



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Cubiertas tensadas: la estructura y la técnica
desnuda como generadoras de proyectos

Tensile roofs: structure and bared technique as the
germ of projects

Autor

Claudia Gadea Milián

Director

Eduardo Delgado Orusco

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2019

Cubiertas tensadas

**La estructura y la técnica desnuda
como generadoras de proyecto**

Trabajo de Fin de Grado

Autora: Claudia Gadea Milián

Tutor: Eduardo Delgado Orusco

PRÓLOGO	5
Motivaciones personales	6
Objetivos y estructura del trabajo	7
Metodología y fuentes	8
EL ARTE DE CONSTRUIR. ARQUITECTURA E INGENIERÍA	11
CUBIERTAS TENSADAS	15
Origen	21
Maquetas como herramientas proyectuales, constructivas y experimentales	23
PRIMERAS APLICACIONES DE LAS ESTRUCTURAS TENSADAS A LA ARQUITECTURA. PRECEDENTES	31
CONSOLIDACIÓN DE LA ARQUITECTURA TENSADA. EQUIVALENCIA DE PROYECTO Y ESTRUCTURA	41
Gimnasio Nacional de Yoyogi, Tokio, 1964	43
Parque Olímpico, Munich, 1972	57
EPÍLOGO ESPAÑOL	73
CONCLUSIONES	79
BIBLIOGRAFÍA Y CRÉDITOS DE LAS IMÁGENES	82

PRÓLOGO

El origen de la arquitectura tensada se remonta a las tiendas realizadas por las culturas nómadas y a los puentes colgantes o en suspensión, sin embargo, ambas estructuras presentaron una mínima evolución durante la Edad Media y el Renacimiento.

No fue hasta el siglo XIX, gracias a la Revolución Industrial y el gran desarrollo tecnológico y constructivo que conllevó, cuando realmente se produjo un avance en las estructuras tensadas. Esto se debió en gran medida al desarrollo del acero como material de construcción, cuyas propiedades y cualidades materiales permiten trabajar en estructuras sometidas a tracción. Todo ello se plasmó mayoritariamente en los puentes en suspensión o de banda tensada.

Estos avances empezaron a materializarse también en la arquitectura, de la mano de ingenieros, a finales de dicho siglo, aplicando los principios de las estructuras tensadas en edificios, pero limitados por las formas estructurales de los puentes en suspensión.

A principios del siglo XX, muchos arquitectos, atraídos por la eficiencia de las estructuras a tracción, comienzan a interesarse por este campo, reinterpretando las estructuras tensadas tradicionales, las tiendas nómadas, y aportando alternativas formales.

Estas primeras aplicaciones de las estructuras tensadas supusieron un gran avance, sin embargo, su consolidación y la consecución de la integración y armonía entre estructura y forma no se produjo hasta la década de los 60, fruto de la sinergia entre ingenieros y arquitectos. Gracias a esta unión, se diseñaron y construyeron grandes obras en las que estructura y proyecto convergen, ya que en ellas, la técnica es una disciplina interna del proyecto y las decisiones estructurales y materiales son actos simultáneamente constructivos, proyectuales y estéticos.

Motivaciones personales

El presente trabajo forma parte de un proyecto de investigación personal mayor, tanto teórico como práctico, centrado en cómo la estructura, en sí misma, es capaz de generar espacios de gran interés y por ende, generar proyectos.

La metodología utilizada habitualmente para proyectar, en gran medida, centra el diseño proyectual en la búsqueda de espacios que generen interés, sin atender a la estructura. Por lo tanto, durante el desarrollo posterior del proyecto, esta metodología conlleva la búsqueda de una estructura que permita construir y habitar dichos espacios proyectados. Este proceso, en la mayoría de los casos, genera incoherencias, ya que estructura y proyecto no están perfectamente integrados.

Para la consecución de un proyecto coherente en su totalidad, se propone una metodología proyectual diferente a la usual, cuya base es el estudio y análisis estructural, focalizado en la investigación de los espacios que generan y definen. Esta metodología permite proyectar espacios de gran interés que derivan directamente de la estructura que los conforma, lo que supone la convergencia de proyecto y estructura.

