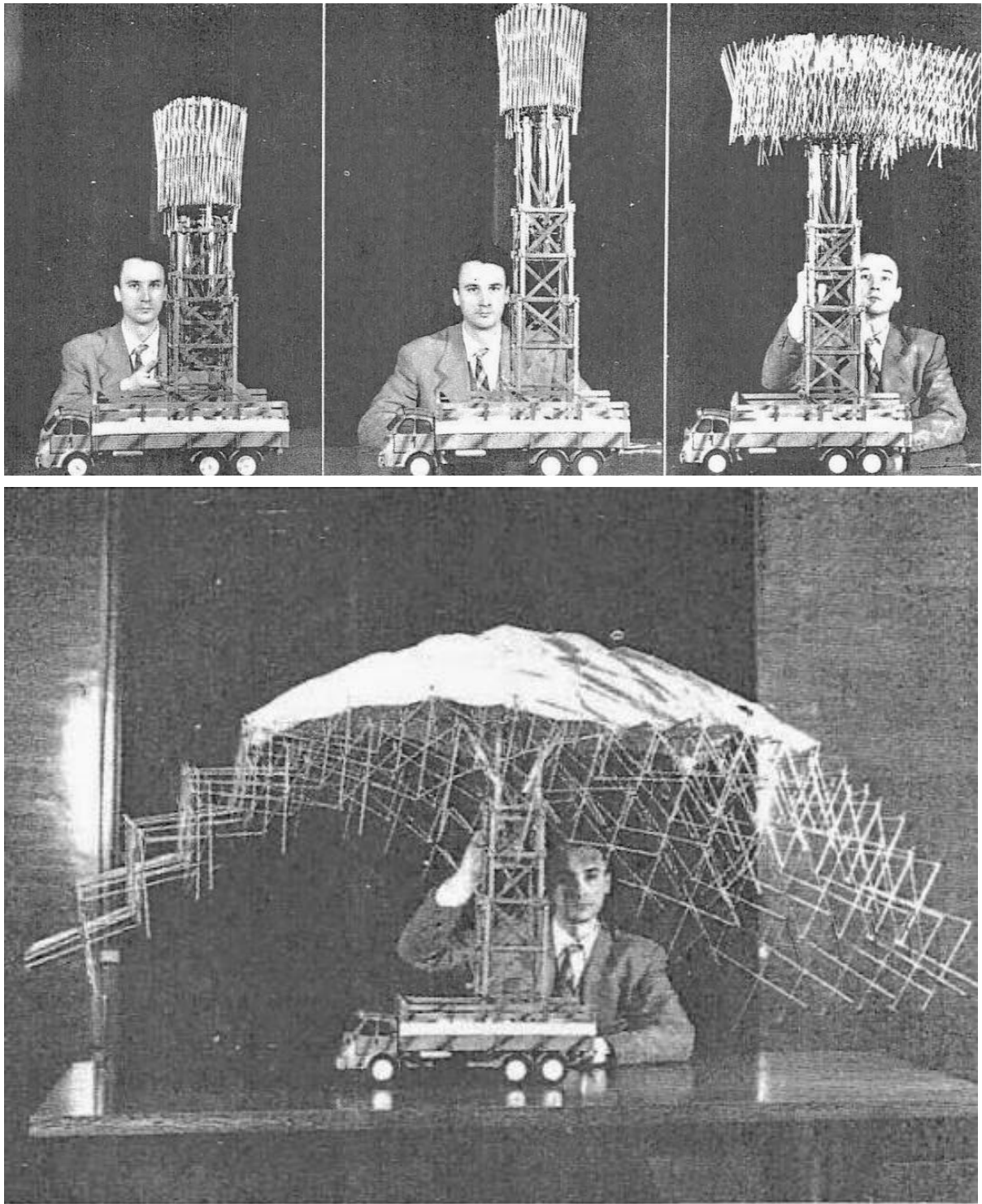
A lo largo de su extremadamente precoz y lamentablemente corta carrera fue galardonado con multitud de premios en reconocimiento a su obra, siendo destacables la "medalla de Oro" en la XI Exposición Internacional de Patentes de Bruselas, y el Premio Auguste Perret de la Unión Internacional de Arquitectos en 1972. Ese mismo año fallecía a causa de un accidente de tráfico en Torreblanca (Castellón) con tan sólo 37 años.

Para la redacción de este capítulo se ha requerido el apoyo de Emilio Pérez Belda, hijo de Emilio Pérez Piñero y conservador y continuador de la obra de su padre. El autor agradece a la Fundación Emilio Pérez Piñero su compromiso con la investigación en la aportación del arquitecto calasparreño.

4.3. Un punto de inflexión: el concurso de UIA como ejercicio de clase

Si hay un momento en el que es obligado pararse para comprender bien la trayectoria profesional del arquitecto murciano es el ejercicio de clase en la Escuela de Arquitectura de Madrid: el diseño de un teatro ambulante que los profesores de la asignatura de Proyectos Arquitectónicos habían decidido poner a los alumnos de 4º curso, haciéndolo coincidir con el tema del VI Concurso que organizaba la UIA (International Union of Architects) que ese año, 1961, tendría lugar en Londres con un jurado de primer nivel: Richard Buckminster Fuller, Félix Candela y Ove Arup entre otros.

Ante tal estimulante desafío docente, los alumnos se ponen a pensar cómo puede desarrollar una idea capaz de estar a la altura del ejercicio planteado y del concurso internacional. Se trató de diseñar fuera de los límites de la arquitectura tradicional. La arquitectura nómada no estaba dentro de la enseñanza impartida en la escuela en aquel momento.



Imágenes 103: Modelo de cúpula desplegable para Teatro Ambulante de Emilio Pérez Piñero

Uno de esos alumnos, Emilio Pérez Piñero, desde su humilde escritorio de piso de estudiante, da comienzo, en un fogonazo de inspiración, con la excusa de este ejercicio-concurso de arquitectura, a una década de investigación del autor sobre estructuras transportables, pligables y desmontables asequiblemente, y abre una vía hasta entonces desconocida en el mundo de este tipo de estructuras.

Así escribe a su esposa¹ Consuelo Belda sobre el proyecto emprendido:

[...] Ya he comenzado la ópera del proyecto del teatro y estoy muy entusiasmado, pues tengo una idea que creo nueva completamente y la voy a llevar a la práctica sin cortapisas ni ahorros de ningún género. Ya te explicaré a lo que me refiero. [...]

De lo que estoy haciendo ahora sólo puedo decirte que no tiene punto de comparación con nada que he hecho antes ni que haya hecho nadie nunca para presentar un proyecto en la Escuela.

Espero llegar al final. En los pocos ratos de descanso os he hecho mucho de menos².

Se trataba de una estructura desplegable capaz de cubrir un escenario y las butacas del anfiteatro. Una cúpula de estructura espacial de barras metálicas de aleación de aluminio en el que estuvo trabajando el modelo 3 meses³.

“Entusiasmado con una idea nueva” y “espero llegar hasta el final”, estas dos frases definen dos de los rasgos fundamentales de la actitud del inventor. Sólo un estado de agitación incontenible, mezcla de alegría y fascinación por la idea naciente, es motor capaz de hacerle tomar la decisión, por encima de cualquier obstáculo, de llegar hasta el final. Aunque bien es sabido que no sólo la decisión y el entusiasmo inicial basta, porque hasta la construcción final de la idea terminada el arquitecto murciano encontró muchos problemas que tuvo que solucionar en un espacio muy reducido de tiempo:

¹ Emilio Pérez Piñero contrajo matrimonio antes de terminar la carrera de arquitectura con Consuelo Belda el día 2 de octubre de 1956.

² AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00023. En aquella época ya había nacido su primer hijo.

³ En una carta de marzo de 1961 dirigida a su esposa le cuenta que se ha retrasado la entrega hasta la semana siguiente. AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00018.

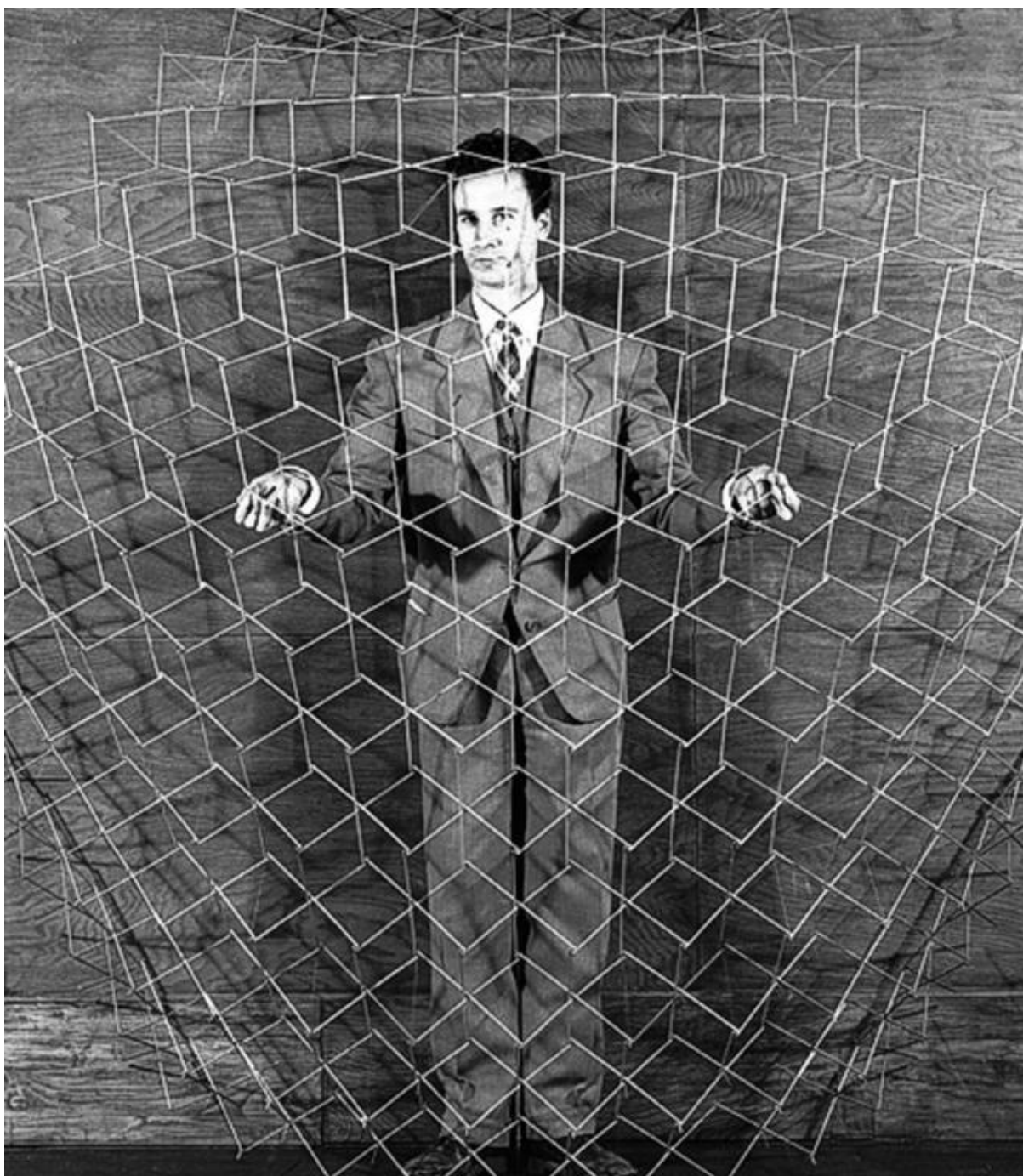


Imagen 104: Estructura desplegada de un modelo posterior, pero con el mismo sistema de haces de barras.

Mí querida Consuelo:

[...] El sábado tenemos que entregar la estructura; así que ya te imaginarás el panorama⁴.

[...] Aún no he terminado la estructura pues nadie había hecho nada y se ha retrasado su entrega. Pero voy a ver si la liquido, pues no me gusta tener cosas pendientes⁵.

[...] Ahora estoy con el croquis del proyecto, que aún no me acaba de convencer⁶.

Es destacable que el joven estudiante no hiciera los croquis hasta el final. Este hecho se explica por la dificultad que presentaba el modelo elegido para ser representado, desde cualquier punto de vista excepto la vista superior, que no ofrecía profundidad, las barras se solapaban, y el efecto del movimiento era muy difícilmente representable hasta que no se completara totalmente el modelo y se desplegara. En sus años de estudiante, Emilio destacaba por su habilidad en el dibujo y su precisa visión espacial, pero este ejercicio mental de representación sobrepasaba sus capacidades comprensiblemente.

La idea de la estructura, descrita por el propio autor, presentaba, a priori, dos problemas principales; el problema de la geometría por interferencias entre barras, y el problema de funcionamiento mecánico. Para ello redujo al mínimo indispensable los elementos de que constara la estructura con únicamente tres elementos distintos que trabajaban entre sí y previó distintas aplicaciones que podría tener la estructura para su cubrición sin que se dificultase el mecanismo necesario para hacer que la estructura se plegase. El autor describía su invento en este fragmente de un artículo para la revista Arquitectura:

ESTRUCTURA RETICULAR ESTÉREA DESPLEGABLE

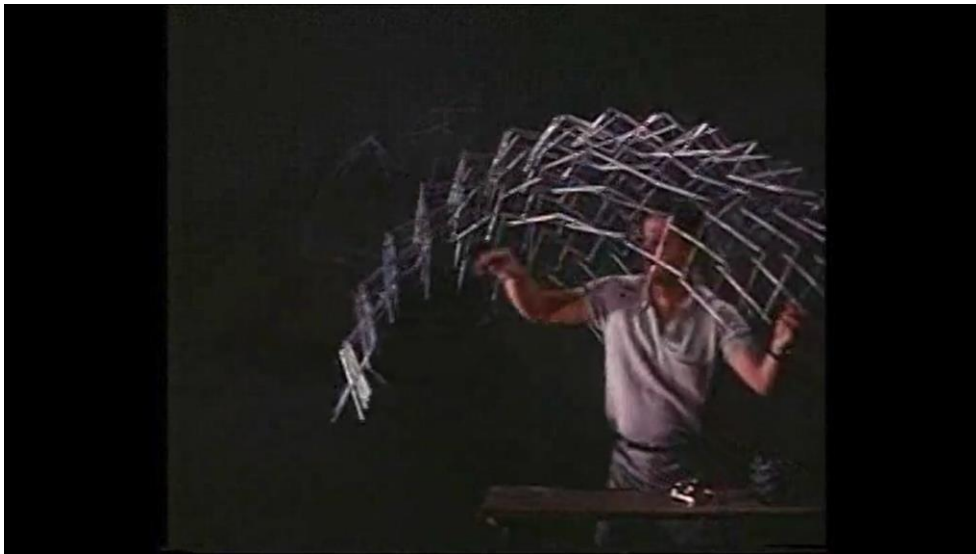
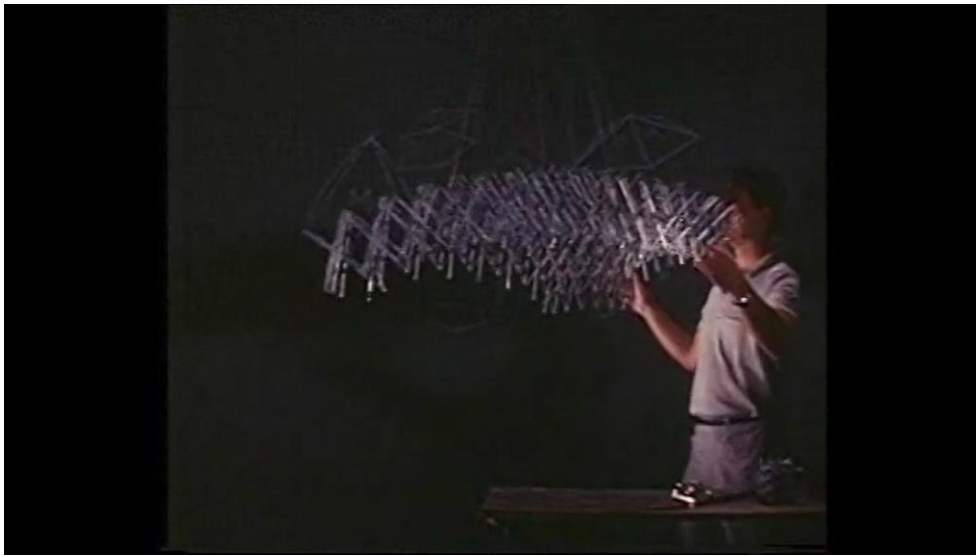
Se trata de una estructura reticular estérea desplegable. En su realización se han presentado dos problemas:

1/. El geométrico de mecanismo de todas las barras sin interferencias.

⁴ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00018.

⁵ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00019.

⁶ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00020.



Imágenes 105: Despliegue de la estructura en un documental posterior ("Las estructuras vivas de Pérez Piñero"
<https://vimeo.com/684393>)

2/. Problema mecánico de triangulación y destriangulación por medio del enganche y desenganche de cables de tracción.

La estructura tiene un plano medio de simetría, que le permite trabajar indistintamente y de igual modo bajo carga o bajo succión del viento.

Consta esencialmente y de un modo muy diferenciado de tres partes:

A/. Armazón rígido de barras articuladas, que constituye un acordeón espacial.

B/. Elementos flexibles de tracción, unidos permanentemente a la estructura, constituidos por una red de cables superior y otra inferior, que determinan el límite máximo de apertura de toda la estructura.

C/. Elementos flexibles a tracción, enganchables y desenganchables, que una vez enganchados y tensados triangulan y rigidizan la estructura; y, que cuando se desenganchan permiten que la estructura se pliegue totalmente.

La estructura puede llevar una tela unida permanentemente, de modo que, como se ve en algunas fotos, queda plegada y alojada en la estructura cuando esta se cierra.

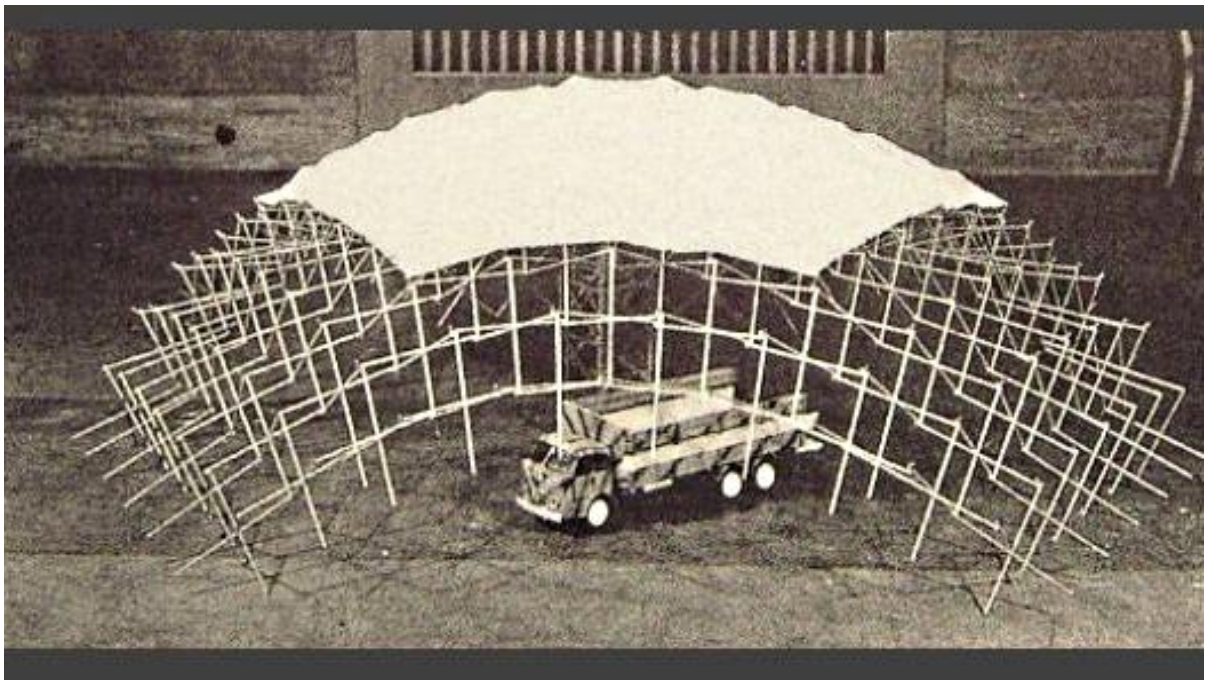
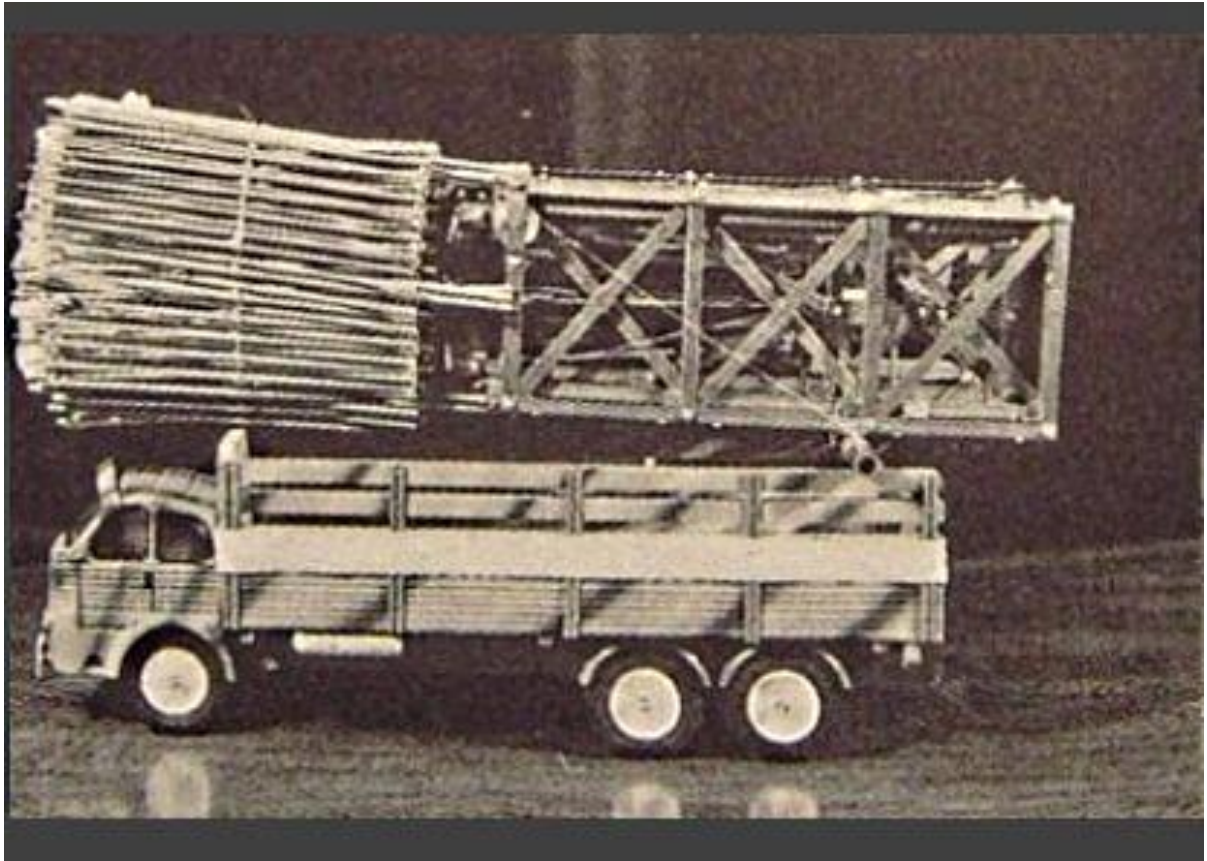
El arquitecto dispuso todo lo necesario para la construcción del teatro ambulante y puso especial hincapié en el momento más difícil de la operación, la apertura y el cierre. Gracias a su trabajo con el modelo, pudo averiguar que el mecanismo, una vez terminada la construcción de las articulaciones capaces de permitir el movimiento fluido de las mismas, era ayudado por la fuerza de la gravedad y ayudaba a la extensión completa de la estructura, hasta que se alcanzase el impedimento geométrico por el choque de las piezas⁷, dejando la parte más esforzada para la recogida posterior de la estructura

La operación de apertura y cierre puede hacerse desde la parte inferior con un mecanismo que separe y junte los seis nudos centrales inferiores de la estructura. También puede abrirse colgando la estructura de los nudos inferiores con una grúa. De este modo la estructura se abre sola.

⁷ SANZ, J.B. *Las estructuras vivas de Pérez Piñero*: Documental de acceso restringido en la web de la Fundación Emilio Pérez Piñero en <http://www.perezpinero.org/descargas/> Ed Empresa Regional de Murcia S.A. Murcia, 1992.

También en la plataforma gratuita Vimeo: <https://vimeo.com/684393> en el minuto 2'50seg.

Resumen: <https://www.youtube.com/watch?v=oG4cJduB64E> Consultado el 17 de agosto de 2018.



Imágenes 106: Camión con la estructura plegada y desplegada

El modo más sencillo de fijación temporal en un determinado lugar es hacerlo sobre los remolques empleados para llevar el resto de la construcción de que se trate.

Pese a ir enfocado directamente a la materialización de la estructura del teatro (hace una estimación de luces máximas de la estructura), el arquitecto murciano se dio cuenta del potencial enorme de posibilidades que ofrecía este sistema al que estaba dando a luz; con un solo desplazamiento del nudo intermedio entre las barras hasta el punto medio de cada barra, la estructura pasaría a ser desplegable pero con directriz recta, es decir, sería plana, cambiando radicalmente las posibilidades de construcción y abriendo horizontes nuevos a su investigación y ejercicio de la profesión.

Esta estructura puede hacerse plana o esférica; rectangular, circular u ovalada, solo hay que variar el módulo inicial de modo muy sencillo.

También puede emplearse para crear plataformas elevadas del suelo; bien sean planas, con pendiente o escalonadas.

En el proyecto de Teatro ambulante se ha resuelto la pendiente de la sala con gajos curvos de modo que cada uno encaja en su sitio justo.

Se está ensayando un modelo de 12 metros para determinar las luces óptimas de validez. Se prevé que estas serán comprendidas entre 20 y 35 metros⁸.

Siendo así su estructura, y pese a prever un gran éxito entre sus compañeros de clase, los nervios del joven estudiante de arquitectura no le dejaron tranquilo al ser consciente de su sin par aportación. Incluso se le insinuó algún profesor, abusando de su estatus superior, para que aparecieran como autores junto con Emilio. Como se lo temía, había empezado a redactar la documentación necesaria para hacer una patente de su invención. Así lo describe el autor del revolucionario modelo:

El miércoles de la semana pasada llevé a la Escuela la cubierta, con la lona y la monté abriéndola y subiéndola con las dos manivelas de la torre; habían cuatro profesores de mi Escuela; el catedrático norteamericano (que está en Madrid trabajando con Torroja) y el especialista en maquetas

⁸ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S2_01_01_00018.



Imágenes 107: Pérez Piñero enseñando en España su Modelo desplegable para teatro ambulante.

del Instituto de la Construcción y el Cemento; además muchos compañeros.

[...] Todo funcionó perfectamente y controlé cada operación en todo momento. Es la primera vez en mi vida que, ante un círculo de gente, muchos hostiles, he tenido que comenzar dominando mis nervios y he terminado dominando los de todos los demás. Nadie me escatimó asombro, ni los honrados, admiración. El norteamericano me felicitó dijo que era la invención, el desarrollo y la realización una maravilla; se separó de los profesores de mi Escuela y me invitó a ir a visitarle y a que viera sus experiencias y su trabajo en el Instituto.

La misma tarde del miércoles llevé la estructura a Julio Castro, un catedrático de la Escuela de Caminos, al que Prats le hace trabajos.

Me dijo lo mismo que por la mañana, que podemos calcularla y estudiarla en el laboratorio de su Escuela; cree que tiene del Rift (para campamentos) y está dispuesto a financiar; para lo cual haríamos una de 12 metros, para estudiarla como maqueta $\frac{1}{2}$ de 25 metros.

Ya he hecho un avance de patente hasta tener los planos definitivos.

Ayer uno de los profesores se atrevió a proponerme lo que estaba temiendo: que para mandarlo a Londres colabore conmigo

[...]. Dentro de la iniquidad pasan por la vergüenza de ponerlo a mis órdenes, con tal de no renunciar a lo que tenían decidido de antemano. Voy a intentar sacar el máximo partido de esta situación⁹.

Los profesores eligieron unánimemente su modelo y tenían muchas dudas acerca de cuál debería ir también con él. El éxito fue abrumador que algunos alumnos de su clase protestaron ante la evidencia de que ninguno estaba a su altura:

Parece ser que han protestado algunos compañeros de que fuera solo el mío y del modo de elección. El catedrático lavándose las manos ha dicho que el curso vote los dos que le parezcan mejores. En seguida están todos

⁹ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00026.

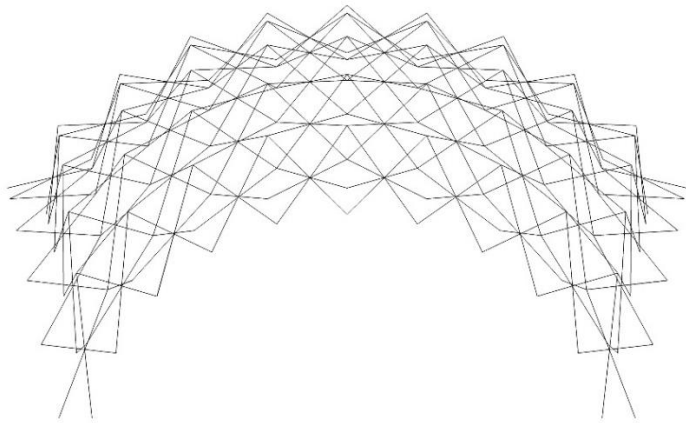


Imagen 108: Ejemplo de cúpula desplegable. Alzado

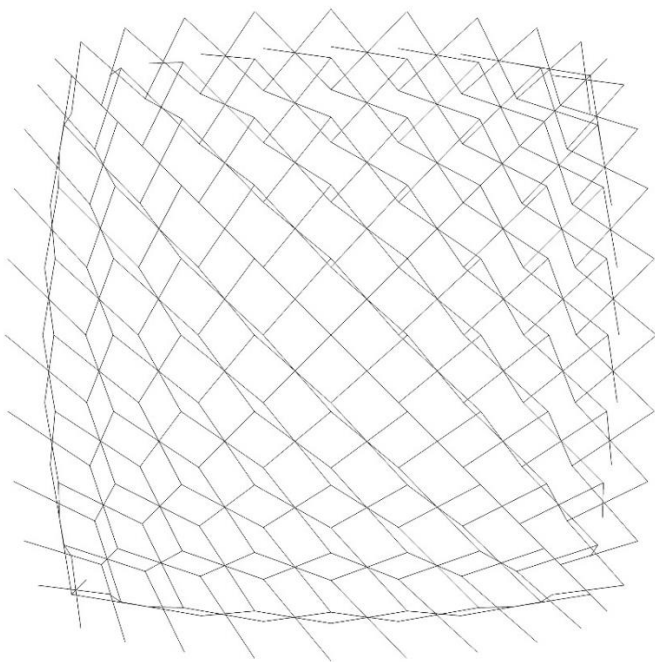


Imagen 109: Planta de la misma cúpula

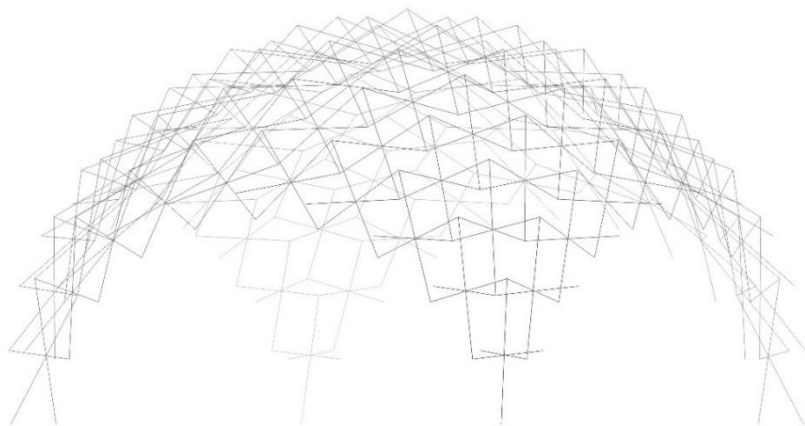


Imagen 110: Perspectiva de la cúpula

de acuerdo en que vaya el mío y están con el problema de no saber cuál ha de acompañarme. Así que en estar estamos.

Ayer llevé la torre, que funciona todo perfectamente con unos cables que le he puesto; les ha llamado más la atención que la estructura; todos exclamaron que era soberbia; que eran cosas de Leonardo da Vinci; y los profesores que me iban a dar el premio March (otros de 50 (alumnos) dicen que el Nobel) [sic].

Así que la protesta ha puesto más de manifiesto que “el primero el mío, después nadie y luego los demás”. De colaboraciones no han dicho nada¹⁰.

*Como recompensa por el proyecto realizado, el arquitecto recibió una ayuda, para costear la patente y publicar en la revista *Arquitectura*:*

Escribí el lunes pasado. Lo de la colaboración se ha resuelto solo; han reconocido que lo tenía todo definido y no había nada que hacer. Van a mandar además del mío otro proyecto de los que se hinchan; lo han elegido casi a cara o cruz entre treinta que hay hinchables.

*Antes de ayer lo vieron funcionar el Director y Subdirector General de *Arquitectura* para que financiaran una maqueta de tamaño ½ y estudiarla en el Centro de la Construcción (o sea que ya tengo tres proposiciones, la del profesor de Caminos, la del americano y la de la propia Escuela), además están dispuestos a adelantarme 100.000 pesetas para que la patente en todo el mundo; se pusieron muy contentos dicen que nos llevamos el premio; y, lo que dicen todos que es “el huevo de Colón”. De todo esto ya veremos lo que queda. Se me olvidaba “la van a publicar en la *Revista nacional de Arquitectura*” pues quieren que quede constancia de donde ha salido; lo único que me piden es “que en todos lados diga que soy de la *Escuela de Arquitectura de Madrid*” (palabras textuales)¹¹.*

¹⁰ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00024.

¹¹ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00028. Hay constancia en la Fundación de que recibió la ayuda de cien mil pesetas para patentar la estructura.



Imagen 111: Pérez Piñero con el Duque de Edimburgo, enseñándole la maqueta. UIA International Union Architects, Londres 1961.

Una vez ganado el concurso que hizo la propia escuela, correspondía exponer el proyecto en Londres. La impresión que la gran metrópoli produjo en el estudiante calasparreño es destacable. En la correspondencia que mantiene con su familia lo comenta en estos términos:

Querido padre y hermano:

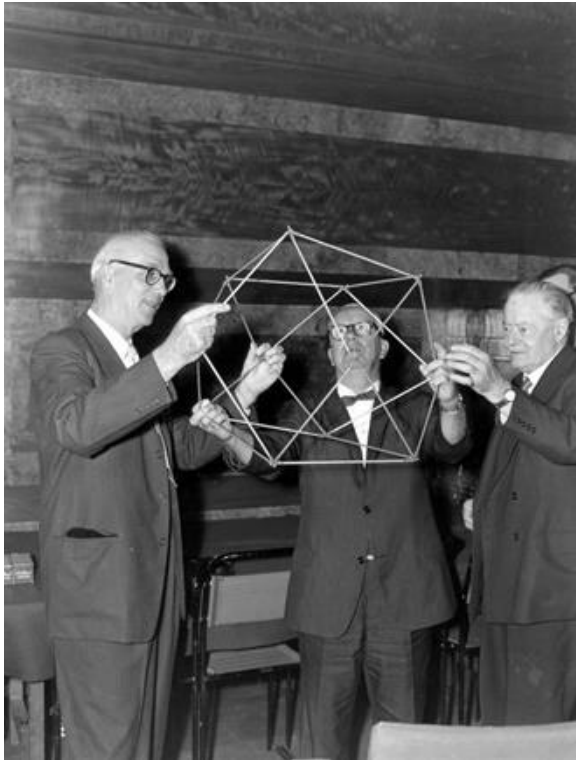
Aquí uno se desenvuelve muy bien; pues como todo se lo sirve uno y se lo hacen todo (hasta la cama) no hace falta entenderlos para nada. En la calle con un mapa y por el sol voy como los exploradores. He llegado a la sede del Congreso, que está a 8 kilómetros de mi casa (que es un Colegio Mayor); a pesar de que en mapa está al lado he estado dos horas andando. Londres es como la provincia de Albacete [...] La exposición la abren mañana; yo la he visto hoy; mi proyecto destaca aquí como allí. Todas las soluciones presentadas son con elementos ya existentes; las soluciones que pretenden ser plegables o son hinchables, plegables muy parcialmente. Los rusos tienen soluciones de esos tipos; son muy complicadas y sólo son plegables muy parcialmente y los elementos en que quedan plegados no son manejables. No me he llevado ninguna sorpresa; todas las soluciones son variantes de lo que hicieron mis propios compañeros.

Recibid un abrazo de Emilio¹².

Y más adelante, durante el acto tuvo tiempo para cambiar impresiones y recibir halagos de altos personajes de la arquitectura a nivel internacional. Tal hecho hizo que siguiera informando a su familia de la estancia:

[...]En los días sucesivos 3 y 4 se fueron confirmando mis impresiones; mi proyecto era el mejor, algo concreto y definitivo que me iban diciendo uno tras otro. Con la maqueta debajo del brazo me pasé los seis días del congreso cada apertura era una sensación, felicitaciones, fotos y tarjetas. La opinión de Félix Candela y Fuller fueron definitivas; era el mejor y además de modo indiscutible, me preguntaban detalles y había de atender

¹² AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00037.



Imágenes 112: Richard Buckminster Fuller (en el centro) con Ove Arup y Kenneth Cross en la RIBA, Londres 1966. Los dos primeros fueron miembros del jurado del concurso de la UIA de Londres de 1961. Félix Candela. Otro miembro ilustre del jurado del concurso de la UIA de 1961.



Imagen 113: Edificio de congresos y exposiciones para el 6º Congreso Mundial de la UIA (Unión Internacional de Arquitectos), South Bank, Londres

a varios a un tiempo. El jueves día 6 fue a visitar la exposición el príncipe Felipe. Yo no estaba presente. Cuando llegué, él [el duque de Edimburgo] había salido de la exposición y estaba en otro sitio. Unos catalanes se me acercaron: ‘Qué sólo se había parado en mi proyecto un rato y el presidente del congreso le había dicho que era el mejor’. Otro me llama por otro sitio, después el Decano del Colegio de Arquitectos de Londres, éste me lleva del brazo a otro y este otro llama al Duque. El Duque se vuelve muy sonriente se dirige a mí me da la mano y yo sin preámbulos empiezo a sacar la maqueta y a hablar.

Me dice que si no puedo hacerlo en inglés, digo no, me dice que si no puedo hacerlo en francés, digo no y sigo en español, él se sonríe y me dice que me pare para que le traduzcan lo que voy diciendo. Sigo más despacio, él comenta y se sonríe varias veces con sus acompañantes, a mí todos me dirigen afirmaciones con la cabeza.

Cuando termino de abrir, cerrar y explicar le ofrezco un nº de Arquitectura, él lo acepta complaciente, me da las gracias, la enhorabuena y continúa la visita. Yo estoy en ese momento verdaderamente muy contento cuando él se aleja yo me quedo como centro de una serie de gente¹³.

El revuelo que organizó la aparición de la nueva maqueta, hizo que se quedara grabada en la memoria de los asistentes la obra del arquitecto. Félix Candela, miembro del jurado recordaba así su primer encuentro con Pérez Piñero:

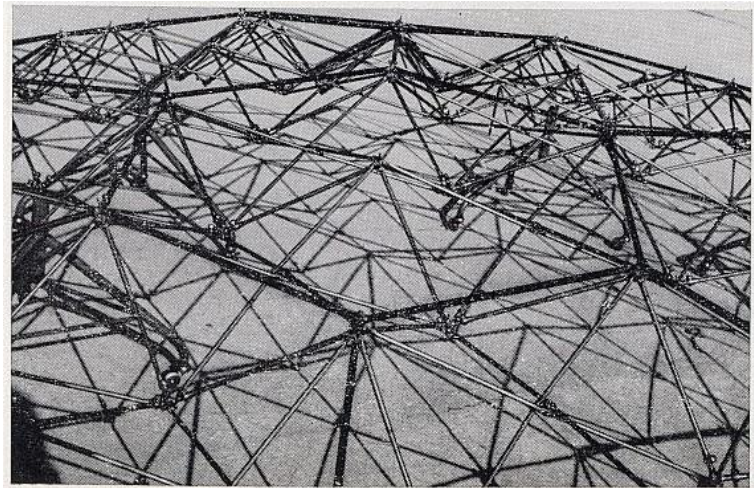
Mi primer encuentro con Emilio tuvo lugar en Londres, durante el Congreso de la Unión Internacional de Arquitectos, en julio de 1961. Me tocó estar, junto con Bucky Fuller y Ove Arup, en el jurado para el concurso de proyectos de estudiantes que siempre se lleva a cabo en esos congresos.

¹³ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_02_00044.

Cuando mencionaba al principio de la cita “a ellos” se refería a aquellos profesores de la Escuela que no apoyaban abiertamente su proyecto, pues cómo se ha indicado anteriormente, Pérez Piñero sólo recibió los consejos oportunos del catedrático de la Escuela de Arquitectura de California y el catedrático de Descriptiva de la ETSAM.



Imagen 114: Desarrollo posterior (1965) de cúpula desplegable de Emilio Pérez Piñero



Imágenes 115: Desarrollo posterior (1965) de cúpula desplegable de Emilio Pérez Piñero

Ese año, el tema era un teatro desmontable y, entre los muchos proyectos presentados, había uno realmente extraordinario. Al que, naturalmente, concedimos el premio sin mayor discusión. Su autor era Emilio Pérez Piñero, entonces estudiante de la Escuela de Madrid [...]

Recuerdo que Bucky Fuller, que estaba a mi lado durante la presentación, me dijo en un aparte, no sin cierto remusguillo de celos: “yo tengo una patente semejante, desde hace varios años”.

A pesar de esta afirmación, pude comprobar con orgullo –ya que desde entonces empecé a considerar los triunfos de Emilio como si fueran míos o, mejor dicho, nuestros- que la patente de Fuller, tal como aparecía en uno de sus libros que me mandó al hotel anotado de su propia mano tenía muy poco que ver con la solución de la articulación o nudo de barras que Emilio había diseñado. Esta articulación, después perfeccionada en sucesivas experiencias, era el verdadero toque genial de la sorprendente estructura.¹⁴

El estudiante no cabía en sí de gozo, en una carta enviada a su familia enumera las ventajas que ha tenido su participación y estancia en los eventos organizados por la UIA (International Union Architects) en esa edición tan especial:

Mi querida Consuelo:

Mis queridos padres y tía:

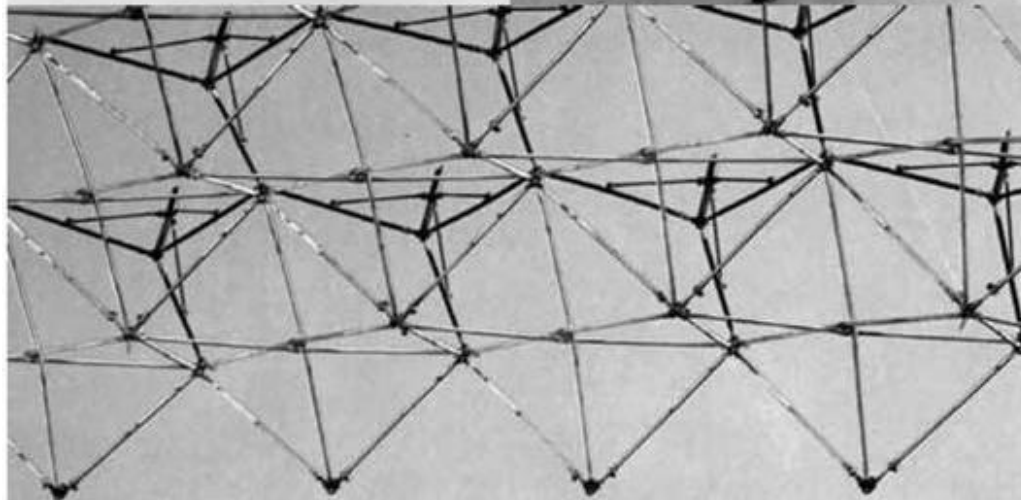
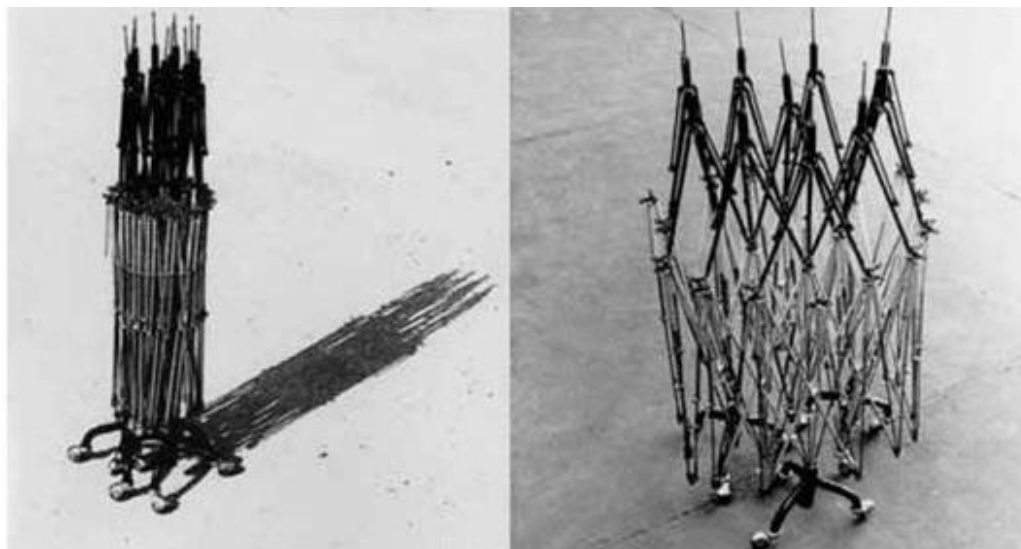
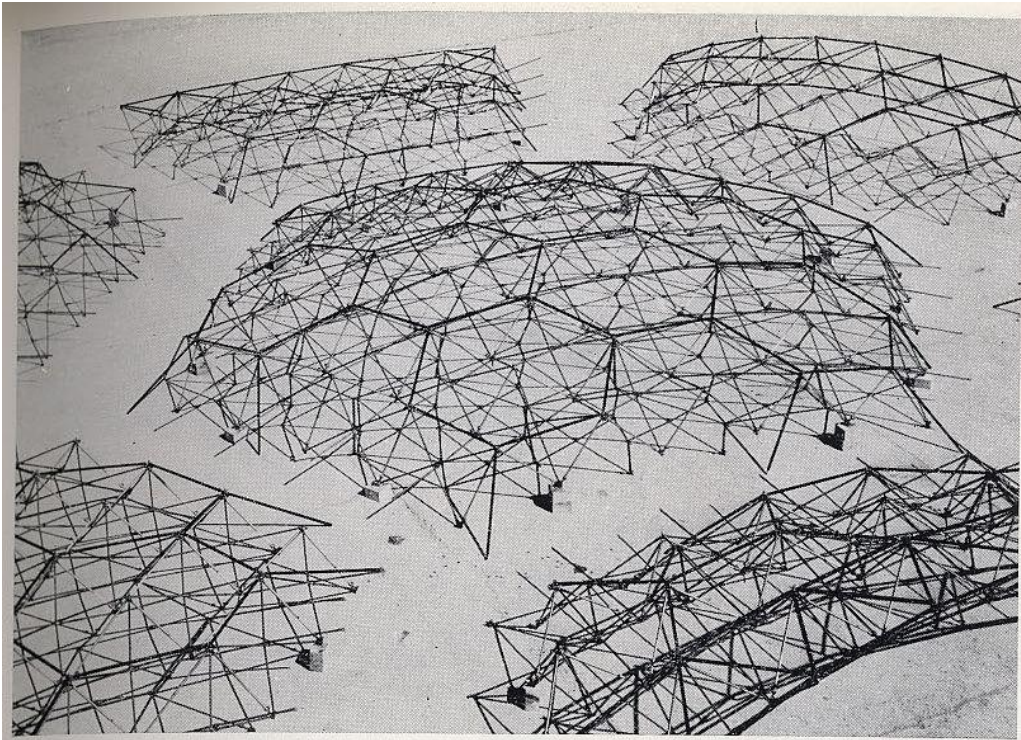
Y todos en general:

Todos los éxitos tenidos hasta ahora se han quedado ridículos. Como todos sabíamos no había ni medallas ni pergaminos, ya que es simplemente un “concurso exposición”.

Pero he obtenido cuatro cosas de modo rotundo y absoluto:

1º) Félix Candela que es a quien el Congreso le ha impuesto la medalla que en papel amarillo viene descrita en la revista ARQUITECTURA; FULLER; que es la primera autoridad en estructuras reticulares de los EE.UU. y otros 9 señores de esa categoría que han hecho crítica de

¹⁴ CANDELA, F. *Emilio Pérez Piñero*, Revista Arquitectura nº 163-164, julio-agosto, Madrid, 1972. Págs. 9-13.



Imágenes 116: Detalle del desarrollo posterior final (1965) de cúpula desplegable de Emilio Pérez Piñero

nuestros trabajos han clasificado mi trabajo como el mejor, más original, más fácilmente realizable, etc., de todos los presentados.

2º) En la sesión de cierre del Congreso he tenido una mención especial por haber aportado “interesantes ideas al objeto de este Congreso, es decir “NUEVAS TÉCNICAS”.

3º) Ha habido un jurado unánime, que son todos los miembros del Congreso, que lo han clasificado como el indiscutible, me ha felicitado infinidad de gente, hasta del Japón.

4º) Exhibición de 15 minutos ante su Alteza Real el Duque de Edimburgo, me dio su efusiva felicitación. Esto está tomado en una película que yo voy hacer todo lo posible por conseguir ya que es un documento definitivo.

5º) Me han pedido ejemplares para publicar las fotos y artículos míos en las mejores revistas de Arquitectura del mundo.

Para las dos mejoras de Inglaterra he de mandarlas aquí directamente; para las Américas a Candela, que me las ha pedido para distribuirmelas él desde Méjico.

El Brinco que he pegado es como para quedarme en órbita. Mañana voy a buscar la película y a sacar el billete. Mi padrino absoluto ha sido Candela. Cuando tomó la medalla de la delegación española le dio una patada fenomenal, pues dijo textualmente “tomo este galardón en nombre de Méjico, que es mi tierra, y quiero que me consideren como representante extraoficial de todas las repúblicas sudamericanas”.

Él se ha portado conmigo como si hubiera sido mi profesor de toda la vida. Mis profesores no han hecho absolutamente nada por mí, ni en lo que debían por su cuenta ni en lo que les he pedido. Sólo han estado para recibir las felicitaciones que por mi proyecto le han dado, que han sido muchas; pero ante todo es la política que no han dejado de hacerme ni en Madrid ni aquí; pero aquí han quedado como unos pincha-uvas¹⁵.

¹⁵ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00044. Interesa destacar esta carta en relación a otra que escribí también a su familia, AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_03_00042.

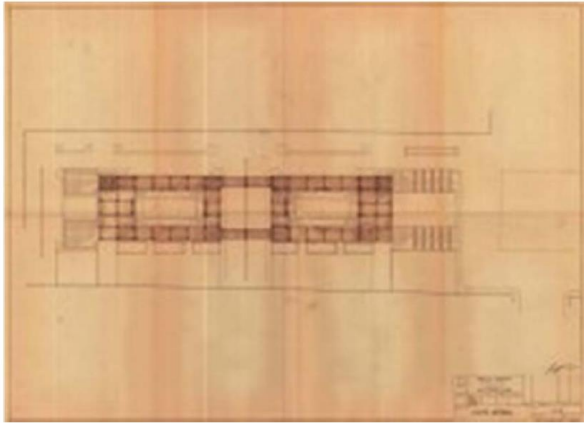


Imagen 117: Plano planta general del Pabellón Transportable para Exposiciones, 1964

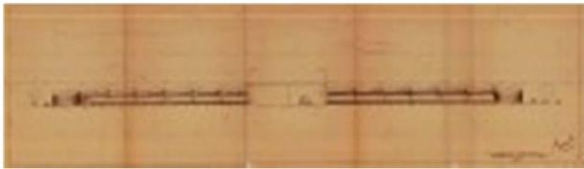


Imagen 118: Plano alzado general del Pabellón Transportable para Exposiciones, 1964



Imagen 119: Plano secciones del Pabellón Transportable para Exposiciones, 1964

Como se ha indicado a lo largo del capítulo, a Pérez Piñero le gustaba difundir su obra, convirtiéndose en un reclamo de las revistas de arquitectura más destacadas del momento¹⁶. Los siguientes éxitos se sucedieron de forma rápida, recibió numerosas cartas de felicitación de los medios de comunicación y empresas que se interesaron por su proyecto, e incluso expuso este proyecto en el Ministerio de la Vivienda dentro del programa que organizaba puntualmente la Exposición Permanente e Información de la Construcción (EXCO).

4.4. Puesta en práctica en obra real de su estructura desplegable: el Pabellón Transportable para la Exposición XXV Años de Paz (1964). Madrid, San Sebastián y Barcelona

En esta parte del texto sobre Emilio Pérez Piñero nos situaremos en el Madrid de 1964. En este contexto, nuestro arquitecto procedente de Calasparra gana el concurso del Pabellón transportable para las exposiciones conmemorativas de los *XXV Años de Paz* después de la guerra, organizado por el Ministerio de Información y Turismo del Gobierno español.

El proyecto presentado culminó 3 años de investigación, desde que en 1961 como alumno de cuarto curso de arquitectura en Madrid presentara un modelo físico estructural plegable con el que ganó también el VI Concurso Internacional de la UIA para diseñar un teatro ambulante.

Con ese modelo revolucionó el panorama de las estructuras y abrió grandes horizontes. Desde ese momento los edificios se podrían transportar, cosa insólita hasta el momento. Sólo algunos casos anteriores, como el del transporte en helicóptero de la cúpula geodésica de Fuller en 1954, habían sentado precedente, pero nunca hasta entonces se había visto que un edificio pudiera reducir su tamaño tan drásticamente para poder ser transportado de una manera tan “limpia” y efectiva. El proyecto que vamos a estudiar a continuación ponía a España a la vanguardia internacional en la construcción de este tipo de estructuras, que hasta entonces sólo se conocía por el modelo/maqueta construido en 1961 para el concurso que organizaba la UIA.

¹⁶ PÉREZ ALMAGRO, M. C. *Estudio y Normalización de la colección de Emilio Pérez Piñero*. Tesis Doctoral Facultad de Historia de la Universidad de Murcia. Murcia, 2013.



Imagen 120: Funcionamiento del modelo plano accionado por el propio Pérez Piñero, recogido en el domunetal "Las estructuras vivas de Pérez Piñero". Ver a partir del minuto 2 el modelo inicial esférico (UIA)

4.4.1. Descripción del Pabellón

Los actos conmemorativos realizados por el Ministerio de Información y Turismo, en colaboración al resto de Ministerios y bajo las directrices de la Comisión Interministerial, más importantes que tuvieron lugar durante los ocho meses y medio de conmemoración de los XXV Años de Paz en España fueron¹⁷:

- Exposición de los logros del régimen denominada “*España 64, XXV Años de Paz*”. *Donde nuestro arquitecto construye el pabellón.*
- Exhibición de carteles: “*España en Paz*”.¹⁸
- Concierto en el Valle de los Caídos¹⁹
- Sorteo especial de Lotería Nacional
- Tirada especial de postales, sellos, medallas y monedas
- Edición de numerosas publicaciones oficiales
- Concursos de poesía, novela, periodismo, radio y televisión relacionados con la temática
- Inauguración de barriadas y hospitales²⁰
- El documental “*Franco: ese hombre*” de José Luis Heredia²¹

¹⁷ *Blanco y Negro*, 1964-12-26. Págs. 51-65. En este artículo se dedicaron varias páginas a resumir la conmemoración de la Paz y hacer balance de los triunfos culturales y deportivos del año. La Exposición síntesis de la labor realizada en la industria, campo, vivienda, enseñanza, turismo; la inauguración en agosto de la Feria de Nueva York; el premio Planeta para Concha Alós, por la novela *Las Hogueras*; el turista 13.000.000 llegó a Málaga; la exposición de Zurbarán en el Casón del Buen Retiro, etc. En el deporte, el Real Madrid se declaró campeón europeo de Baloncesto. La selección española ganaba el campeonato mundial de Hockey sobre patines y España obtuvo la Copa de Europa de Naciones (actualmente conocida como *La Champions League*), tras vencer a la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.

¹⁸ Exposición que recorrió España y en la que se recopiló documentación para el libro titulado *Viva la Paz*.

¹⁹ Con obras de Miguel Alonso, Cristóbal Halffter y Luis de Pablo. Contreras Zubillaga, I. 2011 “El Concierto de la Paz: tres encargos estatales para celebrar el 25 aniversario del franquismo”, Seminario de Historia, Universidad Complutense de Madrid y Fundación José Ortega y Gasset

²⁰ Contemporáneo a estos eventos fue la creación de las barriadas denominadas *XXV Años de Paz* en Valladolid, Málaga o Santa Cruz de Tenerife, y, el Hospital La Paz de Madrid.

²¹ El autor de *Raza*, esta vez recreó la biografía de Franco como protagonista de la historia reciente de España, que se estrenó en Madrid y Barcelona.

*Habla de paz y de victoria, pero de una victoria diferente y más difícil que la de las armas.
De una victoria de la paz, en la que no hay dolor de derrotados; es la victoria de la paz,*

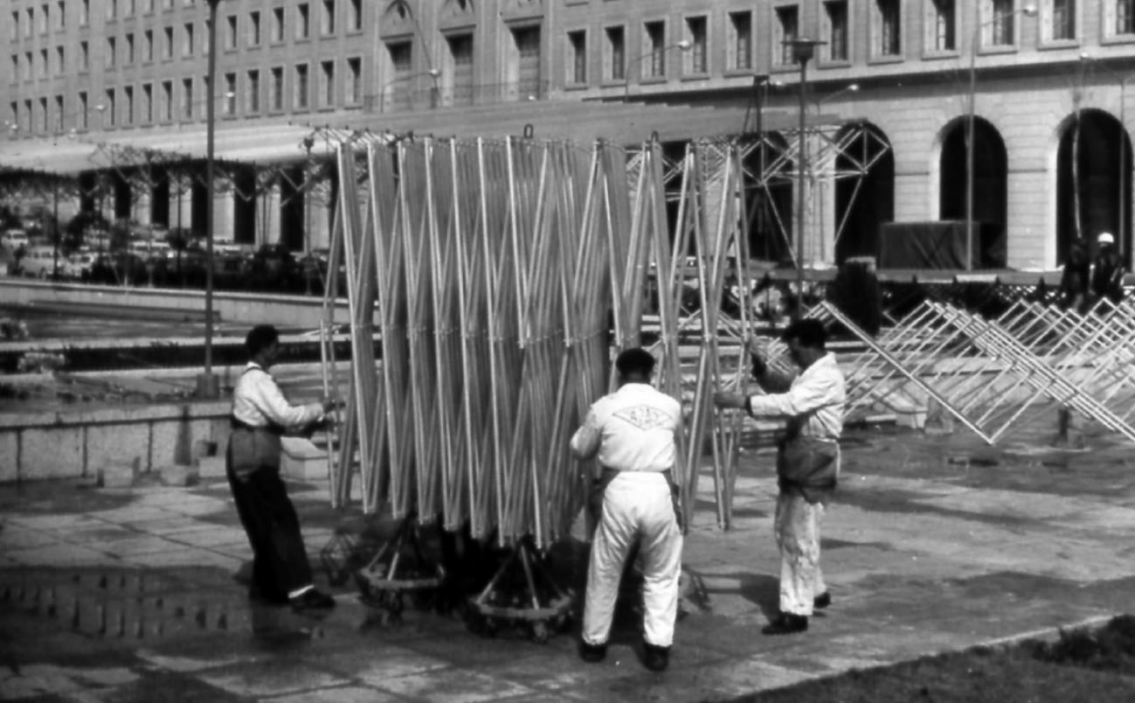


Imagen 121: Trabajadores de CASA uniformados, 1964, Nuevos Ministerios de Madrid



Imagen 122: Trabajadores de CASA uniformados, 1964, Nuevos Ministerios de Madrid

4.4.2. El concurso

A finales de 1963, dos años después de ganar el concurso de la UIA en Londres, se convocó el concurso restringido para realizar la estructura que contendría la exposición *España 64*. Se presentaron tres propuestas: el proyecto diseñado por José Antonio Corrales y Ramón Vázquez Molezún²², la propuesta de Rafael de la Hoz²³, y la de Pérez Piñero.

El 14 de enero de 1964, Robles Piquer²⁴ le comunicaba a Pérez Piñero que tras haber sido examinados los tres proyectos presentados para la construcción del *Pabellón*, la Comisión de la Exposición, tras valorar que la propuesta de Pérez Piñero era la que más rápido y fácil se podía montar y no sin antes comprobar que el arquitecto, pese a ser hijo de un republicano, estaba dispuesto a colaborar con el Régimen de Franco (después del increíble impacto internacional que tuvo que el calasparreño ganara el concurso de UIA en Londres tuvo dos audiencias con el Jefe de Estado, en 1961 y en 1962), había decidido que fuera el suyo el elegido:

Tengo la alegría y la satisfacción de comunicarle que fue elegido su proyecto, por lo que espero que pueda ponerse a trabajar inmediatamente en la realización del mismo.

aspiración antigua y suprema de los hombres que quieren trabajar y vivir hermanados como Dios manda [...]

SÁNCHEZ, A. y HUERTAS, P. *Franquismo vs Franquismo. El laberinto ideológico de la dictadura 1936-1975* Madrid, Ed. Creaciones Vicent Gabrielle. Madrid, 2010.

²² José Antonio Corrales (1921-2010) y Ramón Vázquez Molezún (1922-1993) eran socios desde principios de los años cincuenta. Cabe destacar que en 1958 diseñaron el pabellón español de la Exposición de Bruselas.

²³ Rafael de la Hoz Arderius (1924-2000) ejercía la profesión desde 1951. Cabe destacar que cinco años después, en 1956, obtuvo el Premio Nacional de Arquitectura por realizar el Colegio Mayor Aquinas.

²⁴ Carlos Robles Piquer (1925-2018) fue un político y diplomático español. Su carrera política en la Administración española se desarrolló tanto en los últimos años del franquismo como durante los primeros de la Transición. Entre 1962 y 1967 fue director general de Información y entre 1967 y 1969 de Cultura Popular y Espectáculos. Tras la muerte de Franco, fue Ministro de Educación y Ciencia (1975-1976), en el Gobierno de Carlos Arias Navarro. Fue embajador de España en Italia (1977-1979).



Imagen 123: Operarios de Calasparra, 1964, Nuevos Ministerios de Madrid



Imagen 124: Interior del Pabellón Transportable, 1964, Nuevos Ministerios de Madrid

Felicitándole efusivamente, en mi nombre y en el de la Comisión, quiero ponerme a su disposición para cuantas consultas desee hacerme y para resolver las dificultades que puedan surgir²⁵.

La noticia de que había sido elegida su propuesta fue muy bien acogida por Emilio; la economía familiar estaba en una situación un tanto precaria, vivía en la casa familiar junto con su esposa y sus dos hijos, compartiéndola con sus padres y su hermano Josemaría.

Así que aceptó con gusto empezar a negociar los términos de contrato por el que el Gobierno puso a su servicio las instalaciones de CASA (Construcciones Aeronáuticas S.A.), que se encargaría de dibujar los planos y el joven arquitecto podía disponer de su departamento de Ingeniería para las distintas comprobaciones de la estructura. A Emilio, como arquitecto y técnico, le correspondería un 12,8% del precio total del proyecto²⁶, negociado también con CASA, que tenía su propio presupuesto, y dejaba por escrito la posibilidad de seguir colaborando con la empresa de ingeniería para futuros encargos relacionados con este tipo de estructuras.

Por otro lado, a pesar de la colaboración con CASA, también se acordó que las patentes de la estructura eran del arquitecto calasparreño y que ninguna decisión se tomaría sin su consentimiento y supervisión. También, a partir del 7 de febrero, incorporó en el trabajo de diseño y construcción de la estructura a su hermano José María, que era ingeniero industrial, como director del equipo técnico.

²⁵ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_01_00007. Véase *Apéndice documental*. Casi medio siglo después, durante la entrevista realizada a Robles Piquer, volvió a insistir en esta idea:

Fue para mí tan sorprendente y tan milagroso, casi diría, cuando no sabía uno bien cómo se iba a montar una exposición tan complicada y que de repente apareciera esa fórmula, fue un milagro (AFEPP, FEPP: Archivo de Voz y Palabra).

²⁶ Al final, el arquitecto percibió 975.399,10 pesetas, aproximadamente un 7,1% del precio total de la estructura, que fue 13.802.400 pesetas, no un 12,8% como habían acordado al principio.



Imagen 125: Vista general del Pabellón Transportable, 1964, Nuevos Ministerios de Madrid



Imagen 126: Vista general nocturna del Pabellón Transportable, 1964



Imagen 127: Vista general del Pabellón Transportable, 1964, Plaza de Montjuic de Barcelona

4.4.3. Fabricación y construcción en tiempo récord

Esta obra se realizó y fabricó en muy poco tiempo, entre enero y abril de 1964, en gran parte porque Pérez Piñero contó con la ayuda del servicio de delineación de CASA²⁷. El montaje no empezó hasta abril y duró hasta junio, con la inauguración. Tanto la fabricación como el montaje, necesitó de la presencia del arquitecto en todo momento²⁸.

A pesar de los numerosos borradores acerca de la estructura, no será hasta 1968 cuando Pérez Piñero publique este proyecto:

Realizado con estructuras desplegadas de instalación y transporte muy rápido. Consta de 8000 metros cuadrados de superficie cubierta; distribuida en módulos de 12 x 9 metros y 500 kg. de peso. Tanto la estructura desplegable como la cubierta, de chapas ajustables herméticamente, son de aleación de aluminio.

Cada módulo está constituido por una estructura rectangular plana, que plegada para el transporte ocupa 0,80 x 0,70 metros y cuyo despliegue se realiza en el suelo, con ruedas. La rigidización se efectúa con barras independientes que se conectan tras el despliegue.

Los soportes están rígidamente unidos a la estructura de cubierta y forman con ella un conjunto rígido, similar a una mesa, que no requiere cimentación, ya que la estructura de cubierta, muy flexible, puede adaptarse a los apoyos y admitir cedimientos sin deformarse permanentemente.

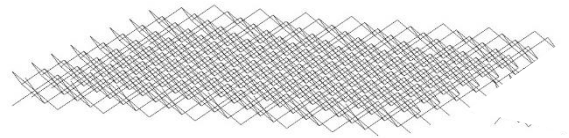
²⁷ De las sesenta unidades documentales que tiene esta serie, las últimas catorce corresponden a planos y ensayos estáticos de la estructura. La parte de cristalería fue llevada a cabo por Cristalerías Tejeiro (AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S2_01_19_00031).

²⁸ [...] le ruego que mañana por la mañana estuviera Vd. A primera hora en la obra de los Nuevos Ministerios para aclarar la situación exacta en que deben colocarse dichos módulos así como algunas dudas que existen respecto al refuerzo de los mismos. AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_01_00023.



Alzado 1

Posición 1: Estructura plana desplegada

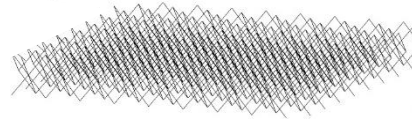


Perspectiva axonómica 1

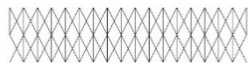


Alzado 1

Posición 2: Estructura plana plegada un 25%

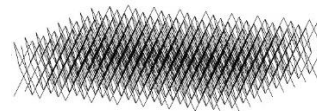


Perspectiva axonómica 1



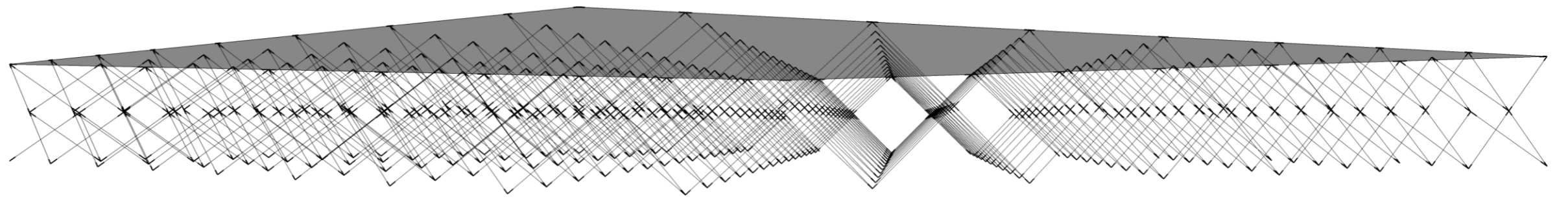
Alzado 1

Posición 3: Estructura plana plegada un 50%

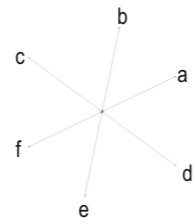
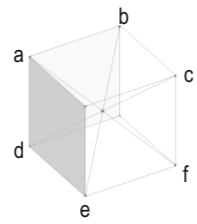


Perspectiva axonómica 1

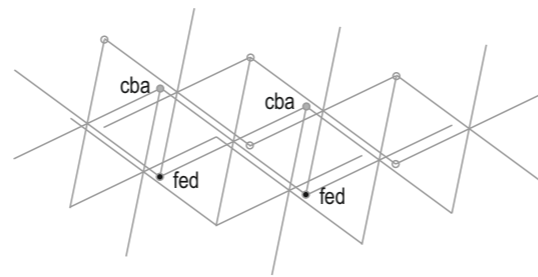
Imagen 128: Distintos momentos del despliegue de la estructura.