Dicho método proyectual conlleva el estudio del comportamiento y funcionamiento tanto de estructuras como de los materiales que las conforman, lo que hace indispensable la cooperación entre arquitectos e ingenieros. Este modo de proyectar, así como esta colaboración, se produce con mayor intensidad en proyectos de estructuras tensadas y concretamente en las cubiertas tensadas, por lo que su estudio y análisis es de gran importancia y pertinencia para el desarrollo de dicha investigación personal.

Además, el estudio en la presente Escuela de Ingeniería y Arquitectura, posibilita y potencia tanto los conocimientos técnicos para entender, desarrollar y calcular estructuras, como la colaboración y el intercambio de ideas con estudiantes y profesores pertenecientes a la disciplina de la ingeniería, lo que ha posibilitado un aprendizaje y una comprensión mayor en el ámbito técnico y estructural de la arquitectura.

Este proyecto de investigación personal comienza en el segundo curso del grado, poniéndolo en práctica en la asignatura de Proyectos II, gracias a los primeros conocimientos estructurales aprendidos en la asignatura de Estructuras I. El aprendizaje estructural continúa en los años posteriores, permitiendo continuar esta investigación los diferentes talleres de proyectos. Además, la estancia y el estudio en la Universidad de Amberes con el programa Erasmus y la participación en la asignatura *Studio Bouwcultuur* potencia esta investigación, ya que se basaba en esta metodología para el diseño proyectual.

Tras las experiencias prácticas realizadas a lo largo de la carrera, el presente Trabajo de Fin de Grado constituye una parte más de este proyecto personal, centrado en la investigación teórica tanto de la aplicación y el desarrollo como del resultado de ésta metodología, la cual se ve perfectamente reflejada en las cubiertas tensadas, fruto de la sinergia entre arquitectura e ingeniería

Objetivos y estructura del trabajo

La arquitectura y la ingeniería, a pesar de ser dos disciplinas diferentes, provienen de un tronco común, la arquitectura como la definía Vitruvio¹, basada en el equilibrio de tres principios, *venustas, utilitas y firmitas*.²

Con la finalidad de lograr estos principios, la sinergia entre arquitectura e ingeniería es indispensable, sin embargo, desde la disociación de ambas profesiones en el siglo XVIII, la colaboración entre ambas no ha sido tan profunda ni generalizada como debería. A pesar de ello, la arquitectura tensada, desde sus inicios, es una de las excepciones más notables, debido en gran medida a la relación directa entre tensión y forma, característica principal e intrínseca de las estructuras tensadas. Por ende, la finalidad del trabajo es estudiar y analizar, a través de diferentes ejemplos, las cubiertas colgantes tensadas, entendidas como estructuras generadoras de proyectos.

El presente trabajo se estructura en cuatro partes, atendiendo a los objetivos que pretende.

En la primera parte se analiza la relación entre arquitectura e ingeniería a lo largo de la historia, con la finalidad de entender y explicar la importancia de la unión de ambas disciplinas, unión imprescindible para lograr que proyecto y estructura converjan completamente.

La segunda parte estudia las cubiertas tensadas, entendidas como uno de los ejemplos de colaboración más generalizada e intensa entre arquitectos e ingenieros, su origen, su evolución y sus características, así como su investigación y desarrollo a partir de maquetas.

La tercera parte se centra en las primeras aplicaciones de las estructuras tensadas a la arquitectura, la construcción de las primeras cubiertas tensadas de redes de cables del mundo, su concepción, su solución estructural, su diseño, su difusión e influencia posterior... en definitiva, su estudio como precedente de la arquitectura tensada.

La cuarta y última parte se centra en el estudio de dos obras que suponen la consecución de la consolidación de la arquitectura tensada, de la unicidad de proyecto y estructura. En ellas, las cubiertas colgantes tensadas son entendidas como estructuras generadoras de espacios y proyectos, además de como aplicaciones directas de la ingeniería y la tecnología a las obras arquitectónicas.