Alzado en perspectiva

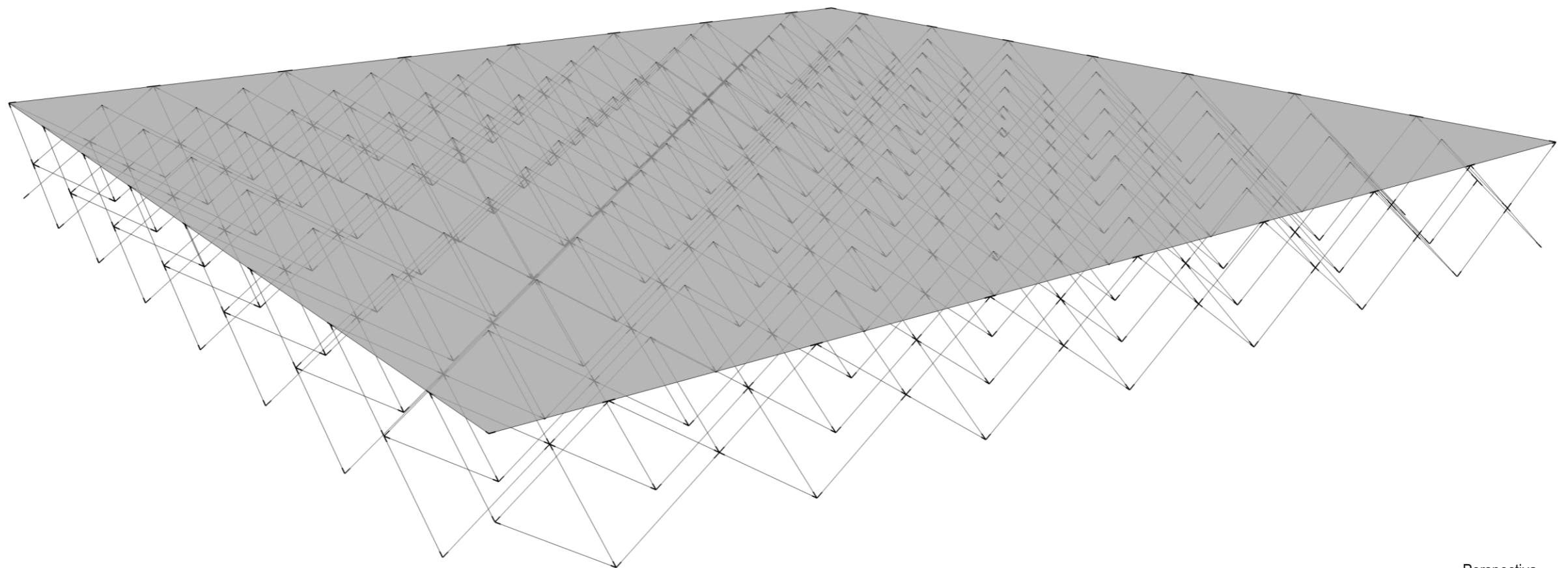


Módulo principal



Unión de los módulos principales

Reconstrucción 3D del Módulo principal del Pabellón conmemorativo de los XXV Años de Paz



Perspectiva

El Pabellón fue proyectado, construido e instalado en los meses de febrero, marzo y abril de 1964 en Madrid, ocupando una planta de grandes espacios abiertos para el verano. Fue desmontado en siete días (a más de mil metros cuadrados diarios), transportándose a San Sebastián, donde se inauguró el agosto de 1964. Nuevamente fue desmontado y transportado a Barcelona, inaugurándose en diciembre de 1964. En abril de 1965 se instaló, la mayor parte, nuevamente en Barcelona, donde se encuentra como instalación permanente. Tanto en San Sebastián como en Barcelona fue instalado en bloques compactos sin patios. Los módulos que forman el Pabellón se encuentran girados sobre una diagonal, que se mantiene horizontal, y superpuestos; de forma que la posición de cada uno se va repitiendo^{29,30}

En las imágenes se puede ver la uniformidad con que vestían los empleados de CASA, con los que el arquitecto estaba muy disgustado por la mala realización de su trabajo y que no volvieron a trabajar con él, frente a la desuniformidad de los operarios calasparreños que trabajaban para Pérez Piñero y que estuvieron contratados para esta estructura y en los sucesivos montajes donde se trasladó el Pabellón.

Este evento tuvo gran acogida entre los medios de comunicación y también por parte del Ayuntamiento de Madrid³¹. Pérez Piñero comenzaba a ser invitado a los eventos conmemorativos, como la ceremonia

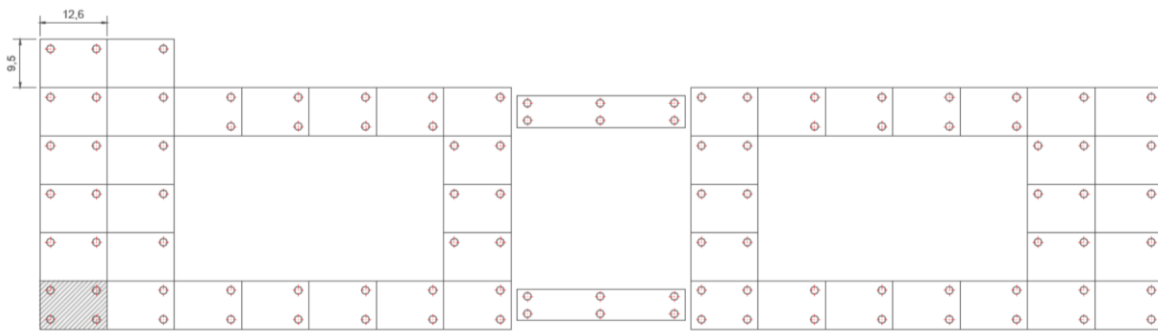
²⁹ El *Teatro Ambulante Desplegable* de 1963 también estaba pensado para ser fabricado en aluminio, sin embargo, el *Pabellón Transportable* para exposiciones es la única obra realizada por Pérez Piñero en este material.

³⁰ PÉREZ PIÑERO, E. *Estructuras reticulares tridimensionales*. Revista Arquitectura nº112, abril, pp1-18. Madrid, 1968.

³¹ *Referencias en prensa y revistas a nivel nacional (hemos omitido las referencias locales por evitar la repetición de información):*

ABC

- 1964-03-28, pp. 8-9: "Nuestra paz cumple XXV Años".
- 1964-05-02, p. 57: "Franco inauguró ayer la exposición 'España 64'".
- 1964-05-25: "Aluminio en la exposición de los 25 años de paz".
- 1964-07-05, p. 60: "La exposición 'España 64' se instalará en San Sebastián en agosto".
- 1964-08-04: "Según 'Life', el Pabellón de España en Nueva York es "la joya de la Feria".
- 1964-09-06: "Un cuadro de Dalí en la Feria de Nueva York".



Imágenes 131: Alzado y planta del despliegue de módulos de 12,6x9,5m en Nuevos Ministerios, Madrid.

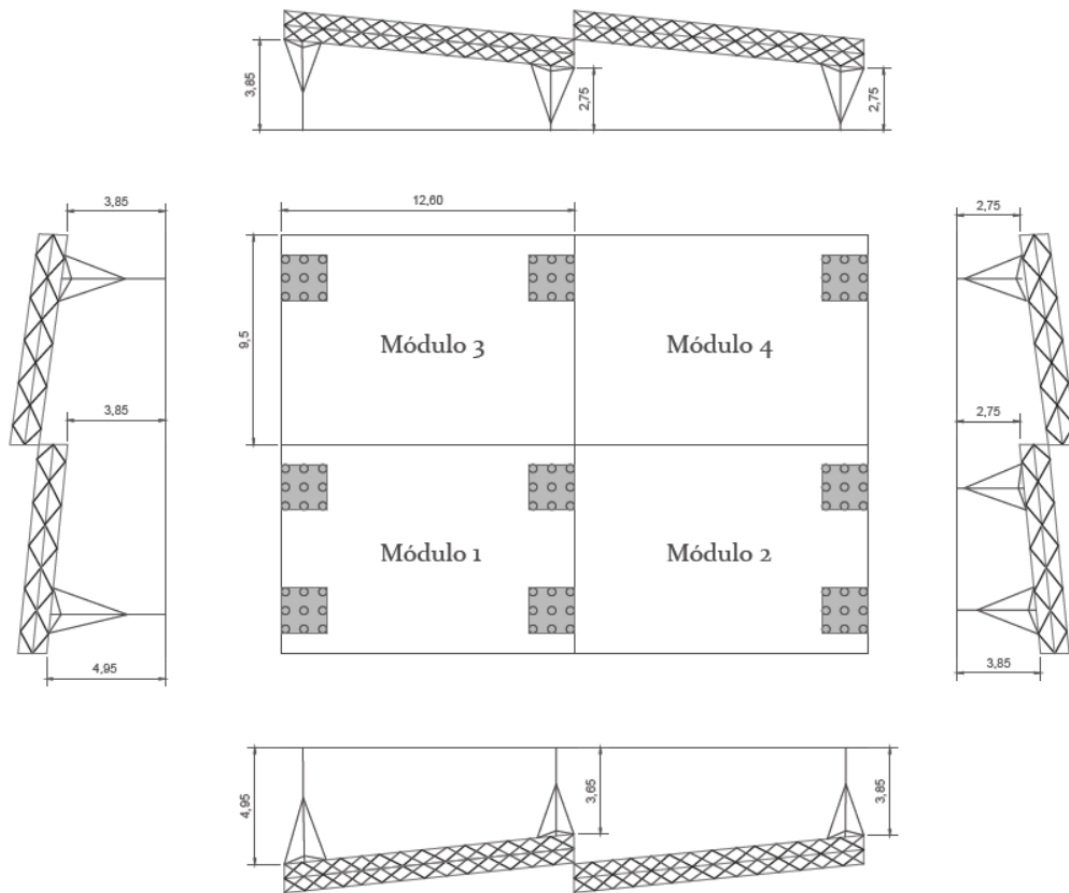


Imagen 132: Medidas y soportes de cada módulo

de inauguración del nuevo edificio de los Estudios Centrales de Televisión Española en Prado del Rey (Somosaguas), el 18 de julio, con motivo de la Fiesta Nacional celebrada por el Régimen³².

Tras la instalación en los Nuevos Ministerios de Madrid esta estructura fue instalada en San Sebastián y Barcelona, los dos últimos reductos de la oposición política al final de la Guerra Civil española³³. Para ello, Pérez Piñero realizó el cálculo de tiempo y personal necesario, elaborando un informe que envió al Subcomisario de la exposición, González Robles³⁴.

Tras ser expuesta de abril a junio en Madrid, en agosto se inauguró en San Sebastián en el barrio de Amara, que en ese momento era un aparcamiento, y después se instaló en Barcelona, en Monjuic, “los dos últimos reductos de oposición política al final de la Guerra Civil” según Robles Piquer. Paralelamente a la sucesión de los actos conmemorativos y un mes antes de que finalizasen, Calasparra quiso homenajear a Pérez Piñero haciéndole entrega de la *Medalla de Oro de la Villa*.

La conmemoración de los *XXV Años de Paz* se clausuró el día 21 de diciembre con la ceremonia de colocación de la primera piedra del Palacio Nacional de Congresos y Exposiciones de Madrid, en la Avenida del General Perón, esquina a la Avenida del Generalísimo³⁵³⁶. A este acto también fue invitado Pérez Piñero. A finales de los años 80, la Dra. Puertas del Río, destacó que en uno de los regimientos

- 1964-10-20: “Revalorización de lo hispánico en Estados Unidos. La Feria de Nueva York, cuya primera fase terminó ya, ha sido la feria de España”.

Blanco y Negro (Madrid):

- 1964-12-26, pp. 51-65: “XXV Años de Paz”.

³² AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_01_00037.

³³ ROBLES PIQUER, C. *Los XXV Años de Paz*, en Memoria de cuatro Españas. República, guerra, franquismo y democracia, Barcelona, Planeta. Madrid, 2011. Págs. 251-261.

³⁴ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_01_00038.

³⁵ SÁNCHEZ, A. y HUERTAS, P. *Franquismo vs Franquismo. El laberinto ideológico de la dictadura 1936-1975* Ed. Creaciones Vicent Gabrielle. Madrid, 2010. Pág 167-168.

³⁶ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_01_00047. ABC, 1964-12-22, p. 89.

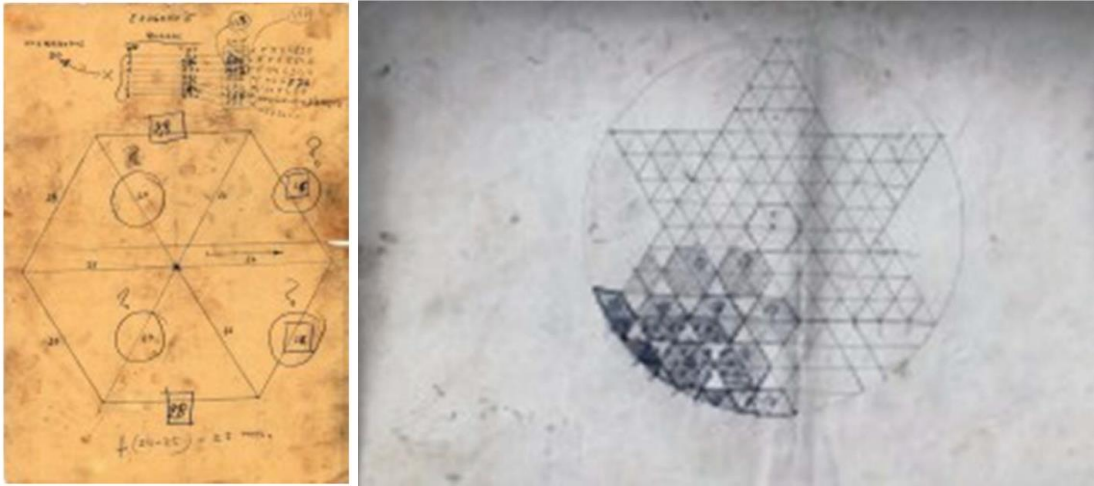


Imagen 133: Planos de taller de Teatro transportable 1965



Imagen 134: Montaje por piezas de conjuntos de barras, principal aportación de Emilio Pérez Piñero a la construcción de cúpulas geodésicas.

pertenecientes a la División Acorazada Brunete, ubicada en Tres Cantos (Madrid), había varios módulos del *Pabellón Transportable*³⁷. Sin embargo, tras cotejar información pedida al Ministerio de Defensa, se desconoce el actual paradero de los módulos. Después de realizar el *Pabellón Transportable para Exposiciones*, Pérez Piñero entró de nuevo en una etapa de experimentación en el campo de las estructuras desplegadas. De esta fecha es la *Cúpula reticular desplegable*³⁸ y la *Cúpula reticular transportable*³⁹ y *desplegable desde un helicóptero*⁴⁰, ambas con una base estructural similar.

4.4.4. Reconstrucción tridimensional de la estructura plegable para el Pabellón conmemorativo de los XXV años de Paz para su mayor comprensión

La reconstrucción tridimensional de la estructura plegable de los XXV Años de Paz es extremadamente sencilla, quizás por su extremada sencillez destaca aún más su brillantez.

En su conjunto la estructura es compleja, pero al descomponerla en elementos que se repiten advertimos la matriz principal: tres barras que se articulan en su punto central y en los extremos de las barras con los extremos de los otros grupos de tres barras articuladas. Así de sencillo.

Desde el punto de vista geométrico el haz de tres barras se puede representar dibujando 3 de las 4 diagonales principales de un cubo. Al repetir ese cubo en una matriz plana y quitarle las caras del cubo y quedarnos únicamente con las diagonales tenemos la estructura utilizada por Emilio Pérez Piñero.

Al representarlo tridimensionalmente se comprende mejor las dificultades que debió tener el arquitecto murciano al representar la estructura ya que se solapan las barras. Su extremada simplicidad hace que esta estructura, fruto de haber trabajado su comportamiento con las articulaciones en los modelos físicos estructurales haya sido un referente en la arquitectura desplegable y transportable.

³⁷ PUERTAS DEL RÍO, L. *Estructuras desmontables y desplegadas. Estudio de la obra del arquitecto Emilio Pérez Piñero*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral inédita. Madrid, 1989. Pág 42.

³⁸ PÉREZ PIÑERO, E. *Estructuras reticulares tridimensionales*, Arquitectura nº112, abril. Madrid, 1968. págs. 6-7.

³⁹ Ibid pág 7.

⁴⁰ Ibid pág 7.

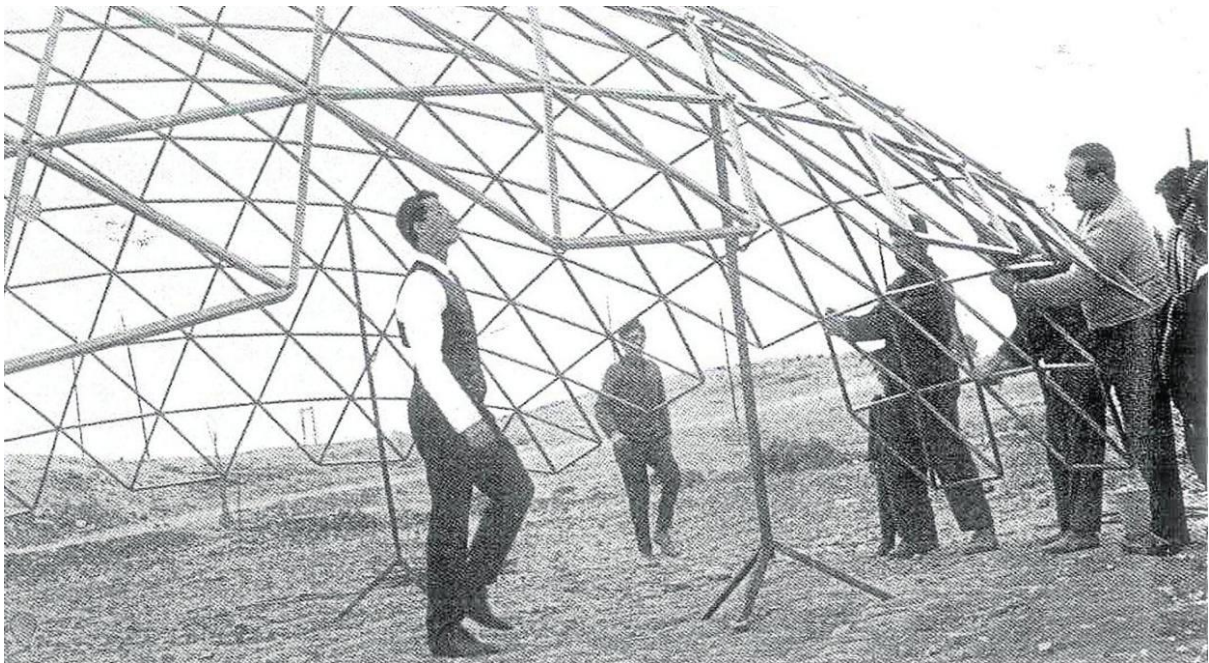
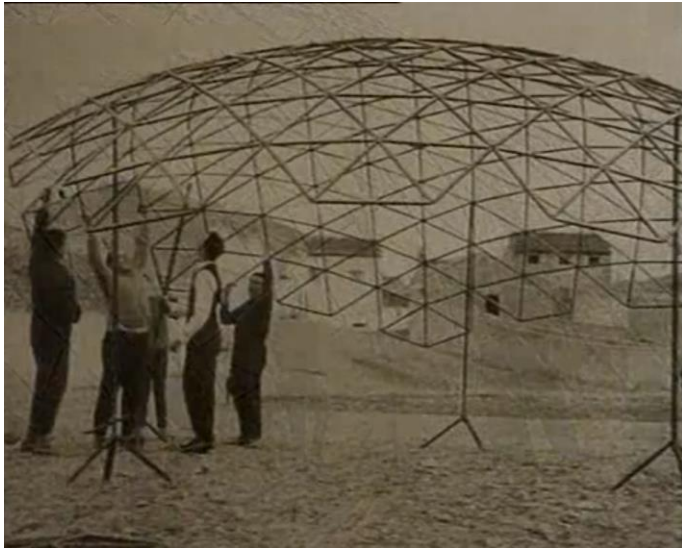


Imagen 135: Estructura durante las pruebas en Calasparra y una vez montada en A Coruña.

Estudiando la geometría de la cúpula que se construyó en 1966 en Galicia y la que se construyó en 1967 en Montreal, es sabido que para la discretización de la esfera Fuller partió de la esferización de la subdivisión del icosaedro, es decir, se divide por la mitad cada arista y se alarga la unión de ese punto, el centro de las aristas, con el centro del poliedro hasta que sea de la misma longitud que el radio. Los nuevos vértices son unidos con los otros vértices contiguos, los originales del icosaedro y los nuevos, generando nuevos triángulos. Esta operación la repite hasta que consigue a frecuencia (subdivisión) adecuada.

4.5. Puesta en práctica de su conocimiento sobre cúpulas: Teatro Transportable para Festivales de España. Un hallazgo en la transportabilidad en 1966

En 1966 de nuevo recibió otro encargo del Ministerio de Información y Turismo, se trataba de un *Teatro Transportable para los Festivales de España*⁴¹. Este proyecto consistía en una estructura móvil para albergar los decimocuartos festivales que tenían lugar durante el verano en algunas de las capitales de provincia del país. Se convertía en el segundo proyecto ejecutado por el arquitecto. Con estas palabras lo describía:

Conjunto de dos cúpulas reticulares macladas. Casquetes de directriz esférica de 31 metros de diámetro y 11 metros de flecha; es decir, relación flecha/diámetro mayor de 1/3. Triangulación poliédrica de la directriz, retícula de una sola capa, cuyo espesor en los nudos es de 6 milímetros. Las cúpulas se unen a lo largo de una cuerda de 22 metros; que subtiende un arco en los centros de los círculos bases de 120°. El arco resistente de la unión se ha conseguido por la simple unión de las cúpulas.

La retícula se ha subdividido en discos hexagonales conectables directamente entre sí. La barra, por tanto, ha perdido su personalidad, ya que estos conjuntos son soldados y se transmiten directamente los esfuerzos.

La "frecuencia" se ha determinado de forma que las piezas pueden ser transportadas yuxtapuestas en un camión. Este sistema se ha desarrollado

⁴¹ Ibid pág 6.



Imagen 136: Estructura durante las pruebas en Calasparra y una vez montada en A Coruña.

pensando en el montaje a base de vueltas sucesivas alrededor de la base sin andamios [...]

*[...] El conjunto, cuya misión es albergar un teatro transportable de 1800 butacas [...]*⁴²

Como se ha comentado en el capítulo sobre Richard Buckminster Fuller, que en aquel momento era la persona conocida por hacer este tipo de construcciones, la invención y construcción de la primera cúpula geodésica fue a principio de siglo XX⁴³, pero no fue hasta 1949 el momento en que se empieza a popularizar, cuando el inventor norteamericano conoce acerca de cómo construirlas. En manos adecuadas, un invento tan radicalmente racional, la materialización de la esfera lo suficientemente grande como para habitarla, se popularizó como la imagen de la construcción del futuro al ser un sistema completamente distinto a los empleados en edificación hasta entonces.

Partiendo desde el icosaedro, el poliedro regular de 20 caras (triángulos equiláteros), que al unir los extremos de las aristas es estable y funciona como estructura, Fuller subdivide cada cara en triángulos iguales entre sí desde donde poder obtener más vértices a una misma distancia del centro, conformándose una pseudo-esfera al tener multitud de vértices con estas condiciones.

La manera en que Fuller rigidiza esta discretización de la esfera es diferente a como lo hace Emilio Pérez Piñero. Fuller rigidiza basándose en las uniones en los extremos de cada barra, Piñero hace conjuntos de barras que se unen entre sí. Este es el gran avance de Pérez Piñero en este campo. Un hecho que agiliza enormemente la rapidez constructiva, objeto del proyecto, al tener muchos menos elementos independientes que unir entre sí.

Desde el punto de vista geométrico, esta discretización de la esfera común a los dos arquitectos, presenta muchas ventajas y también desventajas. Al discretizar la esfera en segmentos y planos triangulares no existe contacto plano horizontal salvo en la línea del ecuador. Esto lleva a utilizar siempre

⁴² Ibid pág 6.

⁴³ La primera cúpula geodésica se construyó en 1925 para el Planetario Zeiss en la ciudad de Jena, al centro-este de Alemania. Se trató de una estructura reticular triangulada con origen distinto a las de Fuller, porque tiene un origen geométrico radial, tomando como eje la vertical mayor del interior de la esfera, y se compuso de anillos circulares que, conforme ascendía la construcción, se iban haciendo cada vez más pequeños hasta llegar a la cumbre.



Imagen 137: Exterior del Teatro ambulante situado en la Plaza María Pita en A Coruña. Agosto 1966. Ver Documental: “Las estructuras vivas de Pérez Piñero” a partir del minuto 2’32 seg. <https://vimeo.com/684393>



Imagen 138: Interior del Teatro ambulante situado en la Plaza María Pita en A Coruña. Agosto 1966. Ver Documental: “Las estructuras vivas de Pérez Piñero” a partir del minuto 2’32 seg. <https://vimeo.com/684393>

media esfera, la sección, circunferencia, mayor, pero no se puede, a priori utilizar de otra manera de apoyar la cúpula de una manera limpia y ordenada. De ahí la elección de Fuller en todas las cúpulas que construye salvo la de la Expo'67, de un hemisferio. Sin embargo, con Pérez Piñero, que muestra menos interés por la coherencia entre las barras y el contacto con el suelo, en este caso elige optar por la tercera parte superior de la esfera, aunque haya barras incompletas en su contacto con el suelo.

De la documentación relacionada con el encargo del proyecto, lo primero que se conserva sobre él es una carta en la que Robles Piquer pide a Pérez Piñero que la estructura sea vista por fuera, es decir, que el proyecto ya había sido encargado con anterioridad, quizás de forma oral al ser el mismo promotor que el proyecto del pabellón para los XXV Años de Paz.

Como en el anterior proyecto, en principio el arquitecto iba a contar con la empresa de ingeniería aeronáutica CASA. De hecho, se conserva la documentación sobre la previsión de gastos que hace la empresa. Al cabo del tiempo ésta le da precio a cada pieza: hexágonos y uniones de todo, pero al final se decanta por hacerlo con los trabajadores de Calasparra que también trabajaron en el anterior proyecto. Les sirve en mi opinión, para poder dar precio previo al contratista y desde ese momento trabaja en su tierra con los diferentes talleres del pueblo que trabajaron a su disposición⁴⁴.

Robles Piquer escribe en junio de 1965 a Emilio, recordándole que el proyecto que habían hablado tenía que estar listo para julio del año siguiente 1966, para que se pudiera construir en Santiago de Compostela. Debía estar todo listo mucho antes: lonas, escenarios, butacas, iluminación... Sabiendo que el arquitecto calasparreño tenía la patente⁴⁵ de unas filas de sillas plegables, le encargó que para este proyecto las introdujera.

En relación con el tema que tratamos en nuestra última entrevista, creo que Vd. podría encargarse de la construcción de las sillas del diseño de las mismas y que actualmente reúne el personal especializado que podría efectuar este trabajo.

Por todo ello, he comunicado a la Dirección General de Cinematografía y Teatro el criterio que mantenemos a este respecto, a fin de que lo tengan

⁴⁴ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_02_00085, ES_FEPP_S3_01_02_00052, ES_FEPP_S3_01_02_00089, ES_FEPP_S3_01_02_00087. En el archivo de la Fundación Emilio Pérez Piñero hay veintiséis planos de taller correspondientes a la estructura de *Teatro Transportable para Festivales de España*.

⁴⁵ Patente de invención nº 116.739 de la *Fila de Butacas plegable*, Madrid, 1965-10-20.

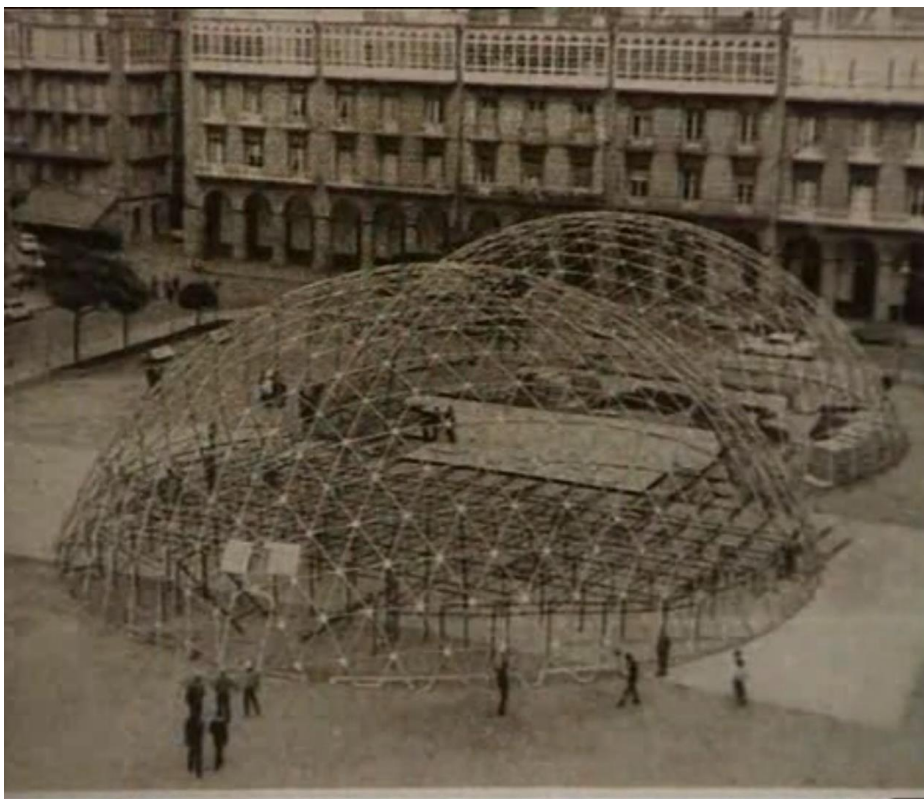


Imagen 139: Construcción en la plaza de María Pita de A Coruña

en cuenta cuando se formalice el oportuno compromiso de adquisición de 1.000 butacas de tubo soldado, con asiento y respaldo de lona, y al precio de 300 ptas. unidad, gasto que, por su cuantía, entiendo puede cubrirse con el total del crédito concedido para la fabricación del Teatro⁴⁶.

No fue hasta marzo de 1966 cuando el arquitecto murciano terminó de diseñar la estructura, pasando inmediatamente a la fabricación de sus piezas y a la construcción de un modelo de escala 1:1, en el huerto familiar de Calasparra. Al construirla se dio cuenta que, pese haber diseñado todo para trabajar con el menor número de andamios y personal técnico, necesitaba una grúa para subir los conjuntos de barras que formaban hexágonos hasta los puntos más altos de esta. Hecho que animó a Pérez Piñero a diseñar su propia grúa que le facilitaría esta labor.

El resultado final fue una estructura de 53m de longitud y una altura hasta la clave de 11 m. Cada cúpula tenía tres salidas, aunque también se podrían improvisar otras en cualquier punto de la estructura. Estaba diseñada con una capacidad para mil veinte butacas de 50 cm de ancho, aunque si se reducían los vestíbulos podrían caber hasta mil quinientas⁴⁷. Las filas de butacas constaban de diez unidades desplegadas, de tubo de acero con asientos y respaldos de lona. La estructura estaba cubierta con tela en fragmentos conectables, realizados en nylon plastificado, de color aluminio metalizado en la cara externa y de color madera de roble en la interna. Al principio, se pensó que la empresa Confecciones Navarra realizara la cubierta, sin embargo, finalmente Toldos Llera se encargó de los textiles.

Como el escenario tenía una altura de 5,80 m, Pérez Piñero valoró dos posibles soluciones para el piso de la sala: la primera consistía en utilizar para la colocación de las butacas el suelo natural del emplazamiento, con una tribuna en la parte posterior de 10 x 25 m; la segunda, con un entarimado de madera en toda la superficie del teatro, siguiendo la curva de buena visibilidad. Esta última versión fue la que incluyó en el proyecto, según el borrador de la memoria⁴⁸, junto a posibles soluciones para evitar la acumulación de agua de lluvia. Otra parte que desarrolló fue el tema técnico de la iluminación, que requería de seis focos con dispositivo para iluminación indirecta de 500 watios.

⁴⁶ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_02_00011.

⁴⁷ La diferencia del número de butacas está presente en las publicaciones de Pérez Piñero, debido a que unas veces consideraba reducido el espacio del vestíbulo y otras no.

⁴⁸ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_02_00013.

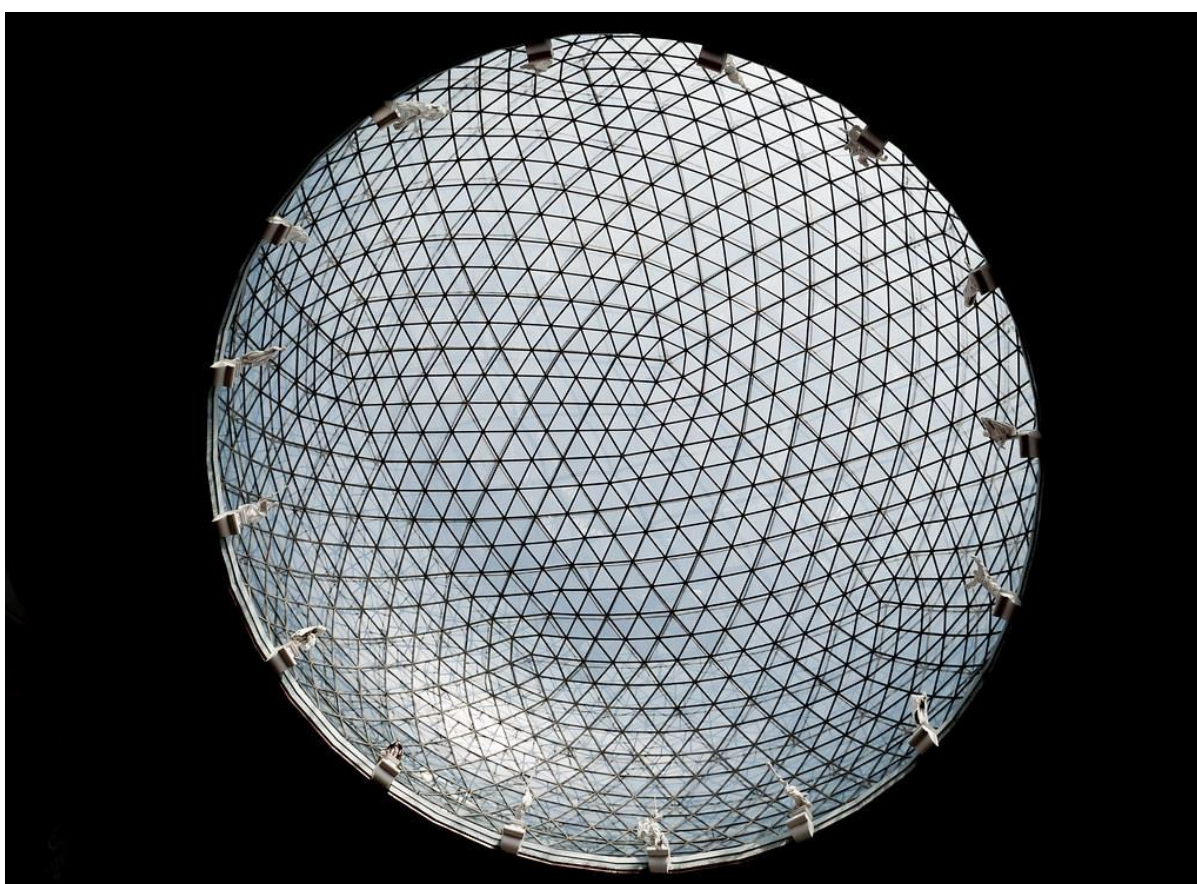


Imagen 138b: Cúpula geodésica análoga que el arquitecto murciano construyó para Dalí en el museo de Figueras.

A finales de abril, Enrique González-Estéfani, Secretario General de la Dirección General de Información, escribió a Pérez Piñero, para confirmarle que el Director General había aceptado el presupuesto de la tarima del teatro, el complementario de la ampliación y el de las seiscientas dos sillas⁴⁹. Además, le confirmó que se había decidido el primer montaje del teatro en A Coruña en torno al día 15 de julio para que fuera inaugurado el día 27, con motivo del comienzo de Festivales de España. González-Estéfani también le informaba de que los encargados de las lonas le habían indicado que el textil que recubría la estructura ya estaba terminado, a falta de las pruebas.

El 28 de junio salieron de Calasparra, dirección a A Coruña, ocho camiones que transportaban los 80.000 kg. de hierro que componían la estructura. Junto a Pérez Piñero, que fue el inventor y contratista de la obra, habían trabajado, desde el mes de marzo de 1965, los operarios calasparreños. Era el primer proyecto en el que había conseguido formar un equipo de artesanos especializados en diferentes oficios, que dejaron de lado su actividad diaria para colaborar con él. Este equipo estaba formado por Isidoro García en la ejecución de los tableros de madera del piso, Diego García Donate en el montaje de las estructuras sustentantes de los tableros, Jesús Valero Sánchez en el transporte de la estructura, y otros colaboradores como Pedro Torrente García, Francisco Valero Belda, Francisco Gisbert Tarrafeta, Francisco Fernández Vicente y Francisco Moya Llorente⁵⁰ en diferentes oficios. Un mes después, el día 1 de agosto, el Ministro de Información y Turismo, Fraga Iribarne, impuso la *Encomienda de Isabel la Católica* a Pérez Piñero durante el acto de inauguración del *Teatro Transportable de Festivales de España*⁵¹.

⁴⁹ AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_02_00016. Para documentar el expediente pidió a Pérez Piñero que refundiera en un solo expediente los presupuestos que ascendían a la cantidad de 1.077.800 ptas. Este presupuesto saldría de un fondo aparte al presupuestado inicialmente.

⁵⁰ En el archivo de la Fundación Emilio Pérez Piñero hay facturas emitidas de cada uno de los operarios mencionados contra la Dirección General de Información del Ministerio de Información y Turismo: AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_02_00019-00027.

⁵¹ Un hecho a destacar con motivo de este proyecto, es que los padres de Pérez Piñero escribieron a su hijo, que estaba en A Coruña junto a su esposa y a sus dos hijos, para saber de ellos. También le contaron que habían anunciado el programa televisivo de la noche del sábado desde Galicia, y que verían por si salían. Como parte de la investigación llevada a cabo durante este estudio, se ha escrito a la Filmoteca Nacional y a Radiotelevisión Española, para saber si existe la grabación del mismo y si era posible disponer de una copia, sin embargo, nos han indicado que no hay constancia de ningún programa relacionado con la inauguración del *Teatro Transportable para Festivales de España* (AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S1_02_00093).



138c: Durante la construcción de la cúpula para el Museo de Figueras.

Para dar publicidad a tal evento se editó un cuaderno con la *Programación de Festivales de España 1966. La Coruña VIII Festival II Festival de Música, 28 de julio al 31 de agosto*⁵², presentado por el escritor Wenceslao Fernández Flores. En el Teatro Colón de A Coruña se proyectaban galas de música clásica, recitales líricos, zarzuela y ópera⁵³, mientras que en la estructura de Pérez Piñero tuvieron lugar los eventos de carácter popular:

- Compañía *Lope de Vega: La Celestina, Corona de Amor y Muerte, Calígula*.
- Festival folklórico *Así es Galicia, Cantigas da Terra, Follas Novas, Aturuxo*
- Presentación del Ballet Clásico de París con la Orquesta Municipal de Valencia
- En directo para la Televisión Española: Noche del Sábado
- Concierto popular por la Orquesta Sinfónica de la Radiotelevisión
- II Certamen de teatro (18-23 de agosto): *El Barberillo de Lavapiés, La Bruja, Los Gavilanes, Katiuska, La Verbena de la Paloma, Gigantes y Cabezudos, El Divino Impaciente, Angelina o el honor de un brigadier*. Las compañías líricas que actúan en estas representaciones son *Amadeo Vive* y *La Farándula*.

En el mes de diciembre de 1966 Vallecas acogió el *Teatro Transportable para Festivales de España*.

Hasta el año 1969 no se volvieron a tener noticias de esta estructura, cuya propiedad pasó a ser del Ayuntamiento de Hospitalet de Llobregat que instaló en Can Serra⁵⁴.

⁵² AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_02_00031.

⁵³ Programación del Teatro Colón: concierto homenaje a Manuel de Falla, en el XX aniversario de su muerte, por la Orquesta sinfónica de la Radio Televisión Española, bajo la dirección de Enrique García Asensio. Recital lírico de Isabel Penagos. La Compañía Lírica titular del Teatro de la Zarzuela con la Orquesta Sinfónica de Madrid interpretan *La rosa del azafrán, La del Soto del Parral, La Calesera, La Tempranica, Tonada de las mujeres listas y Los payasos*. Este XIV Festival de los Amigos de la Ópera en la Gala inaugural representa *Rigoletto* con la coral polifónica *El Eco*, y otras óperas como *Las bodas de Figaro, Lucía de Lammermoor*, y en la clausura, *La Sonámbula*. Por último, está el Concierto-Homenaje a Enrique Granados en el cincuenta aniversario de su muerte (AFEPP, FEPP, nº de referencia: ES_FEPP_S3_01_02_00031).

⁵⁴ Es un barrio de Hospitalet de Llobregat situado en el área metropolitana de Barcelona.

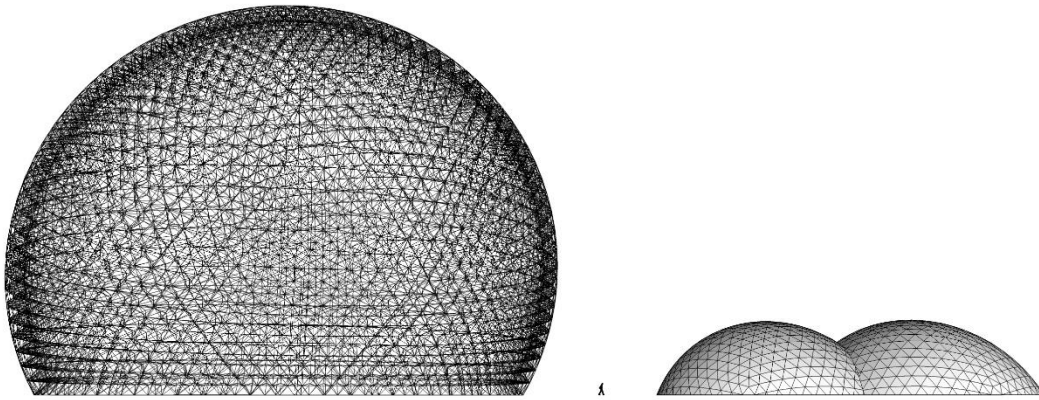


Imagen 145: Comparación de la cúpula geodésica de Fuller con las cúpulas macladas de Pérez Piñero.

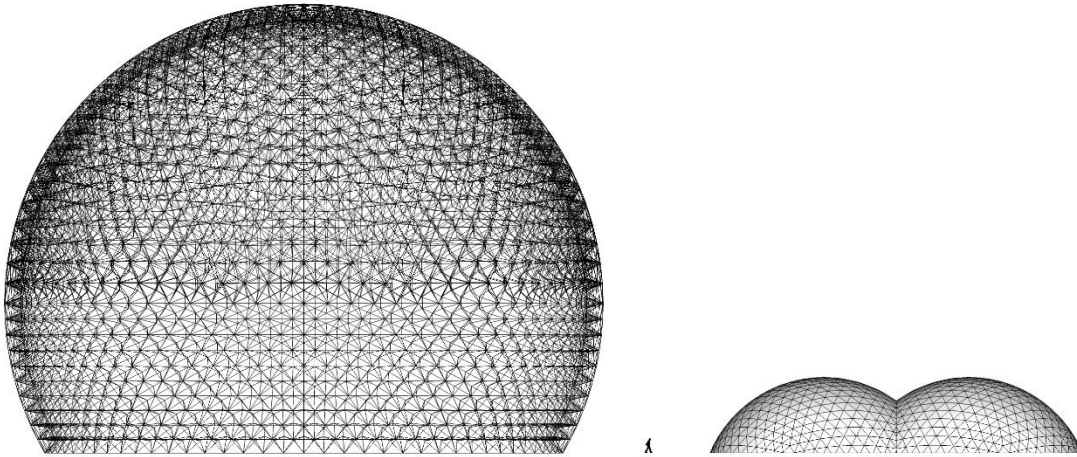
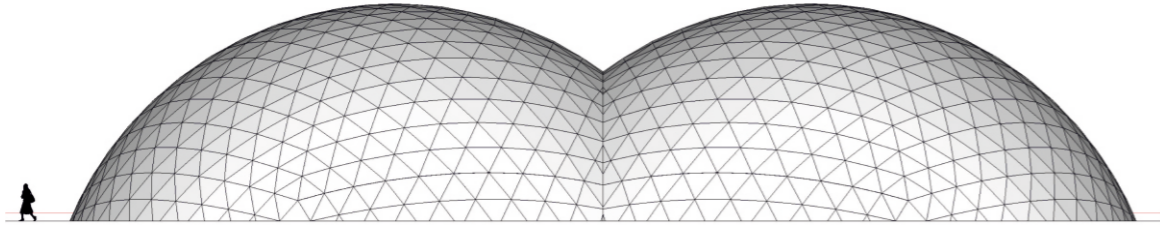
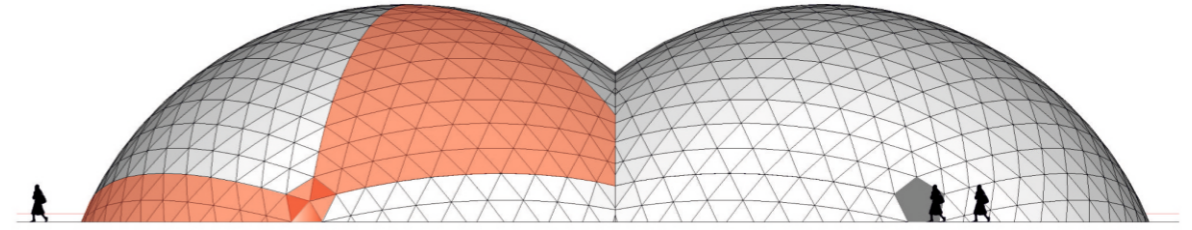


Imagen 146: Vista ortogonal

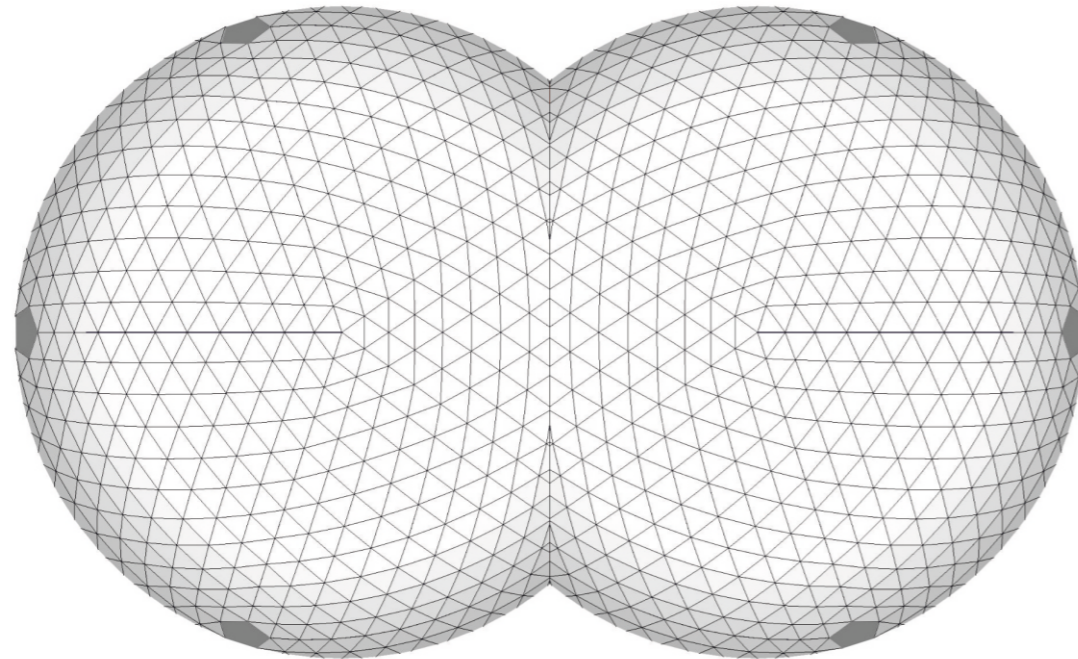


Alzado

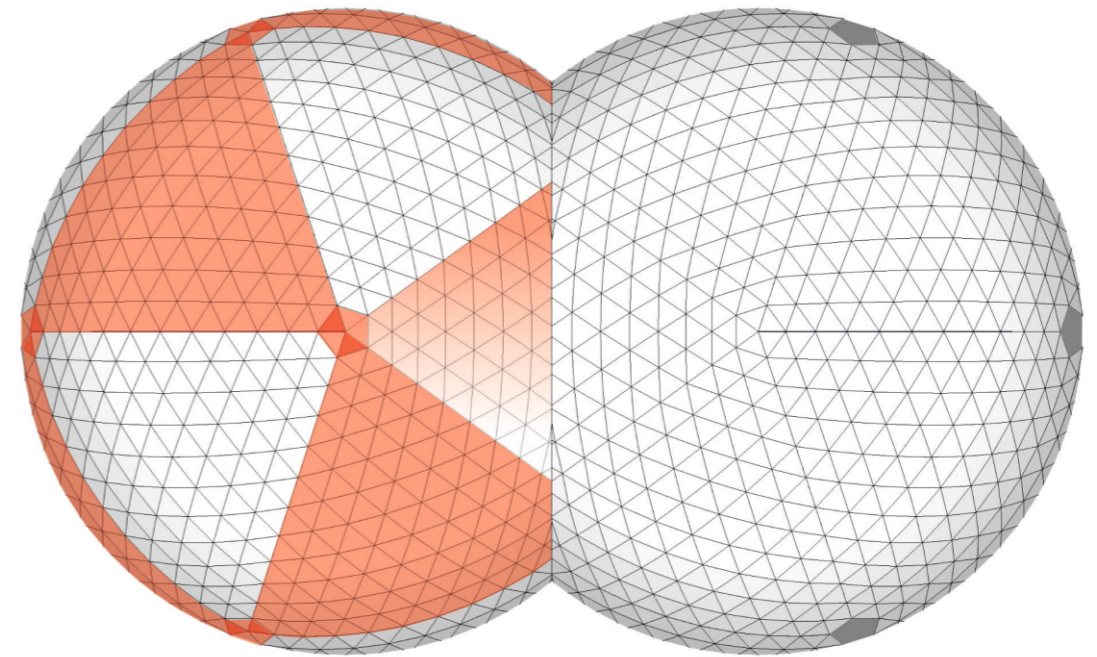


Alzado explicativo del módulo repetido de la estructura

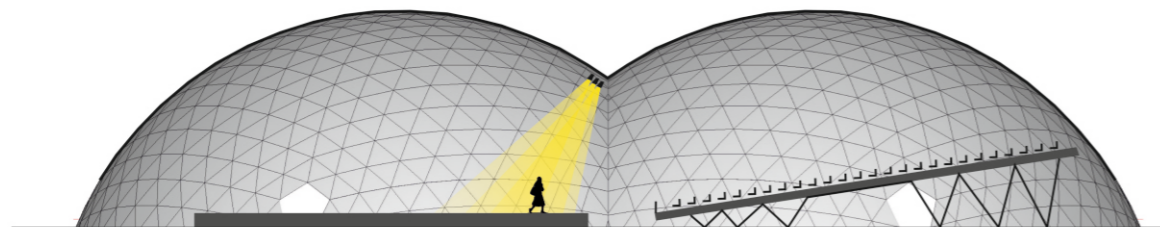
Reconstrucción 3D del Pabellón para los Festivales de España de 1966



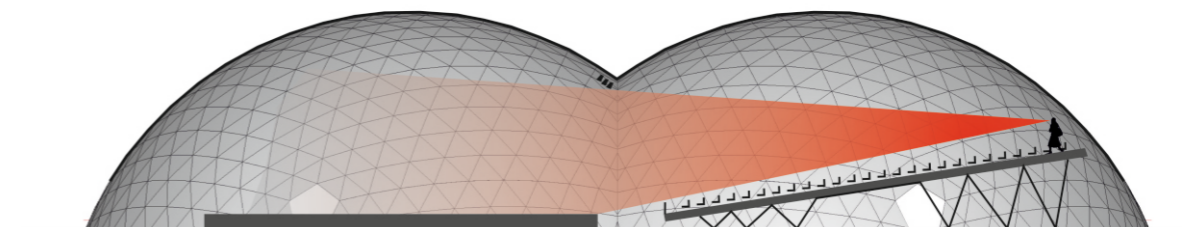
Vista Aérea



Vista Aérea explicativo del módulo repetido de la estructura



Sección principal. Iluminación del escenario



Sección principal. Situación de las butacas

Con fecha de 22 de noviembre de 1968, Vicente Capdevila, en calidad de ponente de cultura del Ayuntamiento de Hospitalet escribió a Manuel Ortiz Sánchez, Delegado Provincial de Información y Turismo de Barcelona para informarle de que en la primavera del año siguiente estaba prevista una campaña de teatro infantil en la ciudad. Capdevila, que había escrito a la Junta Provincial de la Asociación Española de Teatro Infantil y Juvenil, sin obtener respuesta alguna, decidió ponerse en contacto con Ortiz Sánchez. A las pocas semanas M^a Nieves Sunyer Roig, Presidenta de esta Asociación escribió a Capdevila para agradecerle, por un lado, el valor educativo concedido al teatro, y por otro para que contara con su colaboración con el fin de que integraran a las asociaciones provinciales de Barcelona, Gerona y Valencia en los actos, siempre y cuando desde el Ayuntamiento de Hospitalet se sufragaran gastos de estancia y desplazamiento.

En enero de 1969, Capdevila se dirigió a Robles Piquer, Director General de Cultura Popular, para informarle de que deseaba recoger documentación para organizar los diferentes ciclos de espectáculos en el *Teatro Portátil (La Carpa)*. Pretendía que las compañías que anteriormente habían actuado en el *Teatro Transportable de Festivales de España*, pudieran hacerlo en Cataluña.

Pasaron los años sin tener noticias de la estructura realizada por Pérez Piñero, hasta mediados de la década siguiente, cuando el Ayuntamiento de Hospitalet tramitó un expediente con la aprobación del gasto para el desmontaje y montaje del *Teatro Portátil*, realizado por la empresa Cerrajería y Construcciones Metálicas F. Soriano. Desmontó la estructura que estaba instalada en Can Serra y la instaló en Can Buxeres, donde se instalaría “una especie de invernadero de plantas”, según indicaba el expediente que fue aprobado por el pleno del Ayuntamiento el 23 de abril de 1976.

Después de este documento el Arxiu de Hospitalet no ha vuelto a tener noticias de la estructura de Pérez Piñero, tan sólo conserva una imagen de los años ochenta, cuando estaba instalada en un solar de la ciudad.

4.5.1. Reconstrucción tridimensional de la estructura del Pabellón de los Festivales de España de 1966 para su mayor comprensión.

En este caso se trata de una cúpula geodésica con origen en un icosaedro, como en el caso del Pabellón de los Estados Unidos de la Expo'67 de Montreal pero el caso de la reconstrucción tridimensional del pabellón de Emilio Pérez Piñero es más sencillo por tratarse de una estructura monocapa que fue diseñada para montarse en conjuntos de barras ya fabricadas.



Imagen 146b: Emilio Pérez Piñero y Dalí. Estructuras desplegadas para la obra del artista.

Como ya se explicó en el caso del Pabellón de Estados Unidos de Richard Buckminster Fuller, la reconstrucción tridimensional virtual del Pabellón nos arroja una información muy valiosa sobre la dificultad de su construcción.

Por un lado, en ambos casos es preciso saber que es imposible que todos los segmentos sean de la misma longitud al discretizar una esfera, éstos tendrán que ser de la longitud más parecida posible, pero no idénticos.

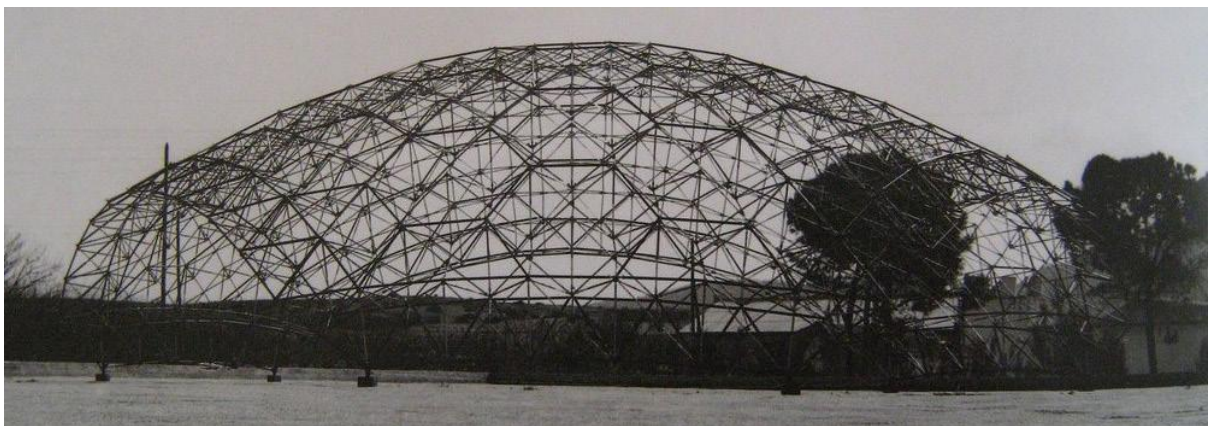
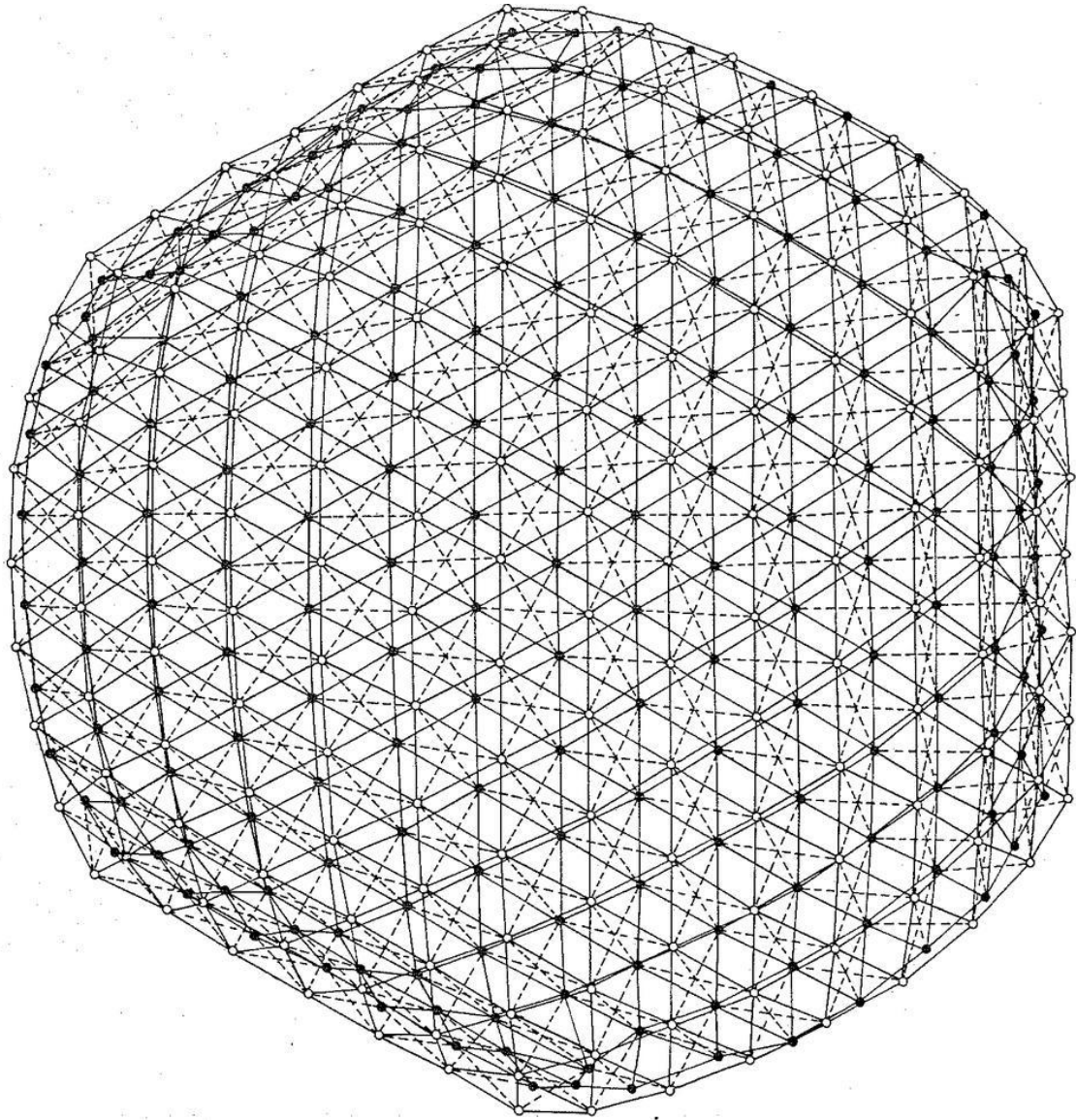
Por otro, también ha de cumplir que todos los vértices del gran poliedro, han de estar todos a la misma distancia del centro.

Afortunadamente para el que representa tridimensionalmente y para el que fabrica los elementos de una cúpula geodésica como las que construyeron Fuller y Piñero, hay muchos elementos que se repiten y por tanto se pueden fabricar en serie. Y para el correcto curso de la construcción, tanto digital como física, hay que tener en cuenta dos aspectos fundamentales: seguir meticulosamente un orden estricto en el cálculo gráfico, y que la “plantilla” inicial que se vaya a hacer repetir sea especialmente precisa para que todas las piezas encajen a la perfección con el resto de la geometría de la cúpula.

Estudiando la geometría de la cúpula que se construyó en 1966 en Galicia y la que se construyó en 1967 en Montreal, es sabido que para la discretización de la esfera Fuller partió de la esferización de la subdivisión del icosaedro, es decir, se divide por la mitad cada arista y se alarga la unión de ese punto, el centro de las aristas, con el centro del poliedro hasta que sea de la misma longitud que el radio. Los nuevos vértices son unidos con los otros vértices contiguos, los originales del icosaedro y los nuevos, generando nuevos triángulos. Esta operación la repite hasta que consigue a frecuencia (subdivisión) adecuada.

Desde el punto de vista de la representación de la geometría del Pabellón, se observa un cuidadoso tratamiento de cada elemento para que nada, ni visual ni materialmente, desvirtuase su condición esférica: la longitud de cada barra, cuanto más pequeña más sensación esférica del poliedro construido, la homogeneidad, conseguida por asemejar lo máximo posible todos los elementos, etc.

De la misma manera que ocurre en la representación, lo que ocurre también en la simulación del comportamiento estructural es que los elementos que se repiten en posiciones idénticas, pero en otros sectores de la cúpula, se comportan de manera idéntica, con lo que el comportamiento estructural es más ordenado.



146c: Último proyecto de cubierta desplegable a escala 1:1 que quedó en versión de prueba.

4.6. Epílogo

El trabajo con modelos físicos en Pérez Piñero tiene un papel fundamental dentro del proceso de proyecto. También le sirve después para explicar las bondades de su idea, pero sobre todo para comprobar, experimentar y ganar en seguridad en los conceptos que maneja y así poderlos manipular con garantías de buenos resultados. Es el modelo la herramienta auxiliar que tiene su cerebro para probar los conceptos y así poder avanzar.

La puesta en práctica de sus ideas sobre el modelo, que sirvió para conocer a fondo la geometría y comportamiento estructural de estructuras desplegadas y cúpulas, son claves para su posterior materialización. En algunos casos, como en el de las estructuras plegables, su representación es tan compleja, porque se solapan las barras en cualquier vista elegida, que le es más sencillo construir un modelo físico que representarlo. De ahí que se conserven tan escasa documentación gráfica de planos y detalles, porque para el arquitecto murciano fue más sencillo construir sus ideas que representarlas gráficamente.

De su estudio concluimos que las realizaciones de los modelos le permiten ver, al arquitecto murciano, mucho más allá que su intuición inicial. Esta intuición queda enriquecida por la acción de la materia puesta en carga y con ella se fueron complejizando y perfeccionando las estructuras. Lástima que perdiéramos a este genio tan joven, cuántas novedades traía consigo esta manera de trabajar.

Cubierta del MULTIHALLE DE MANNHEIM (1970-1975)

La comprensión del modelo como principio generador de forma de proyecto

Frei Otto

5. La Cubierta del MULTIHALLE DE MANNHEIM (1970-1975)

5.1. Introducción

5.2. Descripción del Pabellón Multihalle. Desde el concurso hasta la construcción.

5.3. Modelos de representación, de comprobación del comportamiento estructural y de resistencia de las distintas solicitaciones.

5.4. Epílogo. Método de investigación de Frei Otto, su aportación a la investigación con modelos físicos y reconstrucción tridimensional del Pabellón para su mayor comprensión.

5.1. Introducción

Mannheim es, después de Stuttgart y Karlsruhe, la tercera ciudad de Baden-Wurtemberg, uno de los dos estados federados del sur de Alemania. Una ciudad que ha pasado casi desapercibida en la historia pese haber acogido grandes hitos de ella en relación al desarrollo de la tecnología que hoy disfrutamos.

Aunque el primer auge cultural de la ciudad fue en 1720 con el inicio de la primera orquesta moderna promovida por Carlos III Felipe de Neoburgo (166-1742)¹, no fue hasta 1817 cuando en el seno de esta ciudad se empezaron a fraguar grandes sueños de la humanidad. El barón Karl Freiherr Von Dais (1785-1851) construyó en Mannheim la primera bicicleta del mundo, aún sin pedales. Un invento que revolucionaba la visión del transporte, poco menos que era el primer sustituto del caballo, una máquina tan ligera y sencilla que era capaz de multiplicar la resistencia y velocidad del hombre en desplazamientos largos. Algunos escépticos dudaron de su utilidad al comprobar que su estabilidad dependía del movimiento, pero los resultados, que aún disfrutamos, hablan de su gran triunfo.

Algo más de 60 años después, también en Mannheim en 1886, Carl Benz patenta su “vehículo propulsado por motor de gas” y realiza la primera prueba el 3 de julio. El 5 de agosto de 1888 su mujer Bertha Benz, hace el primer recorrido interurbano de un coche desde Mannheim hasta Pforzheim. Muchos lo habían intentado antes como Nicolas-Joseph Cugnot en 1769, con el Fardier, el primer vehículo a vapor, demasiado pesado, caro y ruidoso. También lo intentó William Murdochen 1801 con una réplica de locomotora reducida que tampoco llegó a “cuajar” por motivos muy parecidos.

De nuevo en esta ciudad y gracias al diseño de una máquina mucho más ligera que la que los más recientes hallazgos de la época en torno al desarrollo del nuevo modelo de transporte, cambiaría el rumbo de la técnica desde entonces.

Pese a estos grandes inventos, el país tuvo una entrada lenta en la industrialización; Alemania era un país subdesarrollado cuando Gran Bretaña ya estaba muy desarrollada a principios del siglo XIX. Sin embargo, a lo largo del siglo y hasta la primera guerra mundial, Alemania logró una

¹ Este monarca, tras trasladar su corte de Heidelberg a Mannheim, comienza a construir el palacio y la transforma en la ciudad residencial de la corte. Inicia así la época dorada de la ciudad donde florece la vida cultural en artes, ciencias y comercio. Esta época durará poco, no llega a 60 años, ya que, en 1778, el sucesor de Carlos Felipe, Carlos Teodoro del Palatinado y Baviera (1724-1799), traslada su residencia a Munich, frenando el florecimiento de la ciudad.

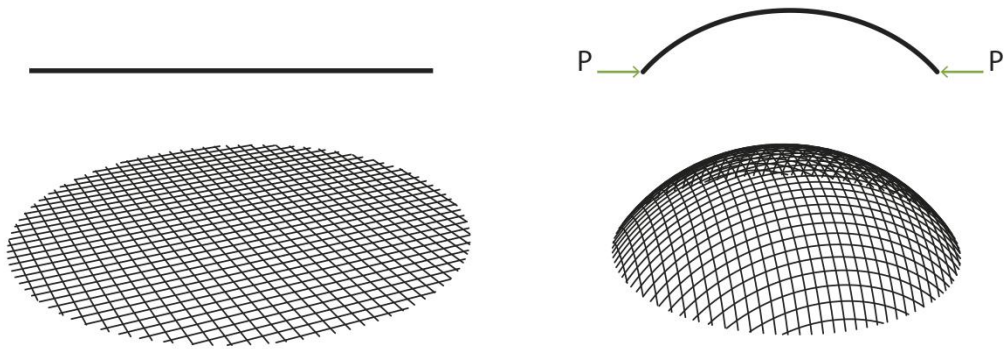


Imagen 147: Esquema de funcionamiento estructural del Multihalle. Estudio gráfico realizado por la Universidad de Princeton. Fuente: <http://shells.princeton.edu/Mann1.html>. Visitado 20 de diciembre de 2017.



Imagen 148: Maqueta colgante tridimensional. Foto de Uwe Dettmar



Imagen 149: Fotografía aérea. El actual recubrimiento es blanco sin brillo pero el original era negro y brillante

industrialización bastante rápida y superó a Gran Bretaña en varios sectores de industria hasta convertirse en potencia europea en el advenimiento de la primera guerra mundial.

Después del periodo de las dos guerras mundiales (1914-1918 y 1939-1945), la ciudad y todos sus proyectos quedaron destruidos casi por completo, ya nada hablaba de allí de lo que en su día fue esta ciudad. Mannheim, como casi todo el resto de Alemania y gran parte de Europa, tuvo que empezar de nuevo de cero. Pocos medios, poca ayuda... los días de gloria llegaron a parecer parte de cierta mitología.

Pero poco a poco volvió a despertar. En 1967 logra ser ciudad Universitaria y en 1975 acoge otra gran proeza tecnológica, esta vez aplicada a la arquitectura, de la mano de Frei Otto, que ha llevado muy lejos a la tecnología aplicada a la construcción; el Multihalle de Mannheim (Ver Imagen 149).

De nuevo un invento revolucionario. De nuevo algo que muchos habían intentado, pero con resultados muy poco satisfactorios, pesados, inviábiles; flexionar la celosía más grande y delgada del mundo para cubrir una sala de exposiciones.

Esta vez la ligereza al servicio de la optimización, conjugando resistencia y bajo coste, dio un resultado de gran belleza natural a esta cubierta gigante hecha a mano.

Diseñada por Frei Otto para ser sólo usada temporalmente, ante la gran acogida del público a este edificio tan singular, fue declarada de tan alto interés que se ha conservado hasta nuestros días, algo más de 43 años después.

Pese a ser una “hazaña” constructiva tan interesante, no obtuvo, incomprensiblemente, tanto reconocimiento como otras obras de Frei Otto como el Estadio Olímpico de Múnich o el Pabellón Alemán de la Expo'67 donde, también utilizó el comportamiento estructural para optimizar el material de construcción y otorgarle así una gran belleza. (Ver Imágenes 150-152)²

Para Frei Otto suponía un logro conseguir estabilizar una cubierta tan delgada trabajando a compresión evitando el pandeo. En anteriores proyectos, trabajando a tracción, era más sencillo lograr un punto estable.

² Otto también se muestra también crítico con su propia obra. Por ejemplo, considera que el Estadio Olímpico de Múnich podría haberse realizado mucho más ligero, en ese sentido no es una obra tan depurada a pesar de su fama internacional. Frei Otto prefiere el Aviario del Zoo de Múnich, que es una obra en la que su materialidad, en el límite, sí está en el máximo nivel de ligereza que tienen siempre como objetivo sus obras y proyectos.



Imagen 150: Grandes obras de Frei Otto: Aviario de Múnich.



Imagen 151: Grandes obras de Frei Otto: Pabellón Alemán de la Expo'67 en Montreal.



Imagen 152: Grandes obras de Frei Otto: Estadio Olímpico de Múnich. Todas ellas funcionando a tracción. El Multihalle permite dar un nuevo rumbo a la investigación de Frei Otto.

Esta artificial puesta en marcha de procesos naturales en búsqueda de la autoformalización es la esencia de la investigación de Frei Otto.

Es la autoformalización la que permite que la producción humana sea también natural en lugar de artificial y la tarea del arquitecto será construir el “edificio biotópico”, la ciudad como un sistema ecológico, la manera de obtener el edificio con la mínima masa, o con la mínima energía empleada.

Con procesos de autoformalización, el entendimiento de las geometrías contenidas o interpretables de la naturaleza ha sido una de las constantes de la sistemática labor de Frei Otto a lo largo de los años. La naturaleza ha sido vista por el arquitecto alemán como modelo de aprendizaje geométrico en el que las cosas se resuelven fácilmente, con el mínimo esfuerzo.



Imagen 153: Portada del dossier de propuestas para el Multihalle.