Finalmente, en el epílogo se analiza la presencia de estas estructuras dentro de nuestro país así como el estudio más detallado y conciso de algunas de estas obras.

¹ Marco Vitruvio en el Tratado *De Architectura*. Año 15 a.C

² Traducción del italiano, *belleza, utilidad y firmeza*, traducción de la autora

Metodología y fuentes

En la fase inicial del trabajo, como punto de partida, se realizó un estudio general pero conciso de las estructuras tensadas con la finalidad de entender su funcionamiento y los principios estructurales que las rigen. Una vez comprendida esta base se procedió a investigar los orígenes y la evolución de la aplicación de estas estructuras, tanto a la ingeniería como a la arquitectura, y por ende, la relación de estas disciplinas a lo largo de la historia y concretamente en el desarrollo y el diseño de éstas estructuras.

A continuación, la investigación se centró en el estudio de las cubiertas tensadas, y con mayor énfasis en las de redes de cables, de sus características, fundamentos y experimentación mediante modelos para su conocimiento y desarrollo, como aplicaciones más notables de dichas estructuras. También se procedió a la búsqueda de las obras pioneras en su utilización en la arquitectura, lo que condujo a la traducción y lectura del libro “*ВАНТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ В ЗРЕЛИЩНЫХ ЗДАНИЯХ*”³, publicado por la Universidad Estatal de Arquitectura e Ingeniería Civil de Nizhny Novgorod, ciudad en la que se erigieron las primeras cubiertas tensadas.

Posteriormente se realizó una intensa búsqueda de cubiertas tensadas construidas dentro y fuera de nuestro país, con su respectivo análisis, para proceder a la selección de aquellas que supusieron la consolidación de la arquitectura tensada y por ende, de la armonía entre proyecto y estructura. Consecuentemente, las obras estudiadas, en las cuales la estructura per se es la generadora del proyecto, son el Gimnasio Nacional de Yoyogi, Tokio, 1964, y el Parque Olímpico de Munich, 1972, en el panorama internacional y la Estación de Servicio de los Enlaces ,1962, y la Capilla del Colegio de los Marianistas, 1968, ambas en Zaragoza, en lo referente al panorama nacional.

Ulteriormente, se procedió a la búsqueda, y análisis, de información más concreta y técnica de dichos proyectos, y por lo tanto de sus estructuras, pero también de su investigación y experimentación, y de la colaboración entre arquitectos e ingenieros en el desarrollo del diseño de la obra. Esta búsqueda y extracción de información se realiza a partir de libros y textos especializados, archivos personales de los arquitectos, entrevistas publicadas e incluso la visita personal a algunas de las obras seleccionadas.

³ Traducción del ruso “*Construcciones tensadas en edificios dedicados al ocio*”, traducción de la autora