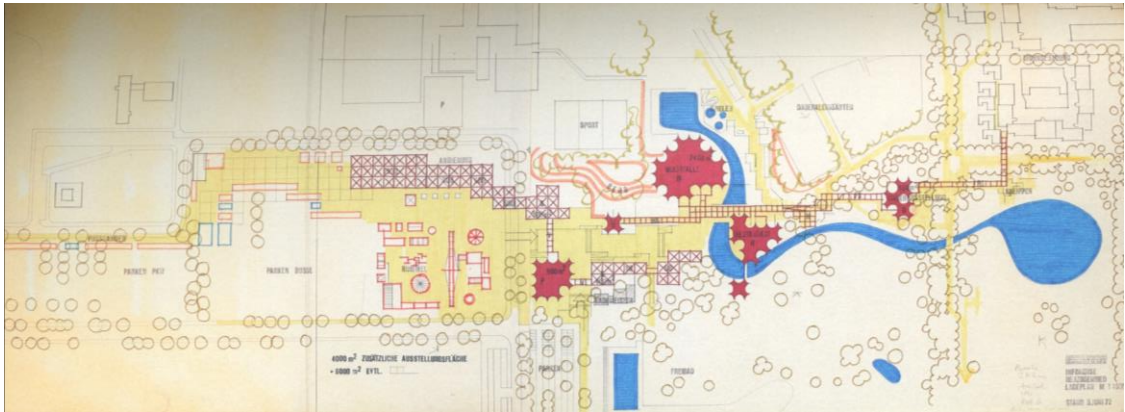


Imagen 153: Propuesta 1 anterior a la final. Pequeños módulos dispuestos en torno a un camino principal



Imagen 154: Propuesta anterior a la final. El Pabellón temporal iba a estar cubierto por una membrana tensada con cables.

5.2. Descripción del Pabellón Multihalle. Desde el concurso hasta la construcción.

En enero de 1970 se decidió celebrar el Bundesgartenschau³ de 1975 en Mannheim. Carl Mutschler & Partners (Carlfried Mutschler⁴ y Joachim Langner⁵) de Mannheim fueron seleccionados como arquitectos y Heinz H. Eckebrecht⁶ de Frankfurt como arquitecto paisajista para el Herzogenriedpark⁷. El edificio requerido debía ser un salón polivalente, y debía contener un restaurante.

Una característica propia del sitio, una llanura del Rin, era un gran montículo formado a partir de material de demolición acumulado de la guerra. Al ver aquello el arquitecto paisajista quiso una continuación de la forma montañosa por medios arquitectónicos.

Después de trabajar algunas propuestas tan ambiciosas como irreales (ver imágenes 155 de las propuestas anteriores al proyecto final en el que la cubierta iba a estar suspendida por globos), los arquitectos recordaron los ensayos de flexión de una celosía en Essen (ver imagen 165) de Otto y se reunieron con él en su estudio de Warmbronn. Después de algunos intentos formales

³ La Bundesgartenschau (abrv. BUGA) es la exhibición hortícola bienal Federal de Alemania. También cubre temas como el ajardinamiento. Tiene lugar en diversas ciudades, cambiando la localización en un ciclo de dos años. Todos los años la Bundesgartenschau es una *internationale Gartenschau* (exposición internacional de jardinería).

Con un alto presupuesto, en las citas respectivas se observan las últimas tendencias de la arquitectura del paisaje y jardinería, en apoyo de los objetivos de desarrollo regional. Una buena discusión general sobre la historia del “*Bundesgartenschau*”, se puede encontrar en el libro “*Grounds for review: the garden festival in urban planning and design*” por Andrew Theokas. Ed: Liverpool, 2004.

⁴ Carlfried Mutschler (1926-1999) fue un arquitecto alemán. Realizó edificios complejos a gran escala para el sector privado y público. Desde 1978 enseñó como profesor honorario en la Städelschule (Academia Estatal de Bellas Artes) en Frankfurt.

⁵ Joachim Langner (1929-2017) era un arquitecto alemán. Sus edificios más famosos incluyen la ampliación de los museos Reiss-Engelhorn (una red de museos de Mannheim que reúne a varios museos, instituciones culturales e instituciones de investigación), el ayuntamiento de Mannheim y el Multihalle.

⁶ Heinz H. Eckebrecht, paisajista, fue elegido para diseñar los jardines que rodean el espacio expositivo.

⁷ El Herzogenriedpark es un parque público en el distrito de Mannheim Neckarstadt-este, al sur del asentamiento de Herzogenried. Junto con Luisenpark formó parte del Federal Garden Show de 1975.

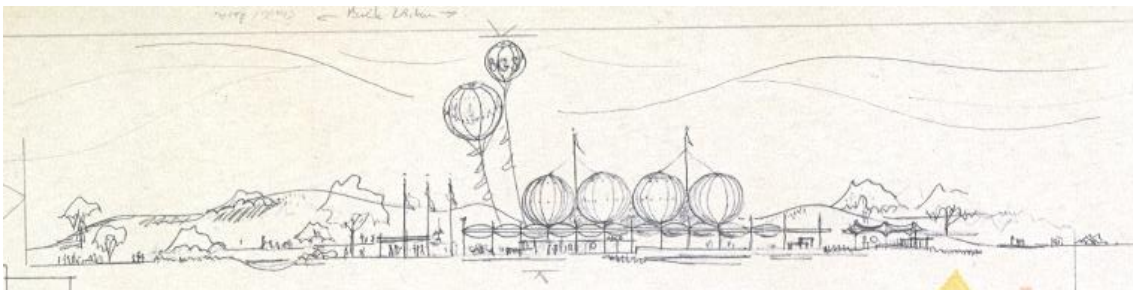
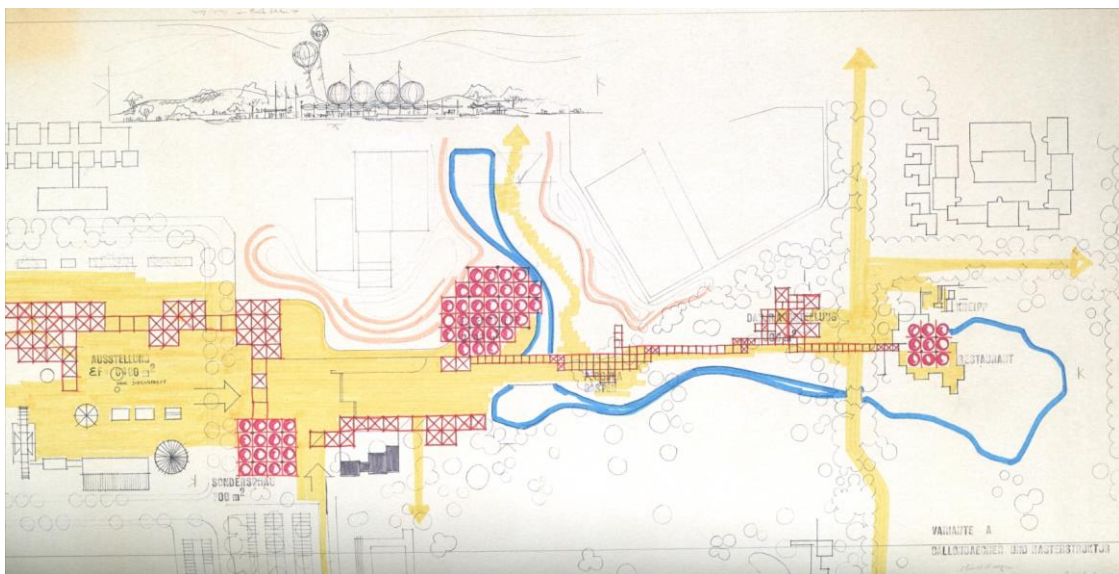


Imagen 155: Propuesta 2 anterior a la final. El Pabellón temporal iba a estar cubierto por una membrana sujeta por globos.

preliminares, los arquitectos y los colaboradores de su estudio de Warmbronn, se hicieron con celosía de alambre, particularmente Evald Bubner, y desarrollaron un modelo de celosía de alambre 1: 500 con dos estructuras de domo grandes con túneles que los entrelazaban.

Los proyectos que anteriormente dieron fama a Frei Otto se basaban en sus estudios de estructuras colgadas o “tiendas”, es decir, de trabajos con superficies flexibles atirantadas y suspendidas mediante mástiles de apoyo a comprensión, una especie de estructura en tensegridad básica o simple (ver imágenes 150-152).

El proyecto para la Exposición Temporal Federal de Agricultura en Mannheim supuso, sin embargo, un reto en otra dirección. Carlfried Mutschler y Johaquim Langner, ganadores del concurso convocado en 1970 para la construcción de un Pabellón Multiusos⁸, plantean para el café una estructura de madera y un globo de gas como cubierta, aunque este es rápidamente descartado en reuniones con las autoridades por motivos de normativa de seguridad.

El equipo pronto recordó el nombre de Frei Otto y su “gridshell” en Dabau, Essen, en 1962; un experimento que doblaba una celosía de madera articulada hasta crear un espacio en su interior que quedaba fijado por un anillo exterior que conservaba la compresión⁹. Este proyecto le sirve a Frei Otto como continuación de su investigación aplicada a un modelo real.

El programa del concurso era sencillo. Lo que se pedía era cubrir un espacio libre amplio que sirviera de espacio de exposiciones, en el que había que dejar libre la planta, con el número menor posible de apoyos intermedios. A esa gran sala se le añadiría un restaurante.

La premisa del concurso de no poner apoyos intermedios debió atraer especialmente a Frei Otto. Así como en sus anteriores pabellones estaba condicionado por los mástiles intermedios que tensaban la cubierta, en este caso los bordes, todo el contorno del edificio sería el que mantendría en pie y en altura a la edificación. Este planteamiento tan radical es el que hace del Multihalle un edificio sin precedentes.

Siendo así, el resultado fue una construcción ligera, optimizada y minimizada. Con una forma generada por la acción de la compresión flexionando una celosía. Pero había un punto débil que

⁸ LIDDEL, I. *Frei Otto and the development of gridshells*. Case Studies in Structural Engineering. Volumen 4, Diciembre 2015, Págs 39-49

⁹ Más detalles en el siguiente apartado dentro de este capítulo, está narrado como uno de los modelos previos a los modelos con la forma definitiva.

amenazaba el diseño de esta grandísima cubierta, la compresión generaría la forma curva, pero ¿Hasta cuándo? ¿Hasta qué límite había que llegar? Como buen arquitecto que no se deja llevar por criterios únicamente formales necesitaba una justificación de “fuerza mayor” para terminar de “cerrar” el diseño de la cubierta, decidió que curvaría la celosía hasta que coincidiera con la forma de una catenaria, para que sólo funcionase a compresión, un reto que antes tenía que comprobar.

Mucho se tardó y se tuvo que estudiar para que una idea tan radical fuese materializada, pero no se escatimó en detalles. He aquí algunos datos verdaderamente reveladores de la construcción: 33.000 nudos hechos a mano, 7.400 m² de superficie cubiertos, con lo que es fácil pensar en que se eleva la superficie de cubierta a casi 10.000m², 80 metros de longitud, y 60m de luz en el ancho del edificio, 20m de altura, utilizando únicamente una celosía de 50x50mm de celosía, con 4 capas de listones de madera de cicuta. Los listones de 50 × 50 mm llegaron en varias ocasiones a medir hasta 6 m. Se les unió en la fábrica con listones de 30-40 m mediante uniones hechas a mano. Las juntas y las uniones se hicieron clavando listones de 50 × 25 mm a cada lado de ellas. Esta técnica también se usó para reparar cualquier junta que se rompiera durante la instalación.

Las pruebas de flexión se realizaron en los listones para encontrar el radio mínimo de curvatura antes de romperse. Fue 10-12 m. Donde el radio era menor que esto, y por tanto con una curvatura más pronunciada, los listones se dividieron en dos capas de 25 mm de profundidad para reforzar. En resumidas cuentas, toda una proeza artesanal.

Sólo se habían construido dos cubiertas de celosía de semejante tamaño con anterioridad en todo el mundo: un pabellón experimental para la German Building Exhibition de 1962 en Essen¹⁰ y la cubierta de la sala de conferencias en el pabellón Alemán de la Expo'67 en Montreal¹¹.

El material original de la cubierta, por encima de los listones protegiendo el interior y la estructura de las inclemencias de tiempo, era tejido de Trevira, ennegrecido y recubierto de PVC. Las bandas superpuestas de las uniones, se soldaron y se aplicaron a los listones con clavos.

El trabajo con celosías es bien conocido, pero cuando se trata de una celosía de varios kilómetros cuadrados sólo sostenida desde los bordes adquiere un interés poco común pero ¿Cómo se

¹⁰ El pabellón experimental para la German Building Exhibition de 1962 en Essen, fue una estructura de 15x15m construida por Frei Otto y Bernd Friedrich Rombeerg en Deubau, Essen en 1962. Más detalles en el siguiente apartado dentro de este capítulo, está narrado como uno de los modelos previos a los modelos con la forma definitiva.

¹¹ Ver capítulo sobre el Pabellón Alemán de la Expo'67 en Montreal.

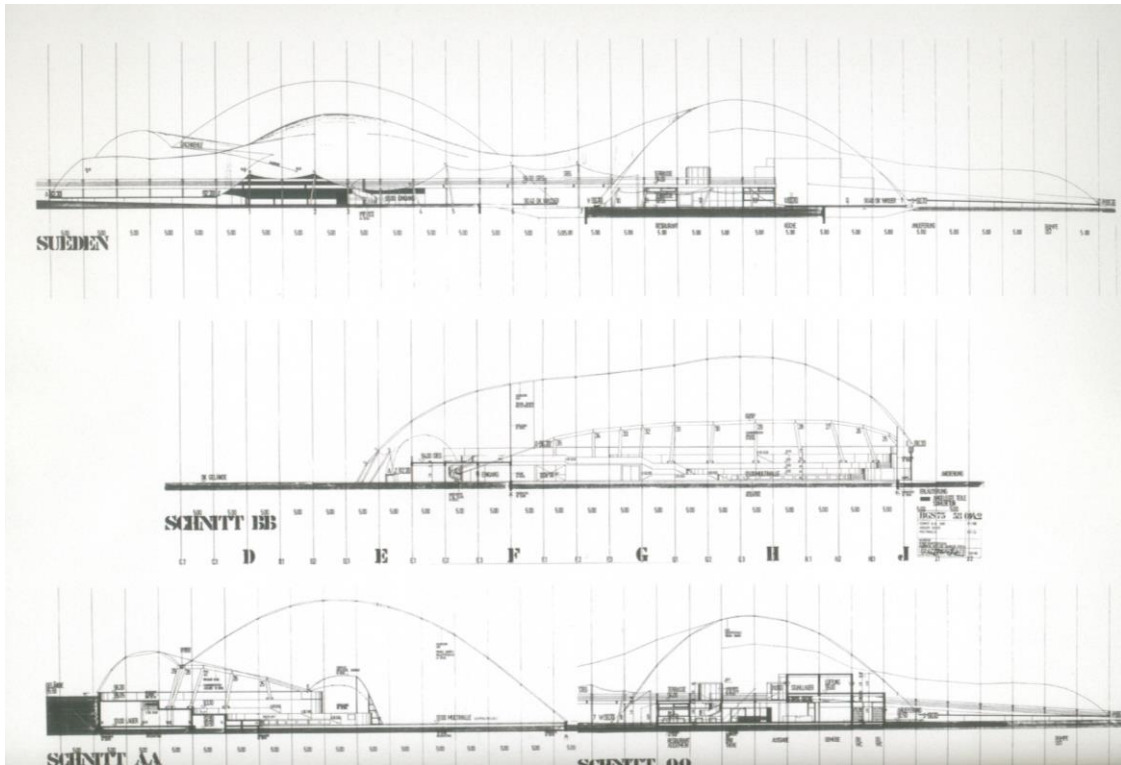


Imagen 157: Secciones explicativas del Pabellón

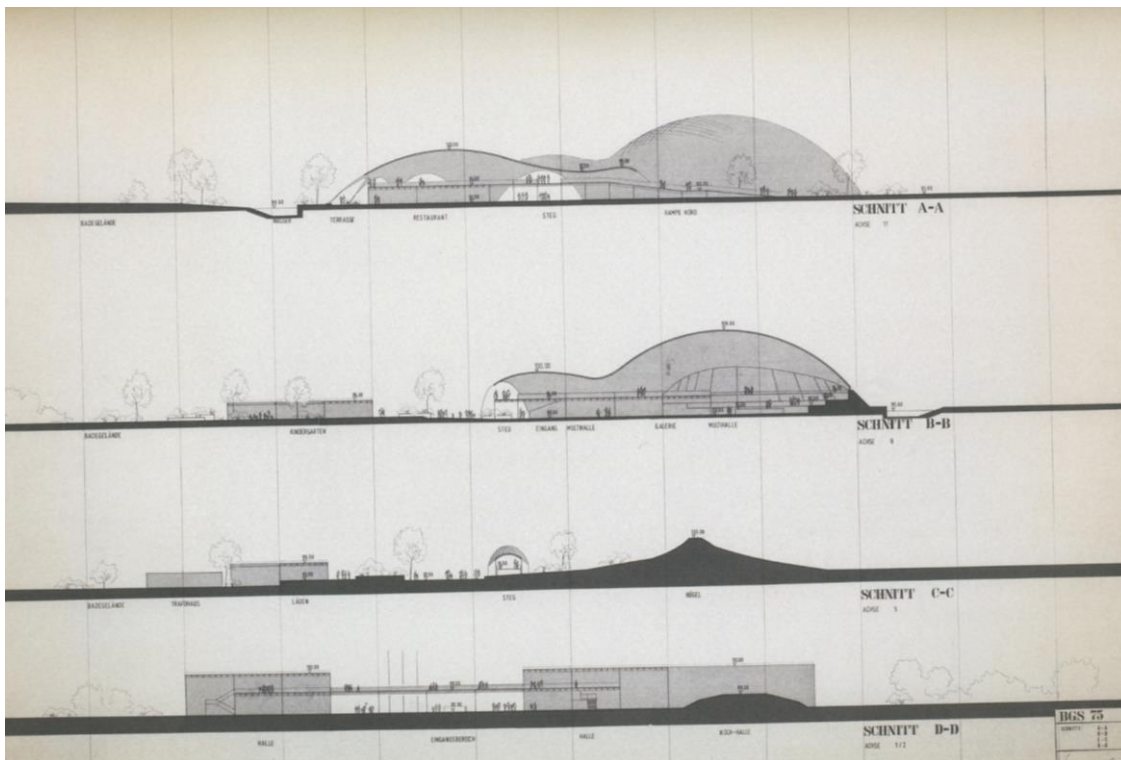


Imagen 158: Secciones explicativas del Pabellón. En la imagen se puede advertir cómo el terreno contribuye también en sección a dar variedad en los espacios generados dentro de la cubierta del Multihalle.

transfiere la lógica de la estructura de la matriz de celosía a las fuerzas inherentes de la tierra? A través de tiras de hormigón en el suelo, y vigas de madera de doble capa (montadas en los bordes de la gran cubierta: hojas de madera de doble capa que proporcionan las mismas superficies y en algunos lugares por los cables que sostienen la cáscara).¹²

Un equipo germano-japonés había estado trabajando en el Instituto para el estudio de las Estructuras Ligeras (IL) con Frei Otto desde 1971¹³. Por lo tanto, la propuesta de colaboración del equipo de Mutscheler y Langner supuso una oportuna oferta que Otto aprovechó para aplicar directamente sus recientes investigaciones.

Otto utiliza el término “gridshell” para referirse a “tramas deformables” que normalmente ejecuta en madera. Estas tramas se resuelven mediante nudos flexibles y están constituidas por varias capas superpuestas, lo que permite flexibilidad y la sección suficiente para evitar el pandeo. El cálculo del ángulo de inclinación de cada nudo en ambas direcciones confiere a la superficie la capacidad de doble curvatura y, al contrario que las conocidas estructuras colgadas de Montreal y Múnich, los elementos de la estructura trabajan todos a compresión, en lugar de estar traccionados.

Otros elementos diagonales son necesarios en este tipo de estructuras para resolver los problemas de estabilidad de la estructura. En el caso de Mannheim la solución será aportada por cables que circulan por las diagonales de los cuadrados de la celosía para fijar la deformación de esta en un punto determinado. Estos elementos de rigidización de acero son incorporados también en el cálculo.

Para dicho cálculo Frei Otto acude a los ingenieros de Ove Arup en Londres y, en concreto, entra en contacto con Ted Happold¹⁴ a cargo del equipo Estructuras 3 dentro de Arup. La extremada

¹² CACHOLA SCHMAL, P. *El Pabellón: Placer y polémica en Arquitectura*. Catálogo de la exposición DAM, Ostfildern 2009.

¹³ El Instituto para las Estructuras Ligeras de Stuttgart, en su número IL10, titulado Gridshells, que ve la luz en 1974, recoge el trabajo de estos años sobre las cubiertas de “conchas malladas” –cáscaras curvas-. Más tarde aparecerá en 1978 el número IL13 Multihalle Mannheim, que recoge pormenorizadamente la obra de Mannheim una “grid Shell” ejemplar.

¹⁴ Edmund Happold, ingeniero británico que inicia tras graduarse en Leeds su trayectoria en contacto con la arquitectura colaborando en el estudio de Alvar Aalto y que entra a formar parte del equipo de Ove Arup, colabora con Peter Rice en el desarrollo de proyectos como la Ópera de Sidney de Jörn Utzon, o del Centro de Arte Contemporáneo



Imagen 159: Celosía completa antes de ser instalada

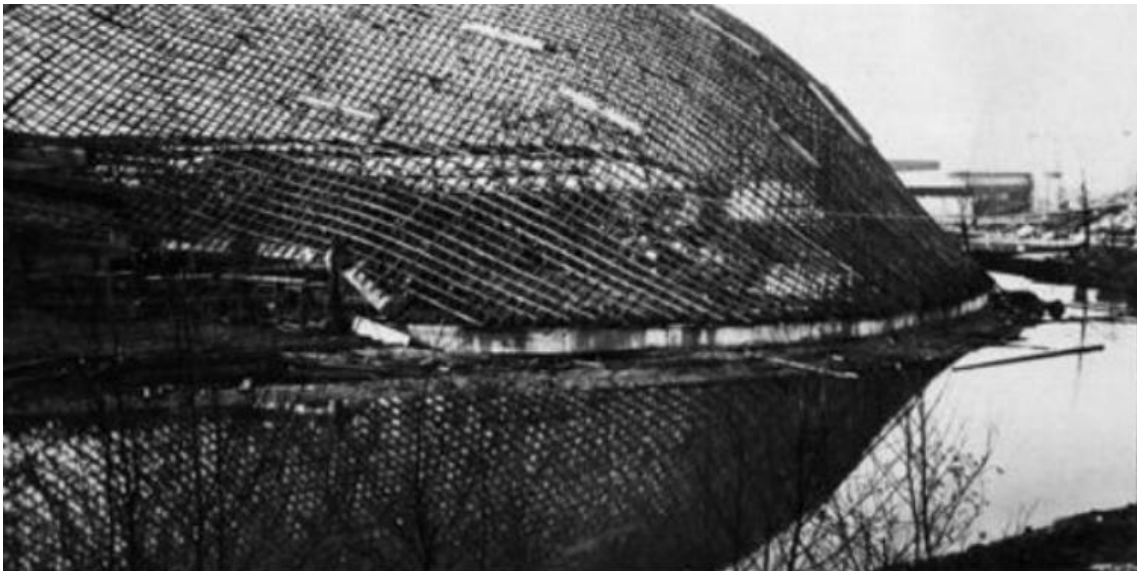


Imagen 160: Celosía completa siendo elevada

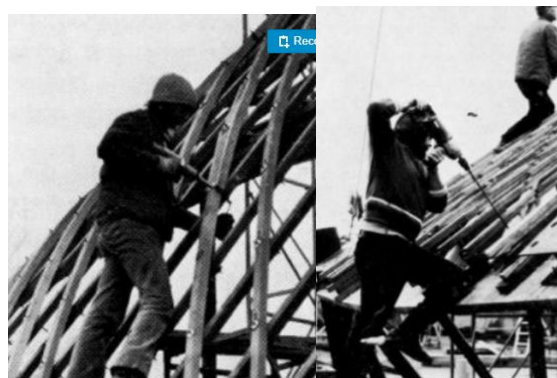


Imagen 161: Trabajos a mano

esbeltez de la estructura y las grandes luces suponen un gran compromiso y un enorme reto para todo el equipo. Esa es la razón por la que el desarrollo del proyecto se dilate en el tiempo.

Una vez realizada la primera maqueta se realiza la segunda de comprobación. Desde Arup se realizan pruebas mediante modelos estructurales en dos direcciones y, dada la novedad de la estructura, el ingeniero Fritz Wenzel¹⁵ sugirió una tercera vía de comprobación con una prueba de carga de un modelo a escala real de la estructura. La deformación calculada mediante los métodos del equipo ofrece unos resultados de enorme precisión en su comprobación con la realidad, de los 80mm de deformación previstos, se obtienen unos resultados de 79mm de deformación reales tras las comprobaciones finales en el Pabellón completado (ver imagen 177).

La celosía estaba formada por listones de *Cicuta Americana*, que posee unos patrones de fibra extremadamente derechos, lo que garantiza un funcionamiento similar al de los modelos. La

madera fue tratada con sales como retardante de cara a su protección contra el fuego. Los discos en la fijación permitían la transmisión de esfuerzos por rozamiento.

En invierno de 1974/75, finalmente el caparazón de la celosía estaba lista para poder ser erigida sobre los cimientos.¹⁶

Beaubourg, conocido como Centro Georges Pompidou, junto con Renzo Piano y Richard Rogers. También colabora asiduamente con Frei Otto en el desarrollo de estructuras tensadas, y finalmente forma su propia oficina Buro Happold en 1976 con 7 empleados. Hoy tiene oficinas por todo el mundo.

¹⁵ Fritz Wenzel fue Ingeniero de pruebas y profesor universitario alemán de reconocido prestigio en Alemania en los años 60-70.

¹⁶ CACHOLA SCHMAL, P. *El Pabellón: Placer y polémica en Arquitectura*. Catálogo de la exposición DAM, Ostfildern 2009.



Imagen 162: Imágenes de la construcción Archivo del IL (Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart)

5.3. Modelos de representación, de comprobación del comportamiento estructural y de resistencia de las distintas solicitaciones

“Nosotros construimos maquetas para conocer la forma y, una vez obtenida, construimos también maquetas para saber lo que ocurre en su interior”¹⁷

El aprendizaje y contacto directos de Frei Otto con el taller de escultura de su padre pusieron al joven arquitecto en contacto con la manipulación de esta de un modo directo, en experimentación pura y ensayos permanentes.

“En la actualidad, el arquitecto se desentiende voluntariamente de las ciencias naturales, pero comete un grave error pues la construcción es una ciencia de la naturaleza aplicada”.¹⁸

La forma, como ya habíamos visto, es consecuencia de un proceso de búsqueda en la Naturaleza. No se modela una figura según una forma prevista o anticipada o deseada, sino que la figura se extrae de lo desconocido a través de la experimentación con lo natural.

Como ya se comentó en la introducción, esta tesis realiza un estudio que no se realiza desde una aproximación histórica al uso de los modelos y su incorporación en la mesa de trabajo de los arquitectos dentro de su labor creativa, sino que se desarrolla mediante el análisis de ciertas obras de arquitectura que permiten identificar diversas operaciones con modelos; usos escalables de la maqueta al edificio, usos interpretados y traducidos de la escala de trabajo a la escala humana arquitectónica para la que fueron pensados. Con este caso se construye un valioso espectro de sistemas de trabajo que han marcado un hito en la manera de construir y a continuación se procederá a su desarrollo.

Para Otto la condición fundamental para hacer estos experimentos es que la maqueta tenga la misma forma y que el material y las cargas sean proporcionales y estén aplicados de la misma manera, de esta forma las deformaciones serán lineales respecto a las reales.¹⁹

¹⁷ OTTO, F. *Complete Works. Lightweight Construction*. Natural Design. Basel-Boston-Berlin: Birkhäuser, 2005

¹⁸ Ibid.

¹⁹ Frei Otto, estudio de doblado “Grid Shell”. Fuente IL Archive.



Imagen163: Foto de Jonas Leihener sobre la maqueta del aspecto final exterior.

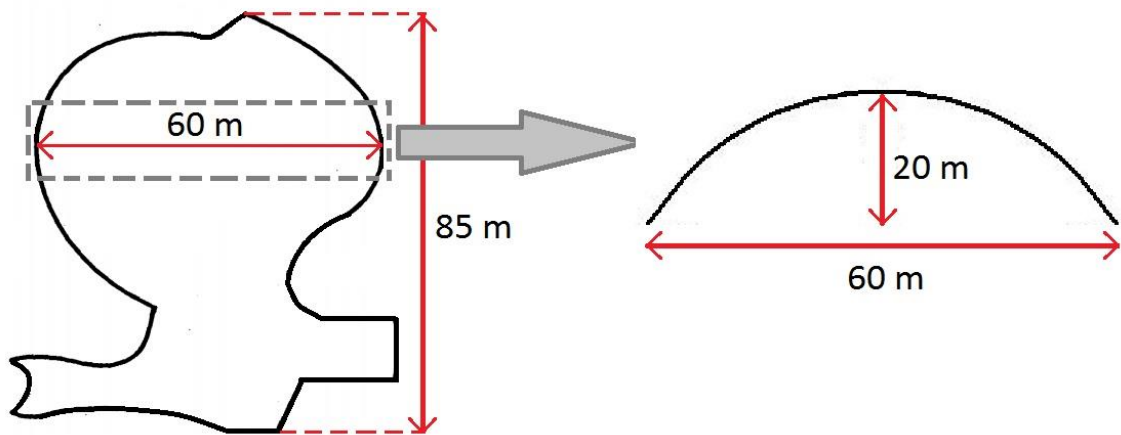


Imagen 164: Esquema de dimensiones principales. Estudio de la Universidad de Princeton. Estudio gráfico realizado por la Universidad de Princeton. Fuente: <http://shells.princeton.edu/Mann2.html>. Visitado 20 de diciembre de 2017.

Además de las estructuras formadas por membranas trabajando a tracción, a finales de la década de 1950, Otto se interesó por los caparazones livianos que podían formarse utilizando el principio de Hooke al invertir una red colgante (según Lisa Jardine²⁰, Robert Hooke utilizó este método para mostrar a Christopher Wren cómo el Domo de San Pablo podría funcionar). El método de formación de formas también sugiere un método de construcción que utiliza una cuadrícula cuadrada de celosía de listones de madera o varillas de acero lo suficientemente delgadas como para doblarse fácilmente. Al tener cuadrados articulados en los vértices se permite el movimiento formando rombos, a diferencia de los triángulos, que son indeformables. De esta manera se pueden obtener superficies complejas. A estas estructuras Frei Otto las denominó “Gitterschale”, celosía-concha.

En 1962 construyó, con algunos estudiantes en Berkeley, una “Gitterschale”, una estructura de prueba de una cúpula de pie en cuatro puntos con varillas de acero.

Más tarde, ese mismo año, hizo una estructura de madera de prueba en Essen sobre un plano pseudoelíptico de 15m x 15m. (Ver Imagen 165)

Más adelante, cuando dentro del programa del Pabellón Alemán de la Expo'67 en Montreal se requirieron dos pequeños auditorios, Frei Otto pensó que podría ser una buena ocasión para probar sus nuevos hallazgos, y estos se construyeron siguiendo este mismo sistema (Ver Imagen 166-167). Las celosías fueron prefabricadas en Alemania y enviadas a Canadá dobladas en paquetes, donde se abrieron e instalaron en el sitio. Estaban revestidas con finas láminas de contrachapado para formar los huecos cuadrangulares.

Después de algunas dibujar algunas ideas utópicas, los arquitectos, como se ha mencionado antes, recordaron los ensayos de armadura de celosía de Otto y se reunieron con él en su estudio de Warmbronn.

Con una celosía de alambre desarrollaron un modelo a escala 1:500 que formaban dos domos gigantes enlazados por túneles. Este fue el diseño del primer boceto físico. Una vez acordado esto, los arquitectos finalizaron las líneas fronterizas y se comenzó a trabajar en el modelo final de

²⁰ Lisa Anne Jardine CBE (registrada al nacer como Lisa Anne Bronowski; Oxford, 12 de abril de 1944-25 de octubre de 2015) fue una historiadora británica de la Edad Moderna. Era profesora de historia del Renacimiento, directora del Centre for Editing Lives and Letters en la Universidad de Londres Queen Mary y presidenta del Human Fertilisation and Embryology Authority (HFEA). Fue elegida académica de la Royal Historical Society de Londres y miembro del consejo de la Royal Institution. Renunció a su puesto en septiembre de 2009.

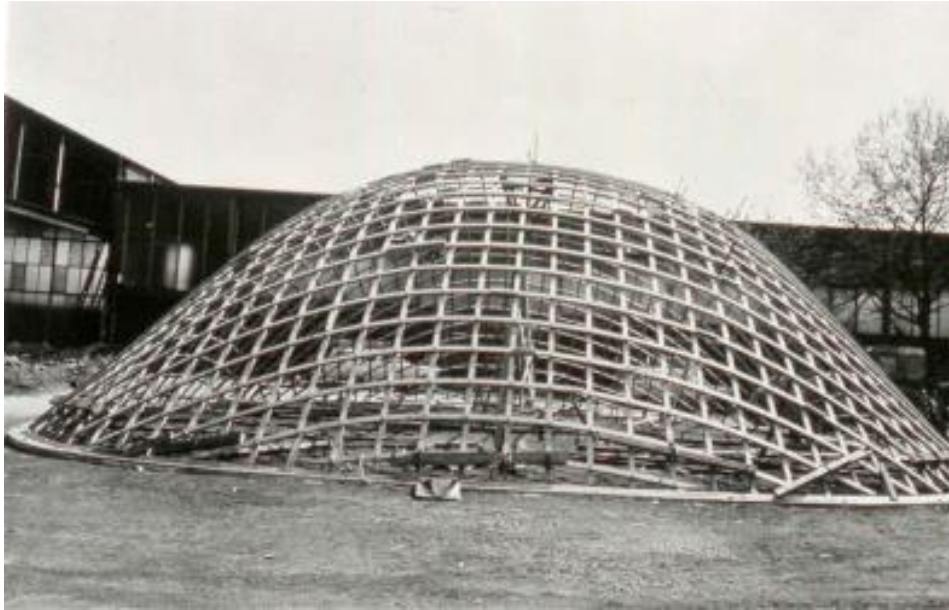


Imagen 165: Estructura de prueba de caparazón de Essen, Debau, 1962.

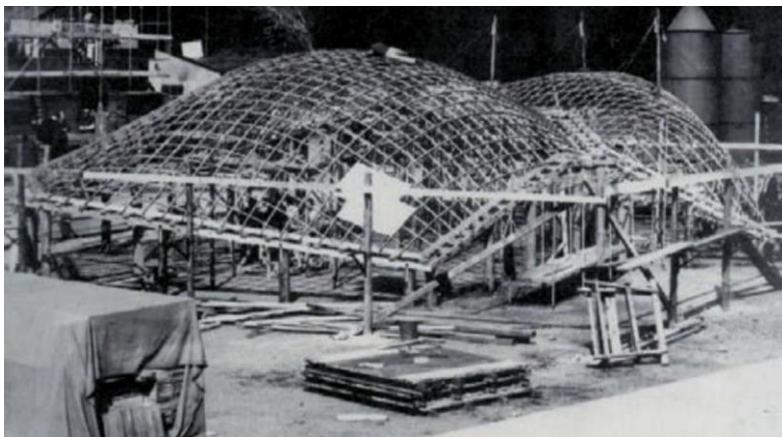


Imagen 166: Cubierta para dos pequeños auditorios del interior del pabellón alemán de la Expo'67 de Montreal

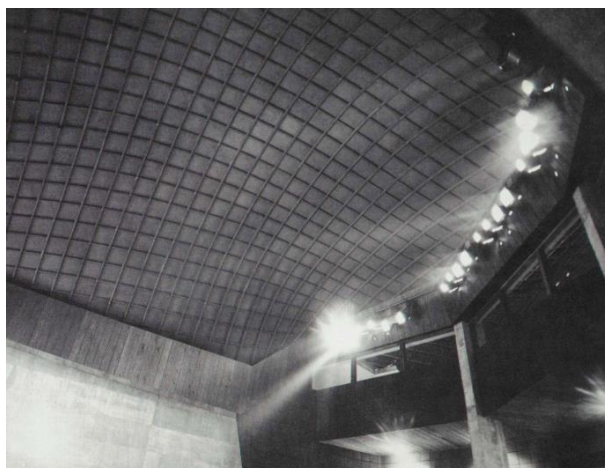


Imagen 167: Interior de una de las dos cubiertas para dos auditorios del pabellón alemán de la Expo'67

la cadena colgante que definiría la geometría del edificio. Esto se construyó en el modelo con articulaciones de ganchos que conectaban con pequeños anillos circulares que serían los nodos.

La escala del modelo fue de 1:100 y la dimensión de la cuadrícula de la cadena fue de 1,5 cm, representando con cada línea de celosía, tres líneas de celosía de la estructura real.

Los extremos de las líneas de enlace se conectaron a la línea límite con resortes pequeños que se podían ajustar para lograr una tensión razonablemente uniforme en la red. Sin dichos resortes, es muy difícil obtener las fuerzas razonablemente bien compartidas entre las dos direcciones de la cuadrícula.

En el modelo se determinó la forma de la estructura, por ejemplo, el ensanchamiento en forma de media bóveda de las entradas fue el resultado de la autoexpresión del modelo.

El modelo se midió mediante fotogrametría (se fotografió el modelo desde arriba desde 2 ángulos diferentes y se creó un modelo espacial digital) y las fotos se procesaron para obtener las coordenadas de los nodos. El formulario fue luego procesado por los ingenieros en el *Institut Fur Anwendungen der Goedesie im Bauwesen* (el Instituto para la aplicación de la cimentación) en la Universidad de Stuttgart, y dirigido por el profesor Klaus Linkwitz.²¹

Usaron el método de densidades de fuerza que se había desarrollado recientemente en ese departamento.

Los dibujos y las especificaciones se prepararon a partir del modelo medido. Estos fueron enviados a varias compañías para obtener precios de los trabajos de suelo, las cubiertas de celosía de madera y los revestimientos de tela. Las tres compañías seleccionadas formarían una cooperativa para la construcción.

A continuación, se calculó la forma de la celosía del listón. Los datos creados con un gran equipo CDC6600 podrían ser emitido con "máquinas de dibujo" y sirvieron de base para la planificación del trabajo. Entre otras cosas para cortar los listones.²²

²¹ ELSER, O. y CACHOLA, P. *El modelo de arquitectura: herramienta, fetiche, pequeña utopía*. Catálogo de la exposición DAM, Zurich, 2012.

²² Ibid

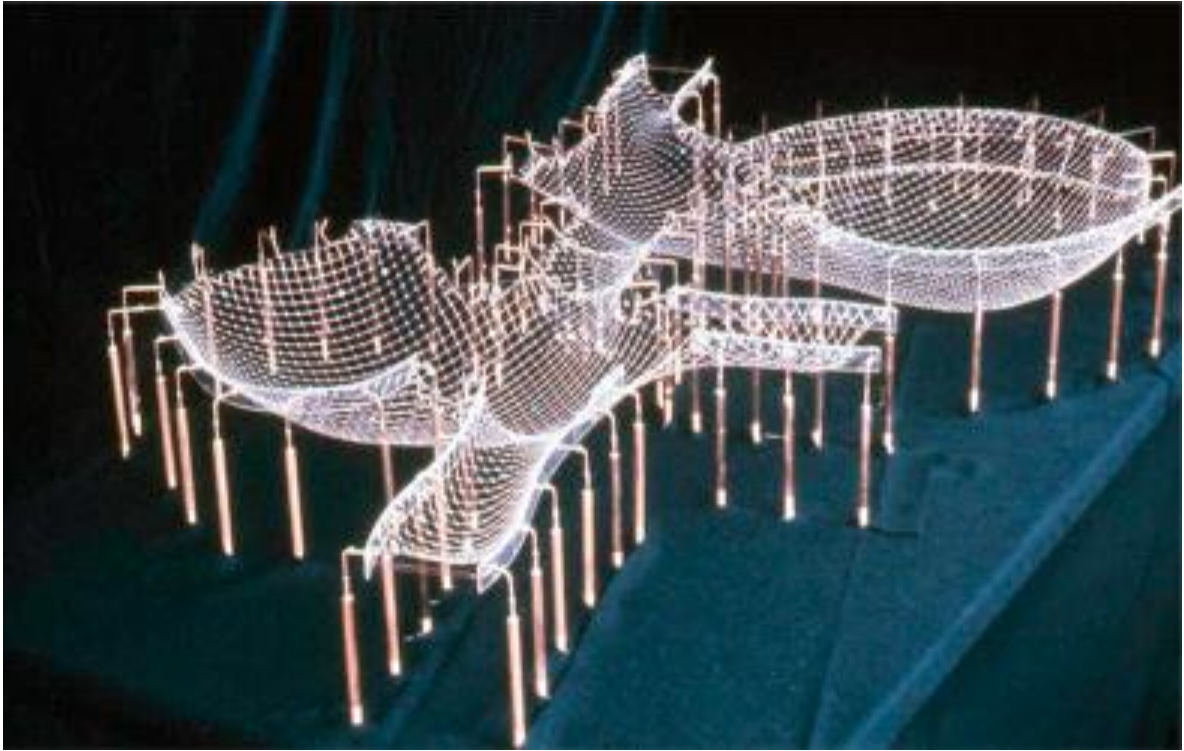


Imagen 168: Modelo final de la cadena colgante para Mannheim.

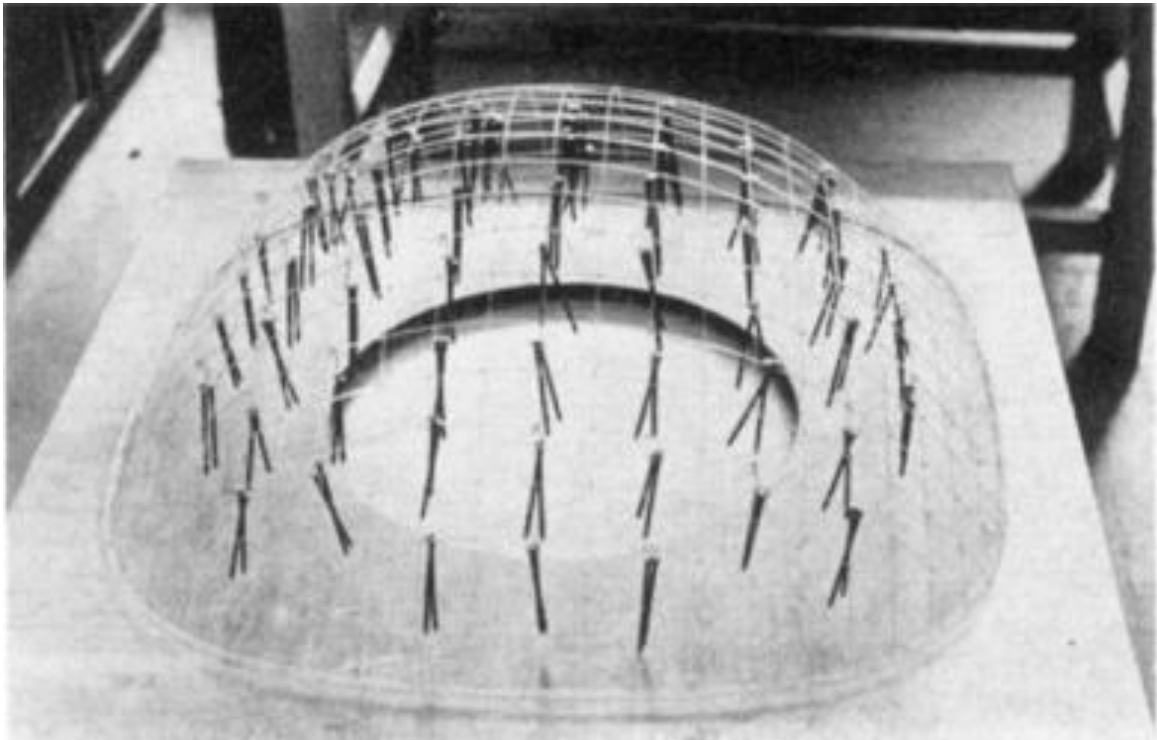


Imagen 169: Prueba de carga del modelo en la gridshell de Essen cargado con clavos a modo de cargas puntuales.

A los ingenieros de Mannheim Bräuer y Späh se les confiaron los cálculos estáticos. A mediados de 1973 se dieron cuenta de que la estabilidad del caparazón no era accesible por cálculos puramente matemáticos y, por sugerencia de Frei Otto, contrataron la firma londinense Ove Arup & Partners, representada por Edmund Happold e Ian Liddell, que se comprometieron en septiembre de 1973, mientras Brauer y Spah continuaron con los trabajos de campo.

Para tener idea del comportamiento estructural de la construcción, los ingenieros de Ove Arup & Partners construyeron un primer modelo de medición estática después de la presentación del pabellón experimental en Essen.²³

El modelo a escala 1:16 consistió en unas tiras estrechas de plexiglás conectadas en uniones de agujas (Esto fue con uñas suspendidas). Como resultado, se elaboró un modelo del Multihalle a escala 1:60 para probar la geometría, hecho mucho más difícil dentro del diseño de edificio de Mannheim.²⁴

Esta deformación podría determinarse utilizando medidores de cuadrante²⁵. Los experimentos mostraron que se requería la instalación de miembros de tensión (cables de acero) y la duplicación de la red.

En este punto, la inauguración de la exposición sería en 19 meses, el 18 de abril de 1974 y la construcción debía comenzar en el sitio en diciembre de 1973. Se planeó que la mayoría de las conchas se construyeran a partir de capas individuales de listones en cada dirección con un espaciado de 50 cm, aunque se había incluido en el contrato algún área de construcción de doble capa. Los ingenieros no se habían encontrado antes con una construcción así y les preocupaba que la carga de colapso por pandeo fuera demasiado baja para una estructura de cubierta tan grande.

La forma de las cubiertas con forma de concha se había desarrollado colgando modelos de cadenas, por lo que, en teoría, las cargas de peso propio producirían únicamente fuerzas de

²³ Ibid

²⁴ Ibid

²⁵ Se denomina cuadrante al instrumento que presenta un cuarto de círculo graduado, utilizado para la medición de ángulos. Empleado antiguamente en la náutica y en la astronomía, consta del arco graduado con dos mirillas y una plomada que cuelga del vértice. Según la posición que tiene la cuerda de la plomada en el arco, se obtiene la medición.



Imagen 170: Prueba de rigidez a cortante.



Imagen 171: Detalle de la construcción de la red.

compresión en los listones. Cualquier carga perturbadora provocaría efectos de flexión en los listones que harían que las chapas se desvíasen de su forma funicular teórica, lo que lleva a un aumento de la flexión debido a las fuerzas de carga uniformes. Con una carga uniforme crítica no habría resistencia a ninguna carga perturbadora que provoque un colapso por pandeo. Se requeriría rigidez adicional y esto implicaría materiales adicionales y un costo adicional, por lo que era importante que los ingenieros pudieran comunicar su trabajo a todas las partes, incluido el ingeniero de pruebas, el profesor Fritz Wenzel.

Al principio de la construcción, los listones se tendrían a nivel del suelo y todos los pernos del nodo se insertarían, pero no se tensarían. Luego serían levantados a su forma prevista como una concha doblemente curvada. En este proceso, los cuadrados de las celosías se distorsionan en paralelogramos y los extremos de los listones tendrían que moverse hacia sus límites de borde. La celosía debería ser soportada en esta forma hasta que los pernos del nodo estuviesen apretados y resultara lo suficientemente rígida como para soportar su propio peso. Por lo tanto, se requería flexibilidad durante la instalación y, sobre todo, rigidez a partir de entonces.

Los ingenieros se enfrentaron con una falta de conocimiento sobre cómo se comportaría la estructura de la celosía y se les requirió confirmar en cuatro semanas cómo hacer para poder construir la cubierta de forma segura. Hicieron un inicio inmediato en cuatro frentes: investigaciones sobre las cargas de diseño, cálculos manuales sobre el pandeo del caparazón, prueba en el modelo y cálculos a mano para obtener una aproximación de las fuerzas miembro

Los estudios de carga fueron pruebas de túnel de viento y estudios de carga de nieve que se llevaron a cabo en el Instituto Cranfield. Las cargas críticas de nieve se acordaron en 15 kg/m² en las áreas cerradas con calefacción y 40 kg/m² en áreas sin calefacción. El peso propio de la estructura de dos capas fue de 20 kg/m².

Dado que la forma amorfa no se pudo calcular utilizando las normas estándar para cargas de viento, la Asociación Británica de Investigación Hidrodinámica llevó a cabo las pruebas de túnel de viento. Para esto, se construyeron varios modelos de medición geoméricamente similares, que estaban equipados con 150 tubos de medición, que estaban conectados a un manómetro. Por tanto, presión y succión del viento podrían determinarse en una amplia variedad y resistencias del viento.²⁶

²⁶ ELSER, O. y CACHOLA, P. *El modelo de arquitectura: herramienta, fetiche, pequeña utopía*. Catálogo de la exposición DAM, Zurich, 2012.



Imagen 172: Prueba de fuego en un panel de la celosía de madera impregnada de solución ignífuga y revestimiento de membrana. Fuente: Institute for Lightweight and Conceptual Design (ILEK), Universidad de Stuttgart.



Imagen 173: La muestra después de la prueba. Fuente: Institute for Lightweight and Conceptual Design (ILEK), Universidad de Stuttgart.

Los cálculos a mano se basaron en un documento de DT Wright sobre pandeo en listones reticulados²⁷. Este documento dio una fórmula simple para la carga de pandeo de un armazón doblemente curvado completamente triangulado con miembros unidos por clavijas. Esta disposición no es la misma que para las cubiertas de celosía, pero la fórmula sí indicó que se necesitarían listones de 100 × 100mm en lugar de 50 × 50mm. (Ver imagen 169).

En este momento la geometría detallada de la estructura no estaba disponible pero la geometría del domo Essen era mucho más simple, así que los ingenieros se pusieron a hacer un modelo estructural de tiras de Perspex unidas con alfileres. Pensaron que así se podían escalar para proporcionar información en la capacidad de pandeo. El modelo se cargó con clavos como una unidad conveniente de peso. La carga uniforme se aplicó en etapas usando 1-4 clavos en cada nodo.²⁸

La capacidad de las conexiones de límites también fue probada. De particular preocupación fue la transmisión de la fuerza de corte entre los miembros superior e inferior de un par de listones. La estructura se basaba en un par de listones que actuaban como una viga con la rigidez teórica aumentada 26 veces la de una sola capa de celosía.

La rigidez del compuesto se basa en la rigidez de la conexión de corte que se forma de una sola pieza 50 listones cuadrados que cruzan en ángulo recto sostenidos por un solo tornillo. Los cambios en el contenido de humedad harían que la madera se expandiera y contrajera. Si el perno estaba apretado, la expansión aumentaría la tensión en la madera causando que el perno se deslizara o cediera, de modo que cuando se secase y se encogiera, se aflojaría. Para evitar esto, se decidió utilizar resortes de disco para garantizar que se mantuviera la compresión. Las pruebas se llevaron a cabo con diferentes cantidades de compresión de muelles y esto indicó una cantidad razonable de rigidez de la junta hasta que los pernos estaban completamente flojos.

Para desarrollar detalles de la construcción de la celosía, se construyeron varios modelos en una escala 1:5 que muestran el estado de planificación de la celosía de una sola capa. Partes de la

²⁷ WRIGHT, D.T. *Membrane forces and bucking in reticulated shells* J. Struct. Div., 91 (Feb, 1965). ASCE nº ST1

²⁸ Para comprobar los resultados ver *Frei Otto and the development of gridshells*. Case Studies in Structural Engineering. Volumen 4, Diciembre 2015, Págs 39-49



Imagen 174: Modelo de posiciones de elevación.



Imagen 175: Disposición de la celosía en su elevación.

construcción estaban aún en escala 1:1 construida: el más grande de los modelos tenían una superficie de 80m² y sirve a la empresa Koitwerk H. Koch en Rimsting para probar la colocación de la membrana del techo instruir a los artesanos.²⁹

La configuración de prueba para la prueba de fuego también consistió en casi 5m² de la construcción de la cubierta quemados como aparecen en las imágenes³⁰. La madera se impregnó en una solución ignífuga y a la membrana se le aplicó un revestimiento también ignífugo.

Ove Arup & Partners discutieron previamente sobre el modelo a escala 1:60 las diferentes formas del erigir el caparazón. Se decidió elevar gradualmente la celosía plana a su posición final utilizando carretillas elevadoras y andamios.³¹

El ingeniero Fritz Wenzel de la Universidad de Karlsruhe exigió una prueba de carga después de la finalización de la construcción. El 30 de enero de 1975, la cubierta del Multihalle se convirtió en su propio modelo de medición 1:1; 205 contenedores de basura colgaron de las celosías llenos de agua para simular cargas de nieve. Las mediciones demostraron que la cubierta únicamente cedía 79mm. Lo que se había previsto, según los cálculos era un máximo admisible de 80mm.³²

²⁹ ELSER, O. y CACHOLA, P. 2012 "El modelo de arquitectura: herramienta, fetiche, pequeña utopía". Catálogo de la exposición DAM, Zurich.

³⁰ Ibid

³¹ Ibid

³² Ibid



Imagen 176: La celosía cubierta con tela de celosía recubierta de PVC oscura pero translúcida.

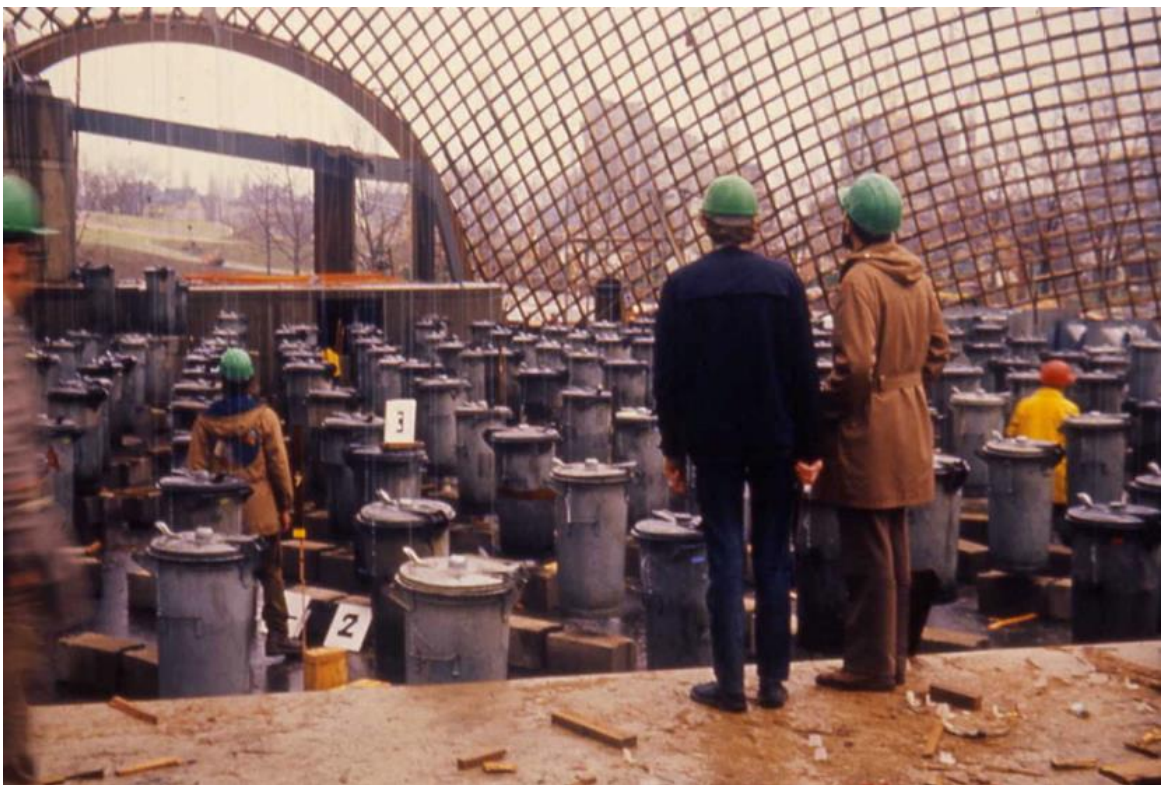


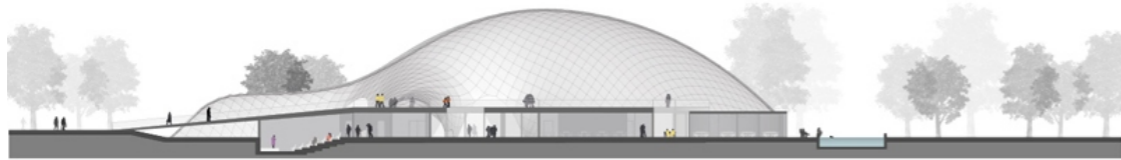
Imagen 177: Prueba de carga con contenedores de basura llenos de agua.



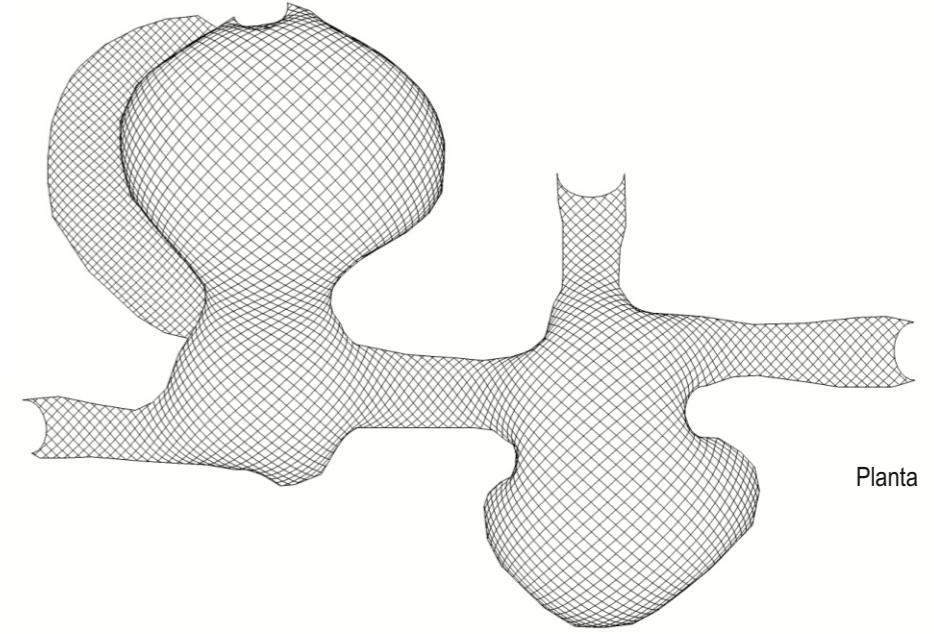
Alzado



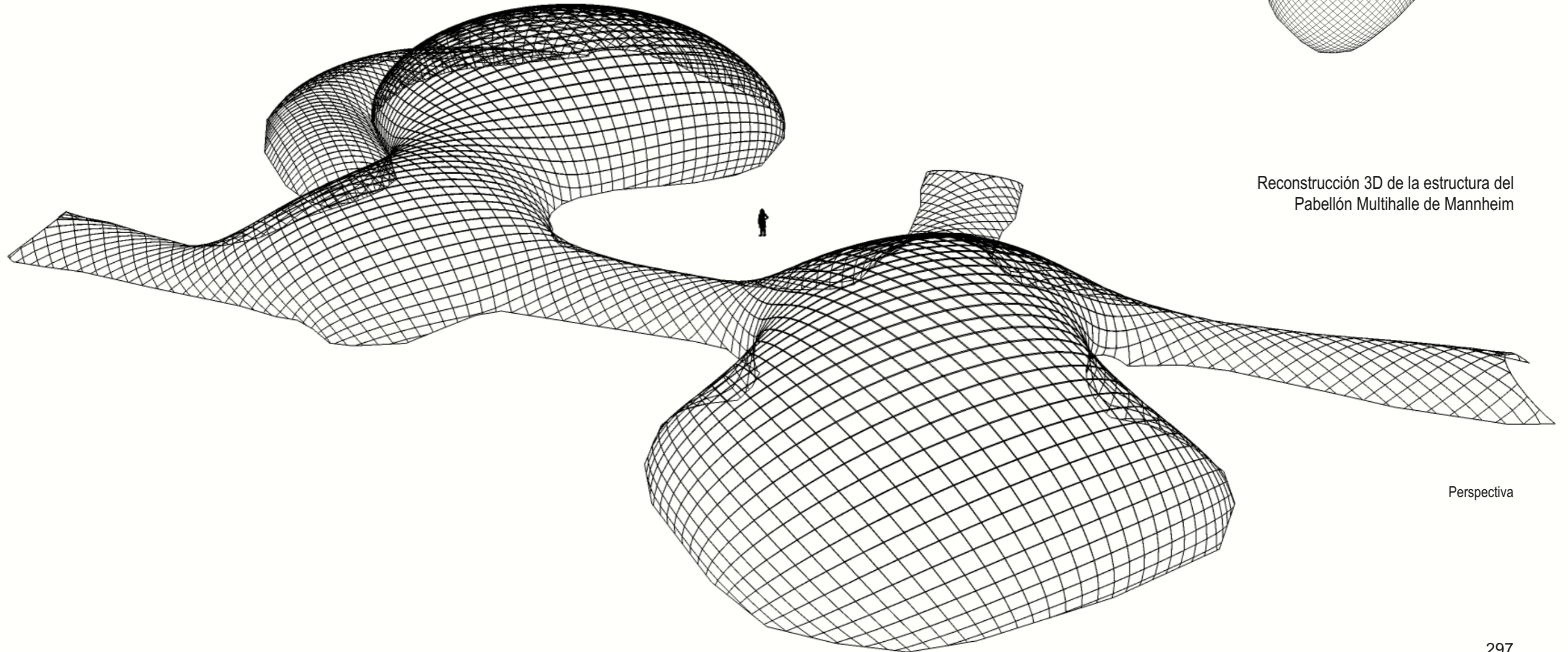
Alzado de la malla estructural



Sección



Planta



Reconstrucción 3D de la estructura del Pabellón Multihalle de Mannheim

Perspectiva

5.4. Epílogo. Método de investigación de Frei Otto, su aportación a la investigación con modelos físicos y reconstrucción tridimensional del Pabellón para su mayor comprensión

El método de investigación de Frei Otto supone una manera precursora de entender la relación con la naturaleza en la que no hay imitación sino una incorporación de la misma a través de sus mecanismos de funcionamiento. Se trata de un método de investigación parecido a la biomimesis³³ aplicada a la arquitectura.

Rainer Barthele destaca cómo el trabajo de Frei Otto se centra en los procesos físicos que acaecen la naturaleza en cuanto a su relación con la lógica del mínimo consumo energético.³⁴

La investigación del arquitecto alemán marca de una manera especial que imitar exactamente la naturaleza es imposible, es demasiado compleja. Su método de investigación se basa en simplificaciones del comportamiento natural; respuestas formales y tensionales a una determinada sollicitación, tracciones, compresiones, flexiones... con sus membranas tensadas desde los contornos y desde puntos elevados con mástiles³⁵, con sus proyectos de embalses inflables, hasta el más distinto de todos los anteriores que es el que se ha estudiado en este capítulo, el Pabellón multiusos de Mannheim, donde en vez de traccionar, comprime una celosía de madera.

Hasta entonces, en el mundo de la construcción apenas se conocía otro trabajo de los materiales a compresión que el de resolver los problemas únicamente añadiendo más material, a veces por desconocimiento de técnicas que ayuden a aligerar la construcción. Por primera vez a gran escala, este edificio afronta el reto de soportar grandes compresiones con poca sección, y además tiene mucho mérito que se hiciera con un material como la madera, flexible, orgánico y heterogéneo.

³³ La biomimesis (de *bio*, "vida", y *mimesis*, "imitar"), también conocida como biomimética o biomimetismo, es la ciencia que estudia a la naturaleza como fuente de inspiración de nuevas tecnologías innovadoras para resolver aquellos problemas humanos que la naturaleza ha resuelto, a través de modelos de sistemas (mecánica) o procesos (química), o elementos que imitan o se inspiran en ella.

³⁴ OTTO, Frei, Complete Works. Para una mayor profundización acerca de las distintas líneas de investigación de Frei Otto, éstas están contempladas en el artículo "Natural forms-Architectural forms", pp. 17-30.

³⁵ Ver Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart, Pabellón alemán de la Expo'67 en Montreal, Estadio Olímpico de Múnich y el Aviario de Múnich.

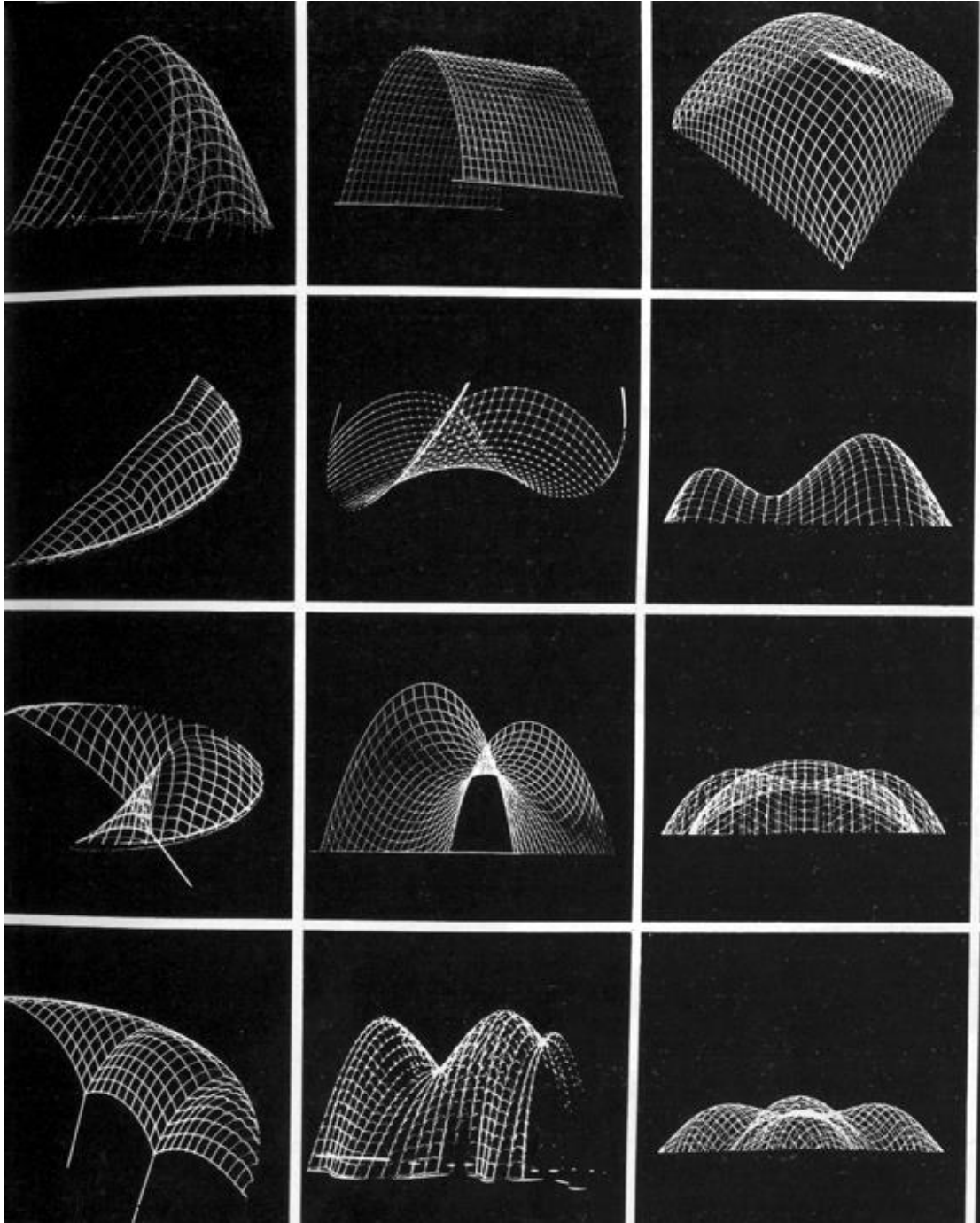


Imagen 180: Experimentos doblando celosías de celosía: cupuliformes bovediformes, dobles curvaturas, etc. 1962.

Lo que sí se había investigado, con grandes cabezas como Le Ricolais³⁶, Graham Bell³⁷, Konrad Wachmann³⁸, etc, era la posibilidad de aprovechar mejor el material disponiéndolo únicamente allá donde era necesario dentro de la cubierta para resistir las cargas, estructuras de barras y pequeños cambios morfológicos no tan sustanciales como las cubiertas de Frei Otto, donde cubierta y estructura se identifican.

Edificaciones con este tipo de solicitaciones sí que ha habido a lo largo de la historia, tiendas de telas tensadas, cúpulas... pero no de una manera controlada y analizada.

La condición estática en la que se resuelven las formas naturales es la que más le interesa al arquitecto alemán, y la correlación con ciencias exactas como la física y las matemáticas, así como

³⁶ Robert Le Ricolais, un arquitecto e ingeniero francés llamado "El padre de las estructuras espaciales", activo en los Estados Unidos de América y conocido por su investigación sobre estructuras de tensión, estructuras livianas y celosías, cada uno de los cuales tiene conceptos centrales paralelos de tensegridad.

³⁷ Alexander Graham Bell (1847-1922) fue un científico, inventor y logopeda británico, naturalizado estadounidense. Contribuyó al desarrollo de las telecomunicaciones y a la tecnología de la aviación gracias a sus inventos sobre estructuras ligeras.

³⁸ Konrad Wachsmann (1901-1980) fue un arquitecto alemán. Estudió en las Escuelas de Artes y Oficios de Berlín y Dresde, siendo en esta última Heinrich Tessenow uno de sus profesores, y en la Academia de Bellas Artes de Berlín, donde fue alumno del arquitecto Hans Poelzig, quien despertó su interés por la prefabricación en la arquitectura.

Su formación, que aunaba el dominio tanto de la técnica como de la artesanía, le llevó a trabajar en una compañía de elementos prefabricados en madera. En 1938 se trasladó a París, donde residió hasta 1941, año en que emigró a los Estados Unidos.

Ya en suelo americano, comenzó a colaborar con Mies van der Rohe y de manera más intensa con Walter Gropius, con quien llegó a desarrollar proyectos de prefabricación tales como *The packaged house system*. Paralelamente, actuó en calidad de docente en el Illinois Institute of Technology de Chicago desde 1947 hasta 1964 y en la Universidad del Sur de California entre 1964 y 1974.

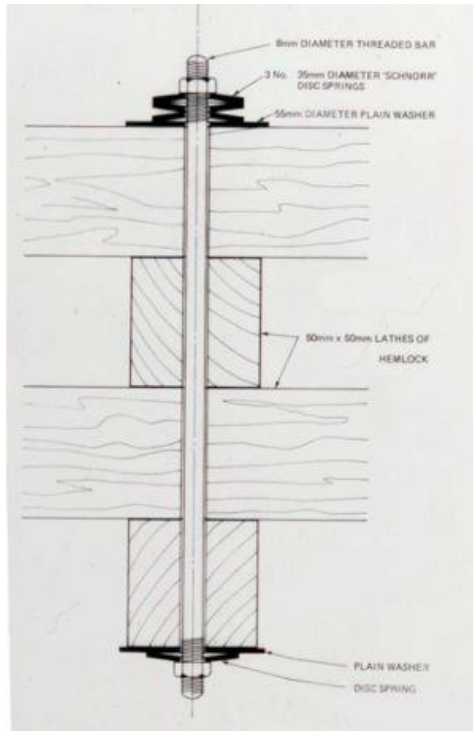


Imagen 178: Detalles de atornillado.

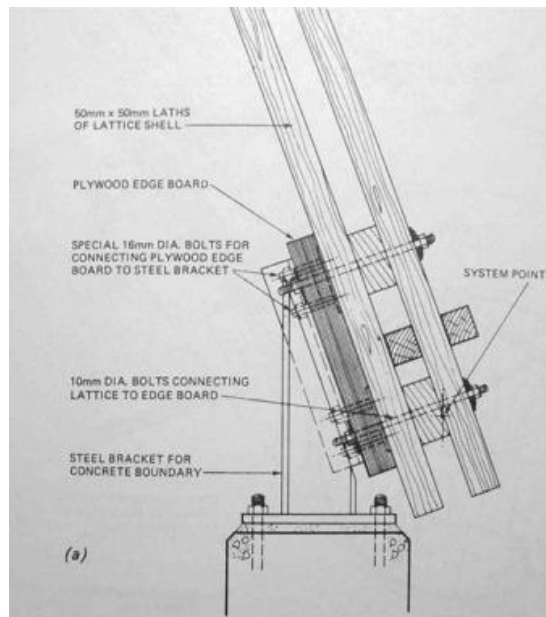


Imagen 179: Detalle de la conexión de límite.

su observación en busca de procesos y sus leyes, es la que le coloca igualmente en un territorio paralelo al de D'Arcy Thompson³⁹ y sus estudios sobre el crecimiento y la forma.⁴⁰

Así, la naturaleza es observada por Frei Otto más allá de sus formas superficiales, desde las estructuras y los procesos que las hacen posibles, dentro de una manera distinta de entender la génesis de la forma. Su mirada es pragmática, cohibida por la técnica.