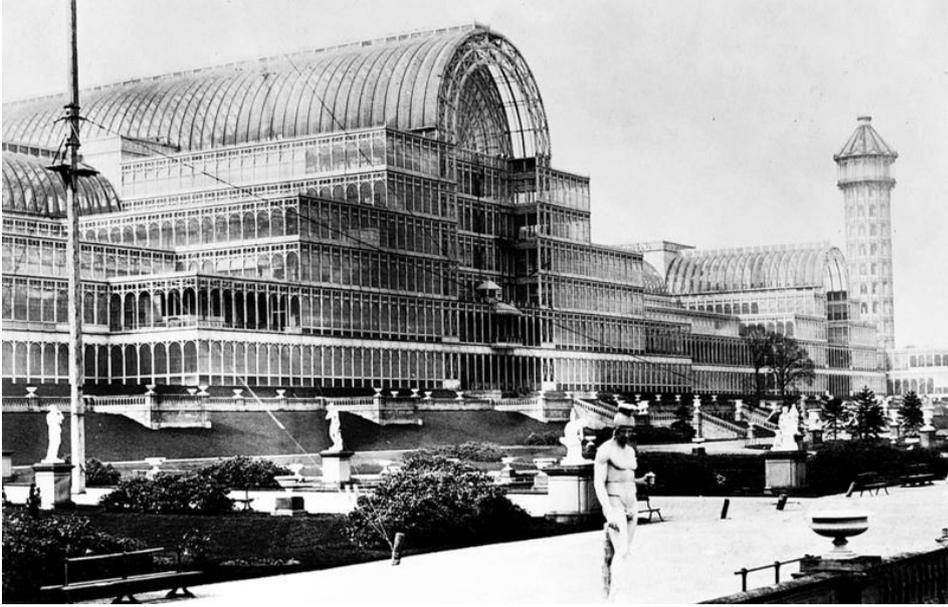


Fig. 1 Crystal Palace, Exposición de Londres 1851
Fig. 2 Pabellón de las Máquinas, Exposición de Parias, 1889

EL ARTE DE CONSTRUIR. ARQUITECTURA E INGENIERÍA

“Todo arte precisa de una técnica aunque a veces la técnica que requiere es elemental. Esto es evidente en la arquitectura, porque para construir es necesario conocer las técnicas de la construcción.”⁴

En la actualidad, la arquitectura y la ingeniería son dos profesiones distintas, sin embargo, ambas derivan de un tronco común, la arquitectura según la definió Vitruvio con sus tres principios básicos, *utilitas, firmitas y venustas*.

El avance de conocimiento conllevó a la necesidad de especialización, provocando la disociación de ambas profesiones en el siglo XVIII, con la creación de las escuelas de ingeniería y las asociaciones de ingenieros. A finales del siglo XVIII, la aparición del hierro como nuevo material de construcción genera un mayor conflicto entre ingenieros y arquitectos. Mientras que los arquitectos mantienen una posición conservadora, rechazando los nuevos materiales y tecnologías, los ingenieros se interesan profundamente por sus propiedades y su comportamiento, desarrollando nuevas teorías estructurales.

Dichos estudios e investigaciones, unidos a la reaparición de la estructura como elemento visible y esencial del proyecto, conduce a que los ingenieros se introduzcan en el campo de la arquitectura, rompiendo con el clasicismo e historicismo y realizando enormes avances que les permitieron concebir y construir grandes obras con las que se inició la arquitectura del hierro. Prueba de ello son las Exposiciones Universales. La exposición de Londres de 1851, con la construcción del Crystal Palace, y la de Paris en 1889, con la Torre Eiffel y el Pabellón de las Máquinas, marcan respectivamente el origen y el culmen del conflicto entre ambas profesiones, ya que dichas obras supusieron la transición de los ingenieros del campo utilitario al de las construcciones emblemáticas.

La aparición y desarrollo del hormigón armado a finales del siglo XIX generó la misma reacción, por parte de ambos colectivos, que con respecto a las estructuras metálicas. Sin embargo, la Exposición de Paris de 1900, con la construcción de pabellones y puentes que manifiestan las grandes posibilidades de este material emergente, genera un gran impacto internacional que provoca que los arquitectos lo acepten de manera casi inmediata.

⁴ Leonardo Fernández Troyano, “Arquitectos e Ingenieros. Historia de una relación”, *Revista de obras públicas: Organo profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos* 3460 (2005): 41-54



Fig. 3 Basílica de San Pío X.
Fig. 4 Frontón Recoletos

*“Es a principios del siglo XX cuando se produce una profunda transformación generalizada de la arquitectura, al aceptar las innovaciones tecnológicas y los nuevos materiales como parte fundamental de la nueva arquitectura. Si el hierro fue atacado y despreciado durante muchos años, el hormigón armado se aceptó más fácilmente. Se llegó así a la arquitectura que ha dominado casi todo el siglo XX. El arquitecto se incorporó a las nuevas tecnologías de la construcción y esto supuso una superación casi completa de la polémica arquitectos / ingenieros.”*⁵