Para la reconstrucción tridimensional que se ha efectuado en el estudio del Pabellón se ha utilizado el plugin de SkechtUp *Soap Skin & Bubble* del ingeniero alemán Josef Leibinger. Este software tiene por objeto representar tridimensionalmente la geometría de las membranas traccionadas. De su estudio se ha podido comprender en mayor hondura la complejidad de su construcción donde la forma es conseguida a través de comportamiento de comprensión que ejercen el anillo que rodea toda la edificación. Este comportamiento natural, de flexión de una celosía de madera, es la aportación de Frei Otto en este proyecto que no parte desde una geometría preconcebida sino desde el comportamiento estructural.

Frei Otto simplifica lo que analiza en la naturaleza, y entiende este ejercicio como expresión de la autoformalización estructural. A este ejercicio lo denomina "camino inverso", por llegar a resultados análogos a los fenómenos formales y tensionales de la naturaleza desde otros caminos, muchos desde la forma, aparentemente en el final de todo proceso de generación:

³⁹ D'Arcy Wentworth Thompson (1860 - 1948) fue un biólogo y matemático escocés, autor del libro "*On Growth and Form*", publicado en 1917, un trabajo influyente y calificado como expresión de *sorprendente originalidad*. Ha sido llamado "el primer biomatemático".

⁴⁰ Thompson publicó el resultado de sus estudios de la morfología del crecimiento y de la forma, discutiendo que las formas de plantas y de animales se podrían entender en términos de matemática pura. El libro se convirtió en una obra clásica inmediatamente para la exploración de geometrías naturales en la dinámica del crecimiento y de los procesos físicos. Este trabajo rezuma de un optimismo evidente, presentando una visión del mundo físico como sinfonía de fuerzas armoniosas. El libro cubre una gama extensa de estudios morfológicos. Registra las leyes que gobiernan la dimensión de los organismos y su crecimiento, la estática y la dinámica de la configuración en células y tejidos incluyendo los fenómenos del empaquetado geométrico, las membranas bajo tensión, las simetrías, y división de células; así como la ingeniería y los esqueletos geodésicos en organismos simples. Thompson concibe la forma no como un hecho dado, sino como un producto de las fuerzas dinámicas que son formadas por flujos de la energía y etapas del crecimiento.

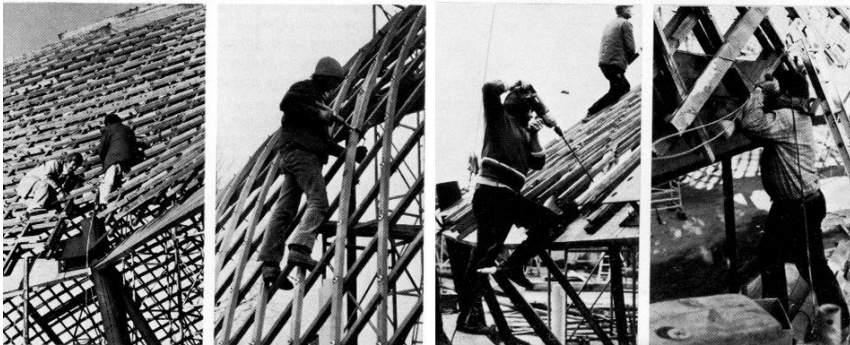
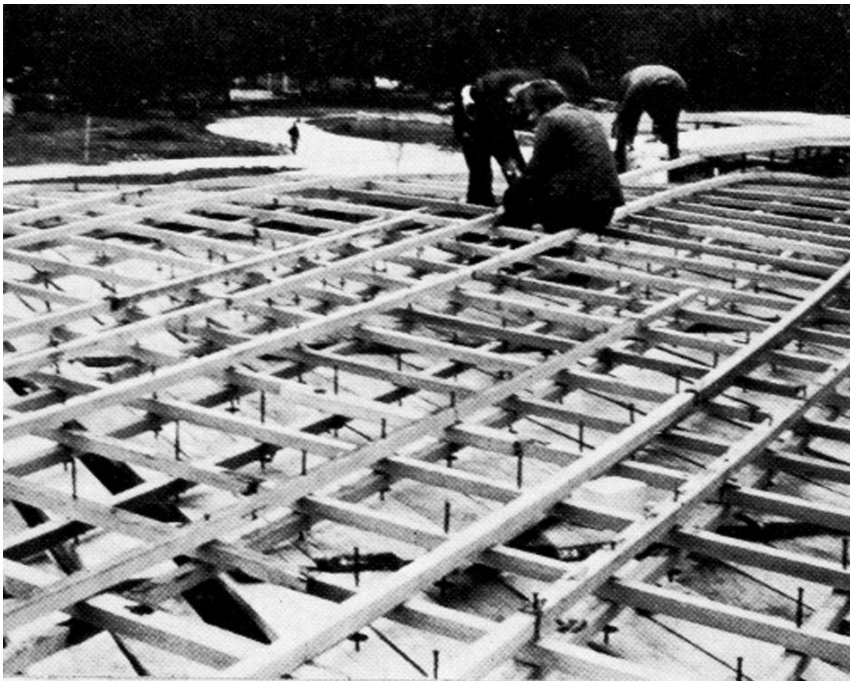


Imagen 180ª: Distintas fases de la construcción del Multihalle.

“El método del camino inverso hace posible reconocer los procesos de formación en la naturaleza animada e inanimada en la medida que tales procesos se ponen en marcha artificialmente. Esto es realizado mediante la experimentación y el desarrollo de la técnica de construcción. Los desarrollos técnicos conducen adelante hacia un alto nivel de cualificación que permite un mejor conocimiento de las construcciones no técnicas de la naturaleza. Esto es conocido como el “camino inverso”. La Naturaleza no es copiada, pero se hace comprensible a través de desarrollos técnicos”⁴¹.

Para Frei Otto la belleza está en aquello que es innovador como solución a un problema que antes era irresoluble, y reconoce que el arquitecto posee una formación que le permite tener una percepción de los problemas y de sus soluciones mucho más entrenada y creativa que los otros profesionales en contacto también con el diseño y la construcción arquitectónicas gracias al ejercicio de la subjetividad.

Así, contando con la subjetividad como nueva variable en la investigación, las posibilidades del desarrollo inventivo y científico de mirada natural son infinitas.

“Una nueva subjetividad, un entendimiento bastante personal de la naturaleza puede ser una motivación. Observo con enorme respeto qué está ocurriendo delante de mis ojos, especialmente las cosas que son fundamentalmente independientes de los actos no naturales del hombre. También, por lo tanto, adquirir unas nuevas relaciones con aquello hecho por el hombre, las cosas artificiales que hacen posible ver una reducción de lo no natural. Para mí un nuevo entendimiento de la naturaleza, la tecnología y el arte está empezando a parecer en el horizonte”⁴²

Otto entiende que lo subjetivo, la visión personal, es fundamental para que se produzca la investigación con éxito. La experimentación sistemática no es suficiente, necesitamos que nuestra

⁴¹ OTTO, F., RASCH, B. *Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal. The reverse path* Edition Axel Menges, Munich, 1992, p45. El libro se edita con motivo de la exposición del mismo nombre celebrada en la villa Stuck con ocasión del premio Deutscher Werkbund Bayern Prize que reciben Frei Otto y Bodo Rasch en 1992.

⁴² OTTO, F. *Finding Form. European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Berlín, 2004 p22.

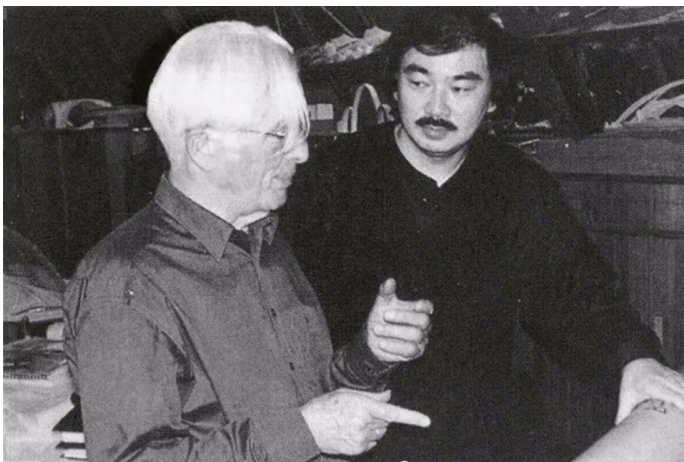


Imagen 180b: F. Otto y Shigeru Ban. Pabellón de Japón de la Expo de Hannover en el año 2000. Obra análoga.

interpretación activa haga visible los aspectos que siempre han estado ahí y que son perceptibles solo cuando damos ese salto cualitativo, cuando cambiamos el patrón de mirada para permitir un entendimiento no preestablecido, que evalúa las mismas cosas bajo nuevas perspectivas y que, por tanto, permite una revisión y un aprendizaje infinito sobre la naturaleza y sus procesos como enseñanza.⁴³

Una mirada así, con un tan amplio campo de posibilidades por delante, hace de Frei Otto un investigador y un optimista de gran nivel:

“La discusión sobre el concepto de infinito es de extremada importancia, algo que la mayoría de los arquitectos no entienden, que existen infinitas posibilidades para la arquitectura del futuro. No hay límites”⁴⁴

Quizás ese manejo del material con la magnanimidad del alcance de lo subjetivo sea la clave del avance científico, también en arquitectura y quizás también la clave del éxito de este pabellón.

⁴³ G. PINO, F. *Centro Multiusos en Mannheim. Frei Otto* RITA nº5, abril 2016, 106-113.

⁴⁴ OTTO, F. *Conversaciones con Juan María Songel*. Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 2008, p79.

También para más información acerca de la relación con el instituto consultar la tesis del dpto. de composición arquitectónica de la universidad de Valencia del mismo autor; “Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente, mayo 2005, fecha de la difusión 2008.



Imagen 180c: Implicación física en las comprobaciones de estructuras de Frei Otto.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

0. Enriquecimiento por el uso de modelos físicos estructurales

A. Aspectos del trabajo con los modelos estudiados que benefician al Proyecto

A.1. Simultaneidad de procesos

A.2. Modelos para una pre-construcción modificable parlante

A.3. La Geometría del proyecto y su relación con el modelo

B. Los modelos estudiados y el avance del conocimiento en arquitectura

B.1. El artista ha de hacer experimentos

B.2. Avanzar supone riesgos

B.3. Arquitectura temporal como ámbito adecuado para la experimentación en arquitectura

B.4. Geometría técnica. El cómo de las formas

B.5. Mecanismos para llegar a estructura. Las articulaciones en los modelos para generar un determinado comportamiento estructural (esfuerzos axiales)

C. El inicio de una era

0. Enriquecimiento por el uso de modelos físicos estructurales

En el presente capítulo se van a enumerar las aportaciones del trabajo con modelos físicos de los autores cuyos casos hemos analizado desde dos puntos de vista: desde el enriquecimiento al proyecto arquitectónico y desde el posible avance del conocimiento que hayan producido.

Además, se plantea observar todas estas ventajas de los casos de estudio con la mirada puesta en las aportaciones posibles al ejercicio de la profesión del arquitecto y a la enseñanza y aprendizaje de la arquitectura. No es casualidad que los tres arquitectos estudiados ejercieran su profesión y la compatibilizaran con una pasión común: la enseñanza.

Como ya se comentó en la introducción, esta tesis realiza un estudio que no se realiza desde una aproximación histórica al uso de los modelos y su incorporación en la mesa de trabajo de los arquitectos dentro de su labor creativa, sino que se desarrolla mediante el análisis de ciertas obras de arquitectura que permiten identificar diversas operaciones con modelos; usos escalables de la maqueta al edificio, usos interpretados y traducidos de la escala de trabajo a la escala humana arquitectónica para la que fueron pensados. Con este estudio de casos, se construye un valioso espectro de sistemas de trabajo que han marcado un hito en la manera de construir.

En estas líneas vamos a citar frecuentemente, además de los autores estudiados, el libro de Félix Candela “En defensa del formalismo y otros escritos”. Aunque él centró su carrera en sus proyectos y en hacer avanzar el conocimiento acerca de sus cascarones de hormigón armado¹, nos interesa más sus reflexiones en torno a la forma y el proyecto, y en cómo el avance de la técnica ha repercutido profundamente en la concepción que tenemos sobre el proyecto.

A. Aspectos del trabajo con los modelos estudiados que benefician al Proyecto

A.1. Simultaneidad de procesos

El trabajo con modelos físicos estructurales como punto clave de un proyecto supone que la forma final global será coherente a su comportamiento estructural. De ahí que, después de estudiar los casos, anotemos como insustituible esta herramienta proyectual para este tipo de proyectos.

¹ En la introducción ya explicamos por qué razón descartamos los proyectos construidos con hormigón armado.

Al entender la maqueta como una herramienta, el proyecto se convierte, de una manera más evidente que utilizando otros medios, en proceso. Proceso de formalización, de estrategia.

La obra estudiada de estos arquitectos pone en crisis un defecto que ha ido creciendo en la profesión, el defecto en la manera de trabajar el proyecto que produce lo que llamaremos “proyectos escarapate”. Los “proyectos escarapate” son edificios con procesos de proyecto a medias, son aquellos que sólo “funcionan” desde una perspectiva. Aquellos que parecen únicamente fruto de la creencia ciega del arquitecto en una perspectiva de un dibujo o en un efecto, etc. En este estudio se sostiene que trabajar con modelos físicos estructurales impide en gran medida que esto pase, exige al proyecto una mayor coherencia formal y de comportamiento.

Como se trató en la introducción, el dibujo ha sido y es, la herramienta proyectual más utilizada en la historia de la profesión. Su necesidad y eficacia son innegables, pero su desnaturalización al convertirse de medio en fin ha traído consigo innumerables problemas. En la actualidad se ha “saltado” demasiado rápido del dibujo a la realidad sin tener en cuenta que son lenguajes muy diferentes. Manifestaciones de estas patologías del uso del dibujo es el proyecto que parte únicamente de la planta, o únicamente de una sección, etc. Sin tener en cuenta que no se perciben en sí mismas, un proyecto que no tiene en cuenta simultáneamente todo lo que ocurre en un edificio, es un proyecto cojo.

La arquitectura no es un trabajo de síntesis, el dibujo y la maqueta sí que lo son. Por tanto, es un abuso que la arquitectura intente funcionar como una síntesis que ayudó en su proceso de formación y comprensión, pero que no sirve para la materialización. Esta tesis pone de manifiesto un correcto uso de la maqueta como medio que simultanea acciones que se pretenden realizar dentro del proceso de proyecto.

Tras estas consideraciones sobre el papel mediador del dibujo y de la maqueta, cabe destacar de la maqueta, respecto al dibujo, su incontestable valor al reproducir simultáneamente muchos de los procesos proyectuales que ha de tener en cuenta el arquitecto. En todo proyecto ha de darse el momento en el que todos los procesos ideados: efectos, gestos etc, frutos de una estrategia, se chequeen simultáneamente, porque así es la realidad de la construcción; irremediablemente simultánea.

Concretado en los casos de estudio, se empezará hablando de Frei Otto porque su necesidad de trabajar con modelos es patente. Sus geometrías generadas por la tensión (en el Pabellón Alemán de la Exposición de 1967 de Montreal) fueron fruto de innumerables elementos trabajando solidariamente de una manera simultánea. Sin contar con la maqueta hubiera sido imposible realizar esos proyectos. Después de estudiar el modelo detenidamente, el arquitecto alemán se dio cuenta que podría dirigir esa generación de formas a través de la geometría del perímetro y la altura de los mástiles.

En cambio, el modo de trabajar del mismo autor con formas generadas por compresión (en el caso del Multihalle de Mannheim) fue todavía más básica y quizás por ello más coherente. En este caso, la distancia entre los bordes del perímetro sería el único factor que limitaría la forma, y con ella la altura cubierta, la flecha positiva, del Pabellón. Un efecto que contaba con la simultaneidad de esfuerzos a compresión y que pudo testear desde el modelo.

En el caso de Emilio Pérez Piñero, la disposición y el movimiento de sus barras hacían imposible su representación ya que desde cualquier perspectiva las barras se solapaban. Su necesidad de trabajar con modelos que representan acciones simultáneamente también era patente, el control del movimiento y la facilidad de montaje condicionaron en gran parte sus proyectos de estructuras móviles.

Los otros proyectos del arquitecto murciano, donde las barras están agrupadas en conjuntos para agilizar y simplificar la construcción, también requerían chequeo, pero sus efectos no necesariamente tenían que ser simultáneos, por eso esos ejemplos no nos han sido de tan gran ayuda para los propósitos de esta tesis como los anteriores.

Desde la profesión esta ventaja de la simultaneidad enriquece al proyecto en el mismo sentido que en la enseñanza. Desde hace tiempo se está haciendo hincapié, de manera generalizada en todas las escuelas de arquitectura, en la necesidad de no ensimismar los conocimientos de la profesión al estudiarlos por separado. Cada vez se hace más clara la urgencia de aportar a nuestros alumnos una formación completa, aunque ese esfuerzo conlleve a avanzar más lento. El trabajo con modelos físicos que lleguen a plasmar el comportamiento de las estructuras se hace necesario; es una de las vías que aporta transversalidad de arte y técnica, de conceptos y habilidades, de saberes y prácticas.

A.2. Modelos para una pre-construcción modificable parlante

Otro de los aspectos positivos de este tipo de trabajos en los proyectos que utilizan los modelos es que sirve de lo que denominaremos “pre-construcción”. El objetivo del concepto “pre-construcción” que pretendemos explicar en este apartado de la tesis va más allá de la simple planificación: más allá del orden de los distintos elementos de la construcción, del tamaño y forma de los espacios, etc. La verdadera riqueza de la pre-construcción es el encuentro del arquitecto con el estado final de la arquitectura antes de acabarse, es decir, la última posibilidad (por ser la más cercana) de cambios en el proyecto cuando todavía se pueden hacer. Para que de verdad sean la última vez, cuanto más se parezcan al estado final del proyecto, más capacidad de cambio, y por tanto, de proyecto eficaz hay.

De alguna manera, cuando la maqueta es una herramienta de proyecto, se hace posible que este proceso del que hablábamos antes, de formación y estrategia, sea más profundo y haya más posibilidades de cambio dentro de él.

No se trata de que el modelo sea una copia exacta del producto final, sino de una reproducción modificable de la esencia, en este caso de la esencia del comportamiento estructural y su manifestación formal. La clave del éxito estará en acercarnos a la realidad con el modelo desde el punto de vista que nos interesa.

Después del análisis realizado con el trabajo de esta tesis, podemos sintetizar en dos claves para el éxito en la realización de modelos para proyectos de coherencia forma-resistencia: la elección de materiales y sistemas que permitan un determinado comportamiento (en el trabajo con modelos se produce una codificación de los comportamientos), y la sensibilidad adecuada para captar las novedades que pueda aportar el modelo (descodificación tras el enriquecimiento material). Del resto se encarga el propio modelo: de lo esperado y de lo inesperado.

En definitiva, el arquitecto en estos casos, se inventa un lenguaje material que permite que los materiales hablen por sí mismos tras imponer unas reglas del juego, y después descodificar ese lenguaje para llevarlo a la realidad.

Dentro de los casos estudiados, Frei Otto se impuso a sí mismo las siguientes reglas del juego para poder modelar sus mallas traccionadas únicamente con la geometría del perímetro y con la altura de los mástiles. Así, con un sistema y unas reglas básicas de juego de proyecto, se dispuso a trabajar con sus modelos hasta llegar a la forma final.

Es un esquema que se repite en la obra de los autores estudiados: crean un sistema (aportación de la técnica), le imponen unas “reglas del juego” (la estrategia de proyecto, generalmente suele ser definición de los límites), y luego viene la parte más importante y el objeto de esta tesis: dejan que el propio juego “hable”. Pongamos los ejemplos concretos más claros de esta tesis para ilustrar esta idea:

En el caso del Pabellón de Mannheim, una vez decidido el sistema estructural de celosías articuladas, la estrategia seguida de proyecto consistió en generar forma únicamente a través de la geometría del perímetro. En función de la distancia entre los bordes la geometría cambia ganando altura.

Las reglas del juego de los proyectos de Pérez Piñero giraron en cambio en torno al sistema plegable de sus barras. Sus condicionantes se salían del terreno de juego habitual ya que sus estructuras móviles estaban diseñadas para ser transportadas en camiones y desplegadas en cualquier lugar. En su caso,

se “saltaba a la torera” pasos habituales como el dibujo pormenorizado de la estructura, ya que proyectaba directamente con el material y su movimiento.

Desde la profesión, la preconstrucción modificable, es decir de la preconstrucción de la que podemos aprender de los errores previos al estado definitivo de la construcción, la realización de maquetas de trabajo supone, para el arquitecto, poder contar con una garantía de éxito anterior a la construcción definitiva que desea innovar en formas, materiales, comportamientos, etc. Si además confían en el poder sugerente de la maqueta física, pueden obtener de ella soluciones inesperadas que quizás sean interesantes.

Desde la enseñanza en cambio, la preconstrucción modificable ayuda a entender de una manera más profunda. El trabajar con modelos físicos va más allá del conocimiento teórico, los conocimientos se interiorizan más al tener que hacerlos tú mismo.

A.3. La Geometría del proyecto y su relación con el modelo

Todo lo material tiene forma. De eso nada se escapa, la Arquitectura tampoco.

Las palabras griegas “Eidos”, “Schema” y “Morphe” y la voz latina “Forma” significan, nada menos, que “las cualidades que hacen de cada cosa lo que es”. Si aceptamos este sentido, todas las ciencias y la filosofía pueden ser consideradas como el intento de estudiar la forma de las cosas y descubrir el principio formativo fundamental que da origen a su existencia y hace de ellas lo que son.

Félix Candela. *En Defensa del formalismo*. Extracto de la conferencia leída en la “Casa del Arquitecto”, México, abril 1956.

Pero no es fruto de casualidades, la forma, como otros accidentes de la materia como el color, el sabor, el tamaño, etc, tiene su origen y motivo. La forma arquitectónica tampoco se escapa de este universal.

Pero en Arquitectura la forma tiene la responsabilidad de ser la última de muchas capas, la visible, la que da unidad al proyecto. Mucho se ha escrito en torno a la forma, en este apartado únicamente vamos

a centramos en aquellos aspectos de ella que hacen que la forma no sólo sea la última capa, sino que tenga una correspondencia directa con aspectos esenciales de su génesis y su comportamiento estructural.

Haciendo eco a Félix Candela en su libro *“En defensa del formalismo y otros escritos”*, pensamos que en el trabajo del arquitecto puede ayudar que la forma global final sea, en correspondencia con la estructura, sea uno de los factores ordenativos del diseño:

“Mi apasionado interés por la estructura me hizo albergar esperanzas de que su tratamiento solícito y expresivo, como uno de los factores ordenativos del diseño, llegaría a ser una de las bases formales de tan urgente evolución” [Haciendo referencia a la evolución del diseño y su relación con la forma]

Ese tratamiento solícito y exclusivo ha sido potenciado por los avances de la técnica, que nos permiten generar nuevos modelos, formas a las que, por su complejidad, antes era imposible su acceso y que ahora no sólo podemos acceder, sino que estamos sacándole partido para la arquitectura. No sólo por la capacidad de representación, también por la capacidad de generación de forma que podamos utilizar:

Los avances en la técnica obligan a cambiar los modos de operar, y por tanto dan lugar a expresiones formales diferentes, pero, para dar cabida a éstas, no es necesario la destrucción radical de todo lo anterior, sino su transformación gradual, aprovechando y mejorando lo que en las soluciones superadas hubiera de positivo y respetable.

Por tanto, si los avances de la técnica dan como resultado cambios en el modo de operar y a expresiones formales diferentes, es preciso saber dirigir correctamente esas nuevas maneras de hacer, para “domar” la coherencia interna de esos sistemas hasta nuestros intereses, y ese conocimiento lo da la experiencia, el propio trabajo con modelos físicos.

B. Los modelos estudiados y el avance del conocimiento en arquitectura

B.1. El artista ha de hacer experimentos

Tal como dice Charles S. Peirce² en su obra, al igual que en la ciencia, en el arte es necesario trabajar sobre una primera “luz” que puede ir modificándose, “corrigiéndose”, a medida que se trabaja sobre ella. Es preciso explicar y “probar” las hipótesis artísticas, que de otro modo se verían reducidas a meras emociones. En arquitectura, esas “hipótesis” son el dibujo y, de una manera distinta añadiéndole características y cualidades físicas, las maquetas.

De una manera especial las maquetas han tenido un importante papel en la obra de Frei Otto. Bajo un principio básico claro en el que la forma es resultado del comportamiento estructural, Frei Otto comienza sus diseños con una idea que sabe que no es la definitiva. Una idea a la que empieza a enriquecer con solicitaciones de carga, cuya forma final no sabe dónde acabará.

El trabajo de Frei Otto se describe mejor como de arquitectura experimental, no sólo porque trata de encontrar respuestas a los nuevos problemas, sino también porque adopta las rutinas y procedimientos del experimentador. En multitud de formas estructurales que inventa, en el que usa las disciplinas de la ciencia, se ve obligado a depender de criterios estéticos. A este respecto, al que hacíamos referencia también anteriormente, se cierra la brecha entre la objetividad de la ciencia y la técnica, y la subjetividad de las emociones: el arte, que lleva a conmover al usuario, y para ello es preciso una capacidad de observación que analiza objetivamente primero, para ser enriquecida con la subjetividad, el bagaje que el arquitecto trae consigo al enfrentarse con cada proyecto:

J.M. Songel: Por tanto, es necesario haber desarrollado también esta capacidad de percibir y apreciar aquello que se presenta de forma casual.

² Charles Sanders Peirce (1839 - 1914) fue un filósofo, lógico y científico estadounidense. Es considerado el fundador del pragmatismo (escuela filosófica creada en los Estados Unidos a finales del siglo XIX por John Dewey, William James y él mismo. Su concepto de base es que solo es verdadero aquello que funciona, enfocándose así en el mundo real objetivo) y el padre de la semiótica moderna (disciplina que estudia el signo en tanto entidad que participa del fenómeno de semiosis).

Frei Otto: Sí, y observar constantemente. En primer lugar observar las formas de la naturaleza inerte y ver lo que sucede en ella, pues las formas de la naturaleza viviente, que también he estudiado, son mucho más complejas, casi impenetrables y opacas.³

El arquitecto, como cualquiera que quiera se aventura en el camino ante lo desconocido, avanza a base de pruebas, de experimentos. Y dependiendo de cómo sean esos experimentos, existe la posibilidad de tomar decisiones en las que, por su naturaleza desconocida, hay que asumir riesgos. Todo por un objetivo, hacer pruebas que permitan conocer, tener mayor seguridad, sobre algo que se sospecha que será bueno.

Los casos de estudio son claros ejemplos de esto. Son arquitectos que avanzaban hacia lo desconocido y por ello necesitaron realizar pruebas, experimentos, que les permitieran avanzar en su investigación personal en arquitectura. Con este dato llegamos a una de las aportaciones más importantes de los modelos: que nos permiten comprobar nuestras ideas. En los casos de estudio se han ido desgranando, una por una, las comprobaciones de estos arquitectos y cómo les ayudaron para conseguir el estado final de sus obras.

B.2. Avanzar supone riesgos

Una vez hecho hincapié en la capacidad que tienen los modelos para hacer comprobaciones sobre la idea inicial, en este capítulo nos vamos a centrar a continuación en un aspecto que conllevan las comprobaciones de los experimentos: el riesgo. Este factor es la raíz de esta investigación, los arquitectos estudiados supieron asumir riesgos que otros no pudieron, o no supieron asumir:

Cada vez se ponen menos en duda los axiomas teóricos que sirven de base a los cálculos y las aguas continúan discurriendo plácidamente por sus antiguos cauces.

³ Ver anexo 1 pregunta 9.

Félix Candela. *En Defensa del formalismo*. Extracto de la conferencia leída en la “Casa del Arquitecto”, México, abril 1956.

El avance en el conocimiento siempre ha estado asociado al riesgo. En cualquiera de las manifestaciones del riesgo: ya sea porque se ha necesitado recurrir al empleo de recursos que estaban destinados a conceptos que ofrecían garantías, ya sea por un riesgo de la integridad física, etc. Lo que siempre ha ocurrido es que cualquier puesta en duda de lo convencional ha solido ocasionar situaciones incómodas, ha puesto en peligro la tranquilidad de personas que vivían de esas convencionalidades, siempre ha solido haber una gran resistencia al cambio.

Romper esa aparente calma que aporta lo “seguro” es lo que ha hecho avanzar el conocimiento en cualquier ámbito del saber, también la Arquitectura, aunque esto haya conllevado asumir riesgos.

Los casos estudiados son un continuo ejemplo de ello. El más espectacular de ellos, bajo mi punto de vista, es el caso de la construcción del Multihalle de Mannheim por Frei Otto. Esta construcción experimental no ha dejado de sorprender desde sus inicios por su audacia.

El primer modelo conocido es un experimento con una celosía doblada por efecto de la compresión sus bordes, se trataba de un pabellón experimental para la German Building Exhibition de 1962 en Essen⁴ de pequeñas dimensiones. Al comprobar su funcionamiento, sin una mayor comprobación intermedia, en la primera ocasión que tuvo el arquitecto alemán decide que va a construir ese mismo experimento, pero 100 veces más grande ¿Qué seguridad tenía de que aquello fuera a funcionar a esa escala?

Junto a este experimento, el otro modelo más sorprendente a mi modo de ver es también el último modelo; el propio edificio. En él se realizaron las últimas pruebas de carga de nieve, con contenedores llenos de agua ¡Qué seguridad y qué confianza tuvieron los que le encargaban el proyecto a Frei Otto! ¿Qué hubiera pasado si, después de construir ese inmenso pabellón (que costó gran cantidad de dinero, tiempo y esfuerzo) y después de hacer las pruebas, se comprobaba que no era viable? Riesgo, rozar el fracaso, estas situaciones están unidas a la gloria del avance del conocimiento. En una entrevista con Juan María Songel nos habla de ese riesgo:

⁴ El pabellón experimental para la German Building Exhibition de 1962 en Essen, fue una estructura de 15x15m construida por Frei Otto y Bernd Friedrich Romberg en Deubau, Essen en 1962. Más detalles en el siguiente apartado dentro de este capítulo, está narrado como uno de los modelos previos a los modelos con la forma definitiva.

J.M. Songel: Es interesante observar cómo los pioneros de la ingeniería del siglo XX, como Robert Maillart, Eduardo Torroja, Eugène Freyssinet y otros, también efectuaron estas comprobaciones físicas, aunque cada uno a su manera.

Frei Otto: Sí, y a todos se les cayó alguna obra; ahora me acuerdo de algún caso de Freyssinet y Laffaille... Por otra parte, sin estos ensayos no hay conocimientos, de modo que hay que correr el riesgo; la cuestión es si el homicidio es por imprudencia o por torpeza.⁵

Ante dosis tan grandes de riesgo, el arquitecto ha encontrado siempre una salida donde poder “amotiguar” los golpes de sus intentos de avance en lo desconocido: el trabajar con modelos.

El ejemplo que hemos descrito antes es un caso límite de que el modelo a veces ha de ser experimentado en muchas escalas y con todos los elementos que puedan intervenir simultáneamente.

El otro gran caso de estudio de Frei Otto, el Pabellón Alemán de la Expo'67, la razón es patente, al no partir de una idea preconcebida de la forma del proyecto, sino partir de que la forma la obtendrá de determinados comportamientos estructurales. En este caso, el dibujo va después del modelo, para poder obtener las medidas reales de los elementos constructivos. Incluso inventó un sistema en el que poder hacer líneas “topográficas” a sus proyectos de membranas traccionadas mediante haces de luces planos, pero siempre después de los modelos, que le permiten observar una forma compleja difícilmente de representar.

En el caso de Pérez Piñero ocurre algo diferente. Las uniones son de tal sofisticación, que no fue posible una comprobación previa en materiales o tamaños de menor escala. Pérez Piñero trabajó en muchos casos desde el principio con el modelo a escala real final.

Es verdad que tiene comprobaciones previas en modelos, pero llega un momento, como es el encargo del Pabellón para la conmemoración del XXV años de Paz, en el que su trabajo empieza con los elementos de la cubierta en tamaño natural.

⁵ Ver Anexo 1 pregunta 10.

En uno de los casos de estudio, el de Emilio Pérez Piñero en las dos obras analizadas, llama la atención que no le hacía falta dibujar previamente sus estructuras, sólo se conservan planos de la estructura desplegable que hizo como pabellón en los XXV Años de Paz, que más adelante estudiaremos. Este dato no es por una mala gestión en la conservación de sus documentos sino porque no los hacía. Únicamente realizaba modelos de sus estructuras para calcular la forma, el movimiento y la resistencia. Esto tiene dos explicaciones (Puertas, 1989): la primera es su excepcional visión tridimensional (Castañón, 2018), la otra es que sus diseños, al contar con el movimiento y ser de una gran complejidad para ser representadas por llevar barras en las tres direcciones principales del plano, lo dibujes por donde lo dibujes siempre hay barras que no se ven.

Tras estas reflexiones conviene saber si es posible traducir estos riesgos a nuestra profesión. Es preciso comprobar si estos experimentos, con sus riesgos, son realmente “hitos” en la historia de la arquitectura, hitos admirables, pero en los que no nos podemos identificar, o si hay algo que nos podamos o debamos aplicar. Algo que podamos trasladar a nuestras vidas y con lo que podamos hacer avanzar nuestra propia investigación personal en el ejercicio de la profesión. En respuesta a esta cuestión hacemos notar que estas comprobaciones enriquecen de experiencia física los proyectos y da seguridad al arquitecto, además de plantearse cuestiones que al principio eran incuestionables.

¿Y en el ejercicio docente? ¿Y en el aprendizaje? ¿Hacer experimentos, asumir riesgos hace avanzar nuestro conocimiento? Se suele decir que nada predispone a conocer mejor que lo que se ama. Es un estímulo que nos hace “esponjas” capaces de absorber todo. El riesgo en sí mismo es atractivo pero no tanto, lo que más atrae es un fin imponente, por lo que uno está dispuesto a asumir todos los riesgos ¿Seríamos capaces de transmitir en las aulas un amor por la arquitectura capaz de hacer asumir cualquier riesgo?

De mi experiencia personal en las aulas y con alumnos en el ejercicio profesional, y a la luz del ejemplo de los autores estudiados, todos profesores en algún momento de sus carreras, puedo decir que trabajar con modelos físicos estructurales aporta a la enseñanza, sobre todo, confianza. Los alumnos interiorizan más profundamente los conocimientos al comprobar, de su propia mano, el funcionamiento asociado a la forma final.

En esta aportación, la seguridad en la asimilación de los conceptos, hay que tener en cuenta el alcance del conocimiento particular respecto al universal. En una asignatura teórica (conocimiento universal), al utilizar únicamente el lenguaje verbal, inmaterial, el alcance no tiene límites, se pueden abordar ejemplos de todo tipo, pero ¿El alumno llega a comprender de tal manera que pueda él mismo materializar eso que recibe de palabra? En muchos casos sí, en otros no.

Al descender al caso particular, trabajar con lo físico es siempre un caso particular, se requiere una labor de preparación del profesor para hacer saltar al alumno desde el caso particular, con su riqueza pero con su lentitud y coste, al universal, con su abstracción y rapidez, para sacarle todo el jugo al caso materializado.

Esta manera de enseñar, desde lo físico, desde lo particular, siempre tendrá un impedimento que lo hará ir más despacio: la manera de ser de lo físico. Todo lo material tiene tamaño, peso, precio, tiempo de montaje, etc. Es razonable pensar que se llega a enseñar más ámbitos del saber únicamente desde el lenguaje hablado, pero en muchos casos, y la geometría y la estructura son claros ejemplos de ello, esos conocimientos no llegan a interiorizarse hasta que no se ponen en práctica.

Por tanto, es labor del profesor elegir cuidadosamente qué casos conviene trabajar sobre modelos físicos que puedan transportar adecuada y profundamente al conocimiento universal a los alumnos.

B.3. Arquitectura temporal como ámbito adecuado para la experimentación en arquitectura

Construir para perdurar en el tiempo es una responsabilidad que es necesaria asumir por encima de los caprichos del arquitecto y del cliente, pensando en los que vendrán después.

En el caso de la Arquitectura, no sólo es patente esta responsabilidad, a ésta se suma además la correspondiente por el alto coste que suele conllevar el ejercicio de la profesión en dinero, tiempo, personas, esfuerzo, etc.

Pocas son las ocasiones en las que la arquitectura se encuentra en la tesitura de poder probar ideas que requieren un gran gasto, por eso mismo la investigación requiere de la paciencia necesaria hasta que las oportunidades aparecen.

La arquitectura temporal, o también llamada efímera, es la oportunidad más exclusiva que puede encontrar un arquitecto para saltar del concepto a la acción en los casos en los que sólo se pueden probar propuestas que requieren su construcción para su comprobación.

El problema que tiene este tipo de arquitectura es cuando se cometen excesos o se plantea una desproporción entre los medios utilizados y el fin para el que han sido diseñados.

De ahí que la tarea más importante del arquitecto que se puede permitir el lujo de hacer arquitectura temporal es hacer que su diseño sea proporcionado al esfuerzo que requiere.

Muchos abusos se han cometido por no cuidar esta premisa. Buen ejemplo de ello, aunque es un ejemplo un poco triste, son algunas de las exposiciones universales que hemos vivido recientemente. Casos flagrantes de despilfarro y posterior abandono de la arquitectura temporal mal planteada son las exposiciones temporales de Sevilla en 1992, de Zaragoza en 2008, etc.

Aunque también tenemos grandes ejemplos positivos actuales: Olimpiada de Londres de 2012 (Estadios portátiles, megaestructuras enormes...) La gran megaestructura necesaria para albergar los Juegos Olímpicos hizo necesario la construcción de estadios pero esta vez se pensaron como para una construcción portátil que después se pudiera instalar en cualquier otra parte y así no dañar un espacio de la ciudad condenándolo a convivir con un edificio destinado a un uso que ya pasó.⁶

B.4. Geometría técnica. El cómo de las formas

Con anterioridad, en estas mismas conclusiones, hemos hablado de la forma como encargada de darle unidad al proyecto y de su, a veces, necesaria correspondencia con el funcionamiento interno. En este apartado vamos a desarrollar otra faceta de la forma; su ser consecuencia de principios que nada tienen que ver con parámetros morfológicos.

Los autores estudiados parten desde principios físicos para llegar a la forma del proyecto, y sus modelos utilizados para trabajar en el proyecto son los únicos que les permiten dirigir en parte sus consecuencias formales.

Antes de hablar de los casos concretos conviene repasar los aspectos de los modelos que permiten esta manera de trabajar. En la presente tesis se han ido citando diferentes estrategias que parten desde la estructura, o mejor dicho desde el mecanismo por el que llegamos a la estructura, para llegar a la forma: la tracción de los cables, la articulación de las barras, la flexión de los listones, etc. Todos ellos “domesticados”, “racionalizados”, por los arquitectos gracias a su trabajo con modelos. Por tanto, más que preguntarnos qué mecanismos son los utilizados por los arquitectos, creo que la labor anterior más

⁶ BIESCAS, J.A. 2008. *“La Exposición Internacional de 2008: Un proyecto del siglo XXI”*. PUZ Prensas Universitarias de Zaragoza.

interesante es analizar qué elementos comparten entre todos estos arquitectos en esta manera de trabajar.

Tras enfrentar las obras de estos autores, lo que tienen en común es el haber llegado a elementos que soporten bien el cambio de escala de los modelos a la realidad y que todos han optado por sistemas que cumplen tener la optimización de recursos como principio generador de forma

Aunque de muy distintas maneras, los autores estudiados, utilizan la optimización como principio generador de forma y, por tanto, de proyecto. Esa búsqueda, de acuerdo con la tecnología de la época, sólo podía realizarse con modelos físicos. En la actualidad hemos llegado a representar con gran definición algunos de los principales comportamientos estructurales y su incidencia en la forma de los elementos estructurales, aunque nos queda mucho por avanzar en este campo como para utilizar los simuladores digitales como herramientas de form finding dentro del proceso de proyecto.

B.5. Mecanismos para llegar a estructura. Las articulaciones en los modelos para generar un determinado comportamiento estructural (esfuerzos axiales)

Una vez redactada una consideración acerca de los elementos comunes de estos arquitectos en relación a la forma, conviene recoger a continuación cómo materializaron este tipo de modelos de trabajo. Después de analizar cada caso, el elemento material común a todos que les permitió trabajar de este modo es la articulación, que les permitió trabajar con mecanismos (DEFINICIÓN) para llegar a la estructura final.

Hagamos un recorrido por los principales autores descritos en la tesis para poder compararlos. Gaudí utilizaba hilos para hallar la forma de una catenaria funcionando a tracción pura. Frei Otto por su parte, en su modelo para el Multihalle de Mannheim, utilizó para las articulaciones unas anillas metálicas diminutas a las que se ataban hilos que a su vez conectaban pequeñas barras, con ellas conseguía garantizar aún más la homogeneidad en sus modelos (Vrachliotis, 2017). Emilio Pérez Piñero, como veremos también más adelante, utilizaba en sus modelos unas uniones un poco más sofisticadas, fabricadas por él mismo (patente!!!), parecidas a tornillos con varias cabezas (Puertas del Río, 1983),... todos ellos buscaban lo mismo, aunque todos con fines muy distintos, que las fuerzas se transmitieran en el eje de sus elementos casi unidimensionales (las barras).

Es así, el uso tradicional de las articulaciones desde finales del siglo XIX con Graham Bell, era articular los extremos de las barras consiguiendo liberar a las barras (prácticamente de una dimensión al tener mucha longitud en relación a un espesor y profundidad despreciables) de su enemigo natural ante las distintas sollicitaciones posibles; los flectores, y simplificar el trabajo de los elementos estructurales únicamente en la dirección en la que mejor trabajan: a compresión y tracción.

Así, los ejemplos más notables sobre esta simplificación al liberar de esfuerzos que no sean axiales son los autores estudiados, donde Frei Otto destacará, como veremos más adelante, en los dos extremos porque los dos edificios estudiados suyos son el máximo exponente de trabajo a compresión y tracción pura. En cambio, Pérez Piñero rompe en parte este el tradicional uso de las barras al añadir una articulación intermedia que tensiones no axiales en cada barra.

C. El inicio de una era

Finalizamos esta tesis como la empezamos, haciendo referencia al inicio de una nueva era. Es también el inicio de una investigación que abarca muchos campos desde el mismo punto de vista: la forma coherente del proyecto, una vía en el avance del conocimiento de la arquitectura, el enriquecimiento de la profesión, la enseñanza y el aprendizaje de la arquitectura, etc. Mucho fruto espera el autor de esta semilla.

El proyecto, con este modo de trabajar, se efectuará por lo menos en dos pasos. Uno antes y otro después de la construcción del modelo. Para dejar “hablar”, con su simultaneidad, a la maqueta, para que con su coherencia se pueda llegar a la construcción final de aspectos a los que no se llegaba con la imagen de la mente y el dibujo. Se trata de hacer un proyecto, en el que al modelizarlo, se pueda seguir proyectando. Algo parecido a la cuestión de qué es antes, el huevo o la gallina, pero con el modelo y el proyecto.

Esta nueva visión, una nueva manera de abordar los proyectos, ni es la única ni posiblemente la que mejor se adecúe a todos los requerimientos de proyecto, pero lo que sí es evidente es que abre una vía a los proyectos en los que la forma es algo más allá del aspecto exterior, la última de las capas que dan unidad al proyecto. Este tipo de trabajo, con los modelos físicos, requieren una unidad mayor entre la técnica y el proyecto, y predisponen a lanzarse hacia lo desconocido, hacia nuevas rutas que la

arquitectura podría recorrer y, quién sabe si, como en los casos estudiados, enriquecerse. Es un riesgo que hace falta asumir.

BIBLIOGRAFÍA

ADDIS, B. *Toys that save millions. A history of using physical models in structural design*. Structural Engineer. The Institution of Structural Engineer. 2013.

ALBERTI, L. B. *The Ten Books of Architecture*, edición Leoni 1755 (escrito en 1443), Dover, Nueva York 1986.

AMEZQUETA, A. *Los pabellones de Estados Unidos y Alemania Occidental en la Expo'67*. Revista Arquitectura nº109, Madrid, 1968,

ARANA, J. *El Caos del conocimiento. Del árbol de las ciencias a la mañana del saber*. Editorial EUNSA, Pamplona, 2004.

ARNELL, P y BICKFORD, T. *Charles Gwathmey and Robert Siegel: Building and Projects, 1964-1985*. Icon Editions. Florida. 1985.

AROCA, R. *Arquitectura y estructura*. Clase magistral del 18 de septiembre de 2015 en la ETSAM. Madrid, 2015.

BAKER, J. *Ambitious Expo*. En la Revista "Canadian Architect". Toronto, 2007.

BANHAM, R. *Theory and Design in the first machine age*. MIT Press Ltd; Edición: 2 (1980). Londres, 1960.

BARRENA, S. *La belleza en Charles S. Peirce: Origen y alcance de sus ideas estéticas*. Ediciones Universidad de Navarra. Pamplona, 2015.

BENJAMIN, W. *La obra de arte en la época de su reproductibilidad técnica*. Walter Discursos Interrumpidos I, Taurus, Buenos Aires, 1989.

BUCHETTI, A. *La mayéutica y su aplicación como técnica de aprendizaje*. Reflexión Académica en Diseño y Comunicación Nº IX. Año IX, Vol. 9, Buenos Aires, Argentina. 2008.

BUSCH, A., *The Art of the Architectural Model*, Design Press, Nueva York, 1990.

CACHOLA SCHMAL, P. *El Pabellón: Placer y polémica en Arquitectura*. Catálogo de la exposición DAM, Ostfildern 2009.

CAMPO BAEZA, A. *An idea in the palm of the hand*, Ed Domus, 972. Milán, 2013.

CANDELA, F. *Emilio Pérez Piñero*, Revista Arquitectura nº 163-164, julio-agosto, Madrid, 1972.

CARAZO, E. *Los modelos a escala como alternativa al dibujo de Proyecto*, en Docci, M. (coord.) *Il disegno di progetto. Dalle origini al XVII secolo*. Roma. 1993.

CARAZO, E. *Maqueta física, modelo virtual*. Actas del 13 Congreso internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica, Valencia. 2010.

CARAZO, E. y GALVÁN, N. *Aprendiendo con maquetas. Pequeñas maquetas para el análisis de arquitectura* EGA Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica 2013.

CARAZO, OLIVARES y MARCOS. *Fenomenología y percepción en arquitectura. De la escala 1/1 a la miniaturización de los modelos físicos y virtuales*. Eduardo Carazo (Universidad de Valladolid,) Joel Olivares (Universidad Gestalt de Diseño de México), Carlos L. Marcos, Jorge Domingo, Ángel Allepuz, Pablo Juan, Justo Oliva, Ramón Maestre, Carlos Martínez, Mercedes Carbonell. (Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía. Escuela Politécnica Superior Universidad de Alicante). CARAZO, E. (2011), "Maqueta o modelo digital. La pervivencia de un sistema". EGA, Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica, Nº 17.

CHIORINO M. A., *Structural models: historical notes and new frontiers* in Levi F., Chiorino M. A. and Bertolini Cestari C. Eduardo Torroja - *From the philosophy of structures to the art and science of building*, Milán, 2003.

CHIORINO M.A. *La modellazione strutturale nel Novecento. Ragioni e diffusione dell'induttivismo sperimentale in Italia e all'estero*. Atti del 3o Convegno Nazionale di Storia dell'ingegneria, Nápoles, 2010.

CLARISSE, C. *Maquette d'architecture, Maquettes d'architectures*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, Londres, New York, 1993.

COWAN, H. J., GERO, J. S., DING, G. D., MUNCEY, R. W. *Models in Architecture*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, London, New York, 1968.

CULMANN, K. *Die graphische Statik*. Meyer und Zeller. Zürich, 1866.

DREW, P. *Frei Otto. Form and structure*. Ed. HarperCollins Distribution Services; Edición: 1ª ed. (1976) Del capítulo "Form Finding".

EISENMAN, P. *Idea as model*, Ed: Rizzoli. Nueva York. 1981.

ELSER, O. y CACHOLA, P. *El modelo de arquitectura: herramienta, fetiche, pequeña utopía*. Catálogo de la exposición DAM, Zurich, 2012.

EULER, L. *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudeates sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti*. Opera omnia Fussli, Turici, 1952. Traducido al inglés parcialmente en D. J. Struik. "A source book in mathematics", Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., Cambridge, 1969.

FRAMPTON, K, KOLBOWSKI, S. and Institute for Architecture and Urban Studies. *Idea as model*, Institute for Architecture and Urban Studies/ Rizzoli International Publications, Nueva York, 1981.

FRAMPTON, K. *Historia crítica de la arquitectura moderna*. 2ª ed., 1ª imp. de 03/2009 en Español Editorial Gustavo Gili, S.L. Dentro del capítulo El New Deal, : Richard Buckminster Fuller, Philip Johnson y Louis I. Kahn, 1934-1964

FULFORD, R. *Expo 67, Commemorative Album from Montreal's World Fair*. McClelland & Stewart Ltd. Toronto, 1968.

FULFORD, R. *This was Expo* McClelland & Stewart Ltd. Toronto, 1968.

G. PINO, F. *Centro Multiusos en Mannheim*. *Frei Otto* RITA nº5, abril 2016.

GERKAN, M. *Idea and Model. 30 years of Architectural Model*, Hamburger Architektur Sommer, Hamburgo, 1994.

GUTIÉRREZ, P. *El tiempo del modelo (virtual y real) de representación de la arquitectura*. Revista EGE nº9, Edita APEGA, Madrid, 2012.

HEYMAN J. *Structural Analysis: A Historical Approach*, Cambridge University Press. Cambridge, 1998

HOOKE, R. *A description of helioscopes, and some other instruments*. Londres, 1676.

HOSSDORF, H. *Das Erlebnis Ingenieur zu sein*, Basel: Birkhäuser. 2003.

HUERTA S. *The safety of masonry buttresses*. Proc. Inst. Civ. Eng., Engineering History and Heritage, 163 (EH1), Londres, 2010.

- HUERTA, S. *El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí*. Ingeniería Civil 129/2003. Madrid, 2003.
- HUIZINGA, J. *Homo ludens*, Ed. Española (2000), Alianza Editorial. Madrid, 1938.
- JASMIN, Y. *La petite histoire d'Expo 67*, Éditions Québec/Amérique, Quebec, 1997.
- JEANNERET, CH-E (Le Corbusier). *Towards a New Architecture*. Ed. Martino Fine Books (2014). Londres, 1927.
- JUAREZ, A. *A propósito de Robert Le Ricolais*. "Arquitectos" (n. 141). Madrid, 1993.
- JUAREZ, A. *El arte de construir con agujeros; Reflexiones en torno a Robert Le Ricolais*. Circo núm. 39, CIRCO M.R.T. Coop., Madrid, 1996.
- KURRER K.-E. *The history of the theory of structures: From arch analysis to computational mechanics*, Ed Ernst & Sohn. Berlin, 2008.
- LAGRANGE, J. L. *Essai d'une nouvelle méthode pour déterminer les maxima et minima des formules intégrales indéfinies*, Miscellanea Taurinensia (1762); Oeuvres de Lagrange. Vol. 1, Gauthiers-Villars, Paris, 1867.
- LIDDEL, I. *Frei Otto and the development of gridshells*. Case Studies in Structural Engineering. Volumen 4, 2015.
- MADERUELO, J. *Caminos de la escultura contemporánea*, Ed Salamanca. Universidad de Salamanca. 2012.
- MAINO, S. y GONZALEZ BÖHME, L. *Maqueta versus modelo en la asignatura de historia de las estructuras y la construcción*. Dentro del tema de la revista: El uso de modelos conceptuales y físicos en la asignatura de Historia de las Estructuras y la Construcción. Revista AUS n° 18, Santiago de Chile, 2015.
- MARTINELL, C. *Conversaciones con Gaudí*. Ediciones Punto Fijo, Barcelona 1969.
- MAXWELL, J. C. *On the Calculation of the Equilibrium and Stiffness of Frames*. Philosophical Magazine, Vol. 27, Londres, 1864.
- MÉRY, E. *Mémoire sur l'équilibre des voûtes en berceau*. Annales des Ponts et Chaussées, 1840.

- MILLER, M. *Expo'67 and the weight of utopia*. Revista "On site10: Architecture + weight. Montreal, 2003.
- MILLON, H. *In The Renaissance from Brunelleschi to Michelangelo. The Representation of Architecture*. Ed., Millon, Bompiani, Milan, 1994.
- MOON,K., *Modeling Messages. The Architect and the Model*, Monacelli Press, New York, 2005.
- MORILLO, J. *Las exposiciones universales en la literatura de viajes del siglo XIX*. Tesis doctoral D-UNED Universidad Nacional de Educación a Distancia. 2015.
- MUMFORD, L. *Arts and Technics* Columbia University Press. Recopilación de conferencias impartidas por Lewis Mumford en 1951 en la Columbia University, dentro de la "Bampton Lectures" que se organizan desde 1781. Nueva York, 1952.
- MÚÑOZ, M.T. Summer 1948. *Buckminster Fuller at Black Mountain College*. Architecture as an event. Artículo para la revista "Proyecto, progreso, arquitectura" nº3, Sevilla, 2010.
- ORTEGA Y GASSET, J. *Meditación de la técnica*. Publicado por Espasa Calpe. Colección Austral (1965) Madrid. 1939.
- ORTEGA Y GASSET, J. *Misión de la Universidad y otros ensayos sobre educación y pedagogía*. Revista Occidente. Capítulo V: "Cultura y ciencia", Madrid, 1930.
- OTTO, F. *Complete Works. Lightweight Construction. Natural Design*. Basel-Boston-Berlin: Birkhäuser, 2005
- OTTO, F. *Finding Form*. European Design Guide for Tensile Surface Structures. Berlín, 2004.
- OTTO, F., RASCH, B. *Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*. The reverse path Edition Axel Menges, Munich, 1992.
- OTTO, F. *Complete Works*. Para una mayor profundización acerca de las distintas líneas de investigación de Frei Otto, éstas están contempladas en el artículo "Natural formas-Architectural forms".
- OTXOTORENA, JM. *La construcción de la forma*. Servicio Publicaciones ETSA Universidad de Navarra. Pamplona. 1999.
- PALLASMAA, J. *Los ojos de la piel*. Gustavo Gili. Barcelona, 2006

PÉREZ ALMAGRO, M. C. *Estudio y Normalización de la colección de Emilio Pérez Piñero*. Tesis Doctoral Facultad de Historia de la Universidad de Murcia. Murcia, 2013.

PÉREZ ESCOLANO, V. *Escalas del minimalismo. Arquitectura y escultura*. Ed Castaño. Dentro del libro ¿Qué es la escultura moderna? Del Objeto a la arquitectura. Fundación Cultural Mapfre Vida. Madrid. 2003.

PÉREZ PIÑERO, E. *Estructuras reticulares tridimensionales*, Arquitectura nº112, abril. Madrid, 1968.

PÉREZ PIÑERO, E. *Estructuras reticulares tridimensionales*. Revista Arquitectura nº112, abril, pp1-18. Madrid, 1968.

PIGA C. *Storia dei modelli dal tempo di Salomone alla realtà virtuale*. Seriate, Ed: ISMES Istituto Sperimentale Modelli e Strutture. Roma, 1996.

PORTER, T. *How architects visualize*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1979.

PRADA POOLE, JM. *El modelo colgante de Gaudí y su reconstrucción. Nuevos conocimientos para el diseño de la Iglesia de la Colonia Güell*. Informes de la Construcción, Vol. 41 n.º 404, Madrid, 1989.

PUERTAS DEL RÍO, L. *Estructuras desmontables y desplegadas. Estudio de la obra del arquitecto Emilio Pérez Piñero*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral inédita. Madrid, 1989.

RADÓ, T. *The problema of the least área and the problema of Plateau*. Math Z. Nº32. Ohio, 1930.

RICHARDSON, M., *Model Architecture*, Country Life Vol 21. Monacelli Press, Nueva York, 1989.

RÍO, N. *Dibujos y Maquetas en el Proceso de Diseño Arquitectónico*. Archinect (Artículo en digital). Investigación y academia. 2007.

ROBLES PIQUER, C. *Los XXV Años de Paz, en Memoria de cuatro Españas. República, guerra, franquismo y democracia*, Barcelona, Planeta. Madrid, 2011.

ROLAND, C. *Frei Otto: estructuras: estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. Ed. Gustavo Gili, D.L. Barcelona, 1973.

ROWEL, M., CALVO SERRALLER, F., VEGA, A., ZULAIKA, J., SERRA, R., BADIOLA, T. *Oteiza, mito y modernidad*. Madrid. El Viso. 2004.

SÁNCHEZ, A. y HUERTAS, P. *Franquismo vs Franquismo. El laberinto ideológico de la dictadura 1936-1975* Madrid, Ed. Creaciones Vicent Gabrielle. Madrid, 2010.

SCHÖN, D. A., *Educating the reflective practitioner: toward a new design for teaching and learning in the professions*, Jossey-Bass, San Francisco, 1987.

SIERRA, J. R. *Dibujo y Arquitectura. Funciones, servicios, incompetencias*. Actas del XI Congreso Internacional EGA, Sevilla, 2006.

SILVETTI, J. *Representación and Architecture*, Carnegie-Mellon University. 1982.

SLOAN, J., KENNEALLY, R. *Expo 67: not just a souvenir*. Ed. University of Toronto Press, Scholarly Publishing Division. Toronto, 2010.

SONGEL, JM. *Frei Otto: Conversaciones con Juan María Songel*. Ed. Gustavo Gilli, Valencia, 2012

THEALL, D.F. *L'Expo- une form d'art unique en son genre*. Graphis Vol.23, No 132. McClelland & Stewart Ltd. Toronto, 1967.

TIMOSHENKO S. P. *History of Strength of Materials*, McGraw Hill. New York, 1953.

TOMLOW, J. *Das Modell. Antoni Gaudis Hangemodell und seine Rekonstruktion. Neue Erkenntnisse zum Entwurf für die Kirche der Colonia Güell*. Stuttgart: Institut für leichte Flachentragwerke. Universität Stuttgart. [texto en alemán, inglés y español] Stuttgart, 1989.

V. V. A. A. *Fenomenología y percepción en arquitectura. De la escala 1/1 a la miniaturización de los modelos físicos y virtuales*. Carlos L. Marcos, Eduardo Carazo*, Joel Olivares**, Jorge Domingo, Ángel Allepuz, Pablo Juan, Justo Oliva, Ramón Maestre, Carlos Martínez, Mercedes Carbonell. Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía. Escuela Politécnica Superior Universidad de Alicante *Universidad de Valladolid **Universidad Gestalt de Diseño de México. Innovaciones metodológicas en docencia universitaria: resultados de investigación. 2016.

V.V.A.A. *Las exposiciones universales*. Cátedra de Urbanística I. Curso 1984-1985. ETSA de Madrid. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Colección Cátedras nº8. Madrid, 1985.

V.V.A.A. *Monografía de análisis de autores: FREI OTTO*. Ed. Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Rosario. Autores: Luisina Biagetti, María Soledad Crosetti, Julián García, Franco López y Jimena Violante. Rosario, Argentina, 2010.

VALOIS, N., CHA, J. *L'architecture de paysage de l'expo 67*. Journal of the Society for the Study of Architecture in Canada. Toronto, 2013.

VILLANUEVA, L. *Las tres edades de la construcción*. Informes de la Construcción, Vol. 57, N° 498. Madrid, 2005.

VRACHLIOTIS, G. *Denken in Modellen*. KIT Publications. Karlsruhe, 2017.

WIGLEY, M., COLOMINA, B. *Are We Human? Notes on an Archaeology of Design*. Lars Müller Publishers. Zürich. 2018.

WINTER, J. *Finding Form. Towards an architecture of the Minimal*. The Architectural Review. Vol: 199. Iss: 1192. Londres, 1996.

WRIGHT, D.T. *Membrane forces and bucking in reticulated shells* J. Struct. Div., 91 (Feb, 1965). ASCE n° ST1

YANEVA, A. *Made by the Office for Metropolitan Architecture: an ethnography of design*, Rotterdam: 010 Publishers. Rotterdam, 2009.

YANEVA, A. *Obsolete Ways of Designing? Scale Models at the Time of Digital Media Technologies*. In: Jorg H. Gleiter, Norbert Korrek, Gerd Zimmermann, editor(s). *Die Realitt des Imaginren: Architektur und das digitale Bild*. Weimar: Verlag der Bauhaus-Universität Weimar; 2008.

YANEVA, A. *The Making of a Building: A Pragmatist Approach to Architecture*, Editorial: Peter Lang. Oxford, 2009. Págs 103-112.

YOUNG, Th. *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*. Londres, 1845.

ZALAMEA, F. *La figura y la torsión. Pasado y presente de una visión ondulada del mundo*. Institución Alfonso El Magnánimo. Valencia, 2010.

ANEXO 1: 10 Preguntas y respuestas extraídas de la entrevista a Frei Otto por el arquitecto y académico Juan María Songel en 2012.¹

¹ SONGEL, JM. "Frei Otto: Conversaciones con Juan María Songel" Ed. Gustavo Gilli, Valencia, 2012

PREGUNTA 1: Juan M^a Songel (en adelante JMS): Algunos ingenieros cuestionan la transferencia a la realidad de los resultados obtenidos mediante ensayos con maquetas. Lo que a pequeña escala se comprueba que es válido, no tiene por qué serlo necesariamente a gran escala.

RESPUESTA 1: Frei Otto (en adelante FO): Para eso hay fórmulas y reglas físicas muy sencillas. Sin duda es necesario conocer las leyes propias de las maquetas en el caso de que se utilicen para medir tensiones o esfuerzos. Nosotros construimos maquetas para conocer la forma y, una vez obtenida, construimos también maquetas para saber lo que ocurre en su interior. Sin duda, las maquetas más interesantes son las que generan formas optimizadas por el tipo de construcción de la maqueta; en esto consiste la especialidad de mi trabajo. En primer lugar se trata de construir maquetas que produzcan formas físicas para más tarde demostrar, mediante otro tipo de maquetas, que aquello se puede construir.

PREGUNTA 2: JMS: Si tomamos el ejemplo de las cubiertas para el estadio olímpico de Múnich, se dio un importante salto de escala respecto a la experiencia anterior del Pabellón de Alemania de la Exposición Universal de Montreal (1967).

RESPUESTA 2: FO: El estadio de Múnich es más grande, sin embargo, las luces eran más o menos parecidas, de modo que los dos edificios son muy similares y están contruidos con métodos muy parecidos, con cables de acero, con superficies mínimas, si por tales entendemos las superficies más pequeñas dentro de un marco o las tensiones superficiales biaxiales; en ambos casos eran muy similares. Los cálculos para el edificio de Montreal se realizaron por ordenador con un método muy sencillo. En el caso de Múnich, el Pabellón de deportes era algo más complicado; mientras que la piscina se llevó a cabo como el proyecto de Montreal, el estadio fue una combinación de cálculos por ordenador y construcción de maquetas.

¿Qué más se puede hacer que apoyarse en estos dos pilares para controlar el proyecto? Construir maquetas para generar la forma y, más tarde, comprobar las tensiones en maquetas y en la realidad. En el caso de Múnich medimos los esfuerzos reales en cada cable; probablemente se trate de la primera edificación en la que realmente supimos lo que ocurría en su interior. También conocíamos los peligros que podrían derivarse de las sobrecargas y lo que ocurría en la estructura cuando la sobrecargamos.

PREGUNTA 3: JMS: Quisiera volver a la importante cuestión que plantean los ingenieros respecto al salto de la pequeña a la gran escala en especial en lo que atañe a las maquetas generadoras de formas.

RESPUESTA 3: FO: Es muy sencillo. Si, por ejemplo, se tiene una maqueta de la misma forma y material y se aplican cargas de la misma manera, sus deformaciones son lineales respecto a las reales. Ésta es la condición fundamental. Se trataría tan sólo de comprobar si esa maqueta cumple dicha condición. Las maquetas necesarias para conseguirlo son a menudo muy caras. Si se trata de hormigón es muy difícil, pues el hormigón no puede reducirse de tamaño tan fácilmente y se deben reducir de tamaño todos sus componentes. Reducir un grano de árido a escala 1/100 es muy difícil, pero es posible. La cuestión sería con qué nivel de precisión puede construirse la maqueta. Sin embargo, ¿No muestra ya una sencilla maqueta de papel, como las de Eduardo Torroja, los peligros que amenazan precisamente con la inestabilidad? Naturalmente que sí, con lo que en ese caso no es necesario construir una maqueta tan cara.

Ésta es la cuestión a la que sólo puede responderse en cada caso particular. Los principios fundamentales de la experimentación con maquetas son conocidos, por ello la cuestión de si se puede comprobar o no están fuera de duda. ¡Por supuesto que se puede!, es más, se debe. ¿Son los cálculos [matemáticos] lo suficientemente seguros como para permitir que nos limitemos tan sólo a calcular? Por un lado tenemos la física experimental y, por otro, la teórica. Ningún físico teórico, a pesar de que se puede llegar a nuevos conocimientos mediante la reflexión y las maquetas, se atreve a

publicar o dar a conocer un resultado de sus trabajos si no los ha comprobado mediante ensayos. Albert Einstein llegó a su famosa fórmula de la teoría de la relatividad a partir de los resultados de ensayos, más tarde realizó cálculos y después se llevaron a cabo las comprobaciones. Es muy poco serio, sencillamente frívolo, dar a conocer nuevos conocimientos sin comprobación.

PREGUNTA 4: JMS: ¿Cree que le ha influido el haber conocido la metodología experimental de la Bauhaus?

RESPUESTA 4: FO: No, en aquel entonces (viaje USA) no sabía lo se había hecho en la Bauhaus. Incluso la influencia de Gaudí llegó más tarde. Invertir formas para que funcionen a compresión lo conocí a través de un amigo ingeniero del campo de prisioneros en el que estaba en su grupo de trabajo. Ese tema se conoce desde Hooke, Newton. En aquel momento, fue gracias al conocimiento de los diagramas de fuerzas (estática gráfica), con ella me di cuenta que se dan las mismas formas a compresión, tracción o flexión, es sólo una cuestión del signo.

PREGUNTA 5: JMS: La vigencia actual de los ensayos con maquetas en la búsqueda de la forma también tiene relación con los objetivos docentes, como herramienta didáctica.

PREGUNTA 6: FO: Nos preguntamos por qué pudieron construir edificios estables los grandes maestros constructores de bóvedas de la edad media – también en el caso de Antoni Gaudí-, que no disponían de todos estos métodos de cálculo, y por qué hoy en día se producen estos fallos a pesar de todo este enorme arsenal informático. Los fallos se producen entre los profesionales, estudiantes, alumnos o imitadores, que hacen cosas sin realmente haberlas comprendido, y parece como si los modelos de la estabilidad no se hayan estudiado con suficiente profundidad.

Cuando construimos el Pabellón para la Exposición Federal de jardinería en Manheim (1975), en colaboración con los despachos Arup y Happold, también

hicimos análisis estáticos con maquetas, que permiten una mayor aproximación a la realidad, porque, aunque sean sencillas, estas estructuras pueden reajustarse y, sobre todo, permiten detectar los peligros que pueden presentarse. Esto es algo que hace mucha gente hoy en día.

PREGUNTA 6: JMS: Los intentos sistematizadores también conectan con los planteamientos racionalizadores de la arquitectura germana de la década de 1920: Walter Gropius produjo un gran número de combinaciones espaciales a partir de elementos modulares de grandes dimensiones, Alexander Klein exploró los tipos de viviendas a partir de las variaciones posibles de las plantas, Hermann Muthesius vio en los tipos una expresión de lo esencial o incluso de lo inmaterial. En su caso, los croquis de sistematizaciones también parecen dar un paso adelante en estos planteamientos racionalizadores.

RESPUESTA 6: FO: Sí, he intentado sistematizar con el fin de poner un poco de orden en esta casi infinita gama de posibilidades. Ocurrió cuando empecé a dar clases en la Hochschule für Gestaltung de Ulm, mi primera experiencia docente. El compromiso docente exigía cierto orden, pero, al mismo tiempo, también tenía que abarcar o tener en cuenta tanto la extensión como la concentración; concentrarse en algunos lugares para poder aventurar verdaderos avances hacia el futuro, algo que me interesa más que el hacer historia.

PREGUNTA 7: JMS: Naturalmente, el papel de los croquis de sistematizaciones es muy importante no sólo para clasificar y ordenar, sino también para inventar nuevas posibilidades.

RESPUESTA 7: FO: Sí, bueno, porque uno llega a cosas que todavía no han sido estudiadas a fondo, y entonces se van llenando los vacíos; yo llamo a esto “método sistemático de la invención”, pero tan sólo es un método. El proceso mediante el cual una cosa se combina con otra puede realizarse de

una manera muy sistemática, y he llevado a cabo una serie de invenciones que tienen su origen en esta combinatoria.

Sin embargo, las cosas verdaderamente importantes no surgieron de allí, sino en gran parte de observaciones fortuitas o causales realizadas durante los experimentos, algunos planteados de una forma totalmente sistemática. Siempre he combinado la experimentación sistemática con la fortuita o causal, donde el azar tiene su papel; si se descubre algo de una manera accidental, no se puede ser tan tonto como para desecharlo simplemente porque no entra dentro de la sistematización. Estoy convencido de trabajando sólo de una manera sistemática no se puede inventar nada.

PREGUNTA 8: JMS: ¿En qué medida son todavía hoy necesarios todos esos ensayos y experimentos físicos con maquetas?

RESPUESTA 8: FO: El ordenador sólo puede calcular lo que ya está conceptualmente dentro de él; en los ordenadores sólo encuentras lo que buscas. Sin embargo, con la experimentación libre se puede encontrar lo que no se ha buscado. Me resisto a la mentira que afirma que con el ordenador se ha encontrado todo, pues de él no pueden salir nuevas invenciones, sólo se puede sacar lo que en él ya se ha metido.

En realidad, donde se crea todo es en nuestro cerebro, un ordenador mucho más eficiente, que puede hacer combinaciones mucho mejores, aunque de forma imprecisa e inexacta y muy a menudo torpemente, pero es capaz de hacerlo. Por ello quienes sólo confían en el cálculo por ordenador son los torpes de nuestra profesión.

Debo añadir que desde 1965 todos mis edificios han sido calculados con el ordenador. Esto es algo muy natural que no hace falta poner en duda, pues es una práctica habitual en la actualidad.

PREGUNTA 9: JMS: Por tanto, es necesario haber desarrollado también esta capacidad de percibir y apreciar aquello que se presenta de forma casual.

RESPUESTA 9: FO: Sí, y observar constantemente. En primer lugar observar las formas de la naturaleza inerte y ver lo que sucede en ella, pues las formas de la naturaleza viviente, que también he estudiado, son mucho más complejas, casi impenetrables y opacas.

PREGUNTA 10: JMS: Es interesante observar cómo los pioneros de la ingeniería del siglo XX, como Robert Maillart, Eduardo Torroja, Eugène Freyssinet y otros, también efectuaron estas comprobaciones físicas, aunque cada uno a su manera.

RESPUESTA 10: FO: Sí, y a todos se les cayó alguna obra; ahora me acuerdo de algún caso de Freyssinet y Laffaille... Por otra parte, sin estos ensayos no hay conocimientos, de modo que hay que correr el riesgo; la cuestión es si el homicidio es por imprudencia o por torpeza.