A pesar de este conflicto, la colaboración entre ambos profesionales siempre estuvo presente en los casos en los que era necesario, sin embargo, es en el siglo XX cuando esta colaboración comienza a generalizarse y a resultar realmente fructífera. Grandes ejemplos de ello son las colaboraciones de Eugène Freyssinet con André Le Donné y Pierre Vago en la Basílica de San Pío X, pero también las colaboraciones permanentes e indivisibles entre grandes ingenieros y arquitectos como August Eduard Komendant y Louis Isadore Kahn, Fred Severud y Eero Saarinen, Ove Nyquist Arup y Jørn Utzon, etc.

Otros grandes ejemplos, en el panorama nacional, son las obras de Eduardo Torroja, en colaboración con arquitectos como Secundino Zuazo, en el Frontón Recoletos, o Arniches y Domínguez, en el Hipódromo de la Zarzuela, en las cuales, las cubiertas laminares de hormigón son los elementos principales y de mayor avance y repercusión.

En lo referente a la arquitectura del hierro, la aceptación por parte de los arquitectos fue más paulatina y tardía. A pesar de los grandes avances realizados por los ingenieros, plasmados principalmente en los puentes en suspensión pero también en algunos edificios en los que aplicaron los principios de las estructuras tensadas, no fue hasta mediados del siglo XX cuando realmente los arquitectos comienzan a interesarse por este campo. Es en ese momento cuando éstos reinterpretan las estructuras tensadas tradicionales, las tiendas nómadas, y llevan a cabo grandes aportaciones formales alternativas, que, combinadas con el conocimiento y la experiencia de los ingenieros, conducen a la consolidación de la arquitectura tensada.

⁵ Fernández Troyano, “Arquitectos e Ingenieros. Historia de una relación” 2005

CUBIERTAS TENSADAS

Se denominan estructuras tensadas a aquellos sistemas en los que el esfuerzo de tracción constituye la estrategia principal para la configuración de la estructura. Dicha definición agrupa dos sistemas diferentes: las estructuras presostáticas y las tensostáticas. Las estructuras presostáticas son aquellas estructuras que se estabilizan por presión de aire, mientras que las estructuras tensostáticas logran la estabilidad por tracción.⁶

La principal propiedad de las estructuras tensadas es que existe una relación directa entre la tensión a la que están sometidas y la forma que adoptan. Por ende, las características formales de estas construcciones son siempre dependientes del estado tensional de la estructura, que a su vez depende del diseño y la geometría de sus bordes o contorno.

Este aspecto tan singular es específico de esta familia de estructuras ya que, si analizamos y estudiamos el comportamiento de las estructuras convencionales, de madera, metal, hormigón o incluso de vidrio, al aplicarles tensión, éstas se deforman proporcionalmente al módulo elástico de cada material. Sin embargo, esta deformación siempre resulta mínima y despreciable en cuanto a la forma global de la obra, lo que contrasta significativamente con las estructuras tensadas.

Dicha relación directa igualmente provoca que las superficies resultantes siempre sean mínimas, ergo óptimas y de gran ligereza. Esto también difiere enormemente de la arquitectura convencional, a compresión y de gran pesadez, la cual presenta inconvenientes como el pandeo y la flexión de las estructuras. Por ende, el uso de estructuras tensadas supone la superación de estas dificultades y la consecución de la ligereza debido a su eficiencia y optimización, lo que conlleva la utilización de materiales mínimos y por tanto se trata de una construcción eficaz y sostenible.

La utilización de estas estructuras tensadas como sistema estructural y a su vez de envolvente, junto con los principios tan singulares que rigen estas estructuras, provocan que las cubiertas tensadas sean uno de los campos en los cuales la convergencia entre estructura y proyecto es más perfecta y generalizada, así como la sinergia entre arquitectura e ingeniería.

⁶ Es preciso aclarar que, a pesar de la existencia de estos dos sistemas diferentes al hablar de estructuras tensadas, el trabajo se acotará al ámbito de las estructuras tensostáticas y de sus aplicaciones en el campo de la arquitectura.

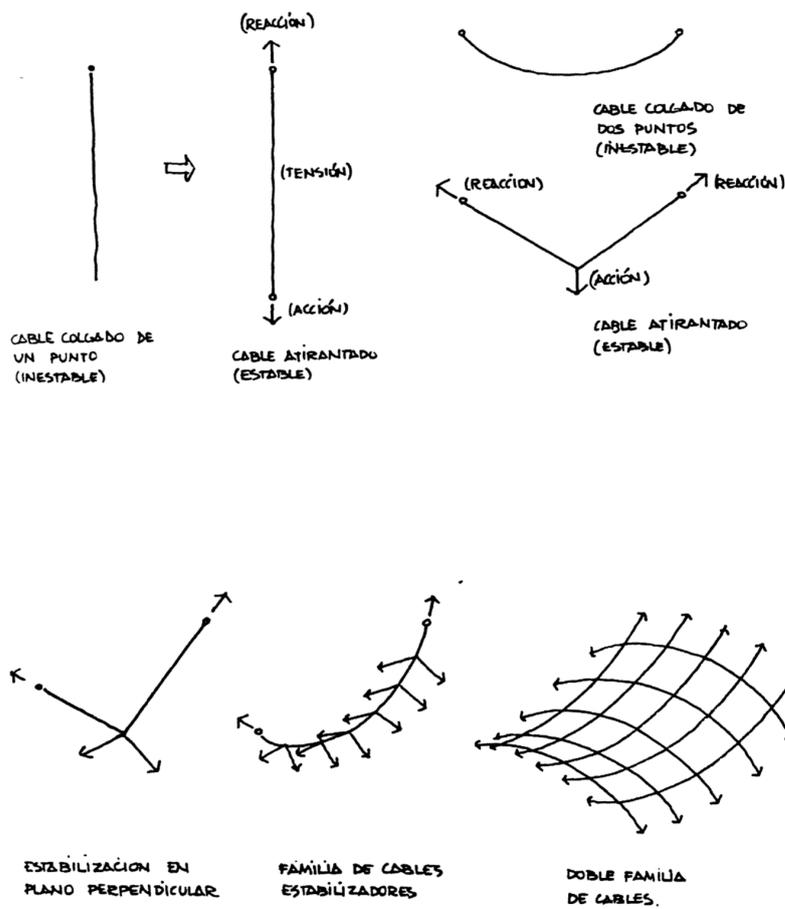


Fig. 5 Diagramas de estabilidad a tracción de cables y superficies.

El término cubierta tensada agrupa varias tipologías, atendiendo la clase de material estructural que las conforma, que trabaja a tracción proporcionándole rigidez a la estructura. Dichas cubiertas pueden ser de membrana o de red de cables⁷.

Las cubiertas tensadas de membranas utilizan un único material que actúa como estructura y envolvente, sin embargo, las de red de cables se basan en un entrelazado de tensores, los cuales trabajan como una superficie de membrana, y se recubren con otro material que actúa como envolvente.

A pesar de la existencia de estas dos tipologías, las cubiertas tensadas de red de cables se desarrollaron primero y son con las cuales se llevaron a cabo todas las investigaciones y estudios en lo referente a estructuras tensadas. Esto se debe a varios factores, uno de ellos es que en ese momento, no existían materiales superficiales capaces de resistir esfuerzos de tracción tan grandes y a su vez de proporcionar condiciones adecuadas para actuar además como envolvente. Otro de los factores es que el origen estructural de estas cubiertas está ligado en mayor medida a los puentes en suspensión, realizados con redes de cables tensados, siendo las tiendas tradicionales el origen de las formas que se reinterpretaron para aplicar los avances de las estructuras tensadas a la arquitectura.

*“Una membrana es una hora de material tan delgada que no puede desarrollar compresiones; es decir, no tiene rigidez. Su comportamiento es reconocible intuitivamente por las telas, las redes de cuerdas o las burbujas de jabón.”*⁸

⁷ Se precisa puntualizar que pese a la presencia de dos tipologías, el presente trabajo se delimitará al campo de las cubiertas de redes de cables tensados, debido a los motivos expuestos.

⁸ Ramón Araujo, La arquitectura como técnica (I): Superficies, (Madrid, 2008)

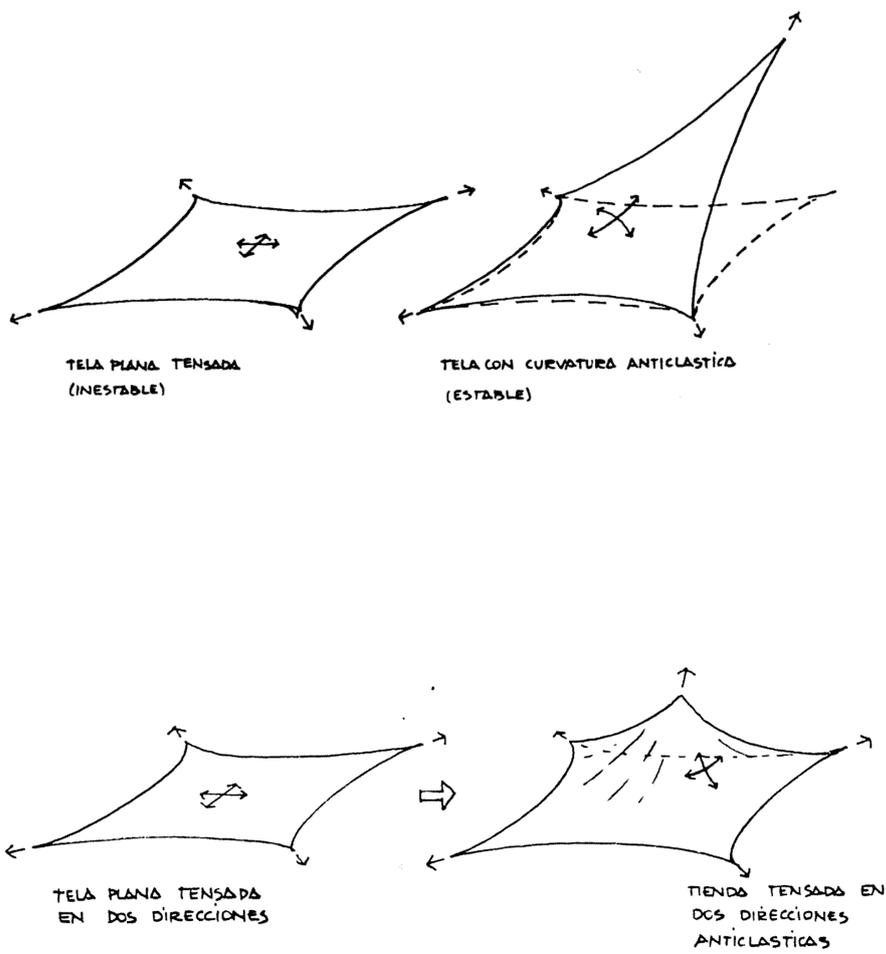


Fig. 6 Diagramas de estabilidad a tracción de cubiertas

En lo referente a la estabilidad de las cubiertas tensadas, ésta depende de que todos los puntos de su superficie estén sometidos a la tensión adecuada, para que ninguno de ellos tenga margen de movimiento. Esta tensión en toda la superficie es crucial ya que, al ser tan ligeras, la presencia de cargas y esfuerzos verticales, como el viento y la nieve, pueden provocar que éstas se deformen y por tanto pierdan su estabilidad. Esto genera una gran distinción entre las de curvatura simple y las de curvatura doble.

“Hay que estabilizar las membranas por pretensado para contrarrestar su movilidad. En las superficies de simple curvatura, el sistema de tensado será externo a la superficie o bien una sobrecarga; mientras que en las de doble curvatura puede ser interno, tensando una de las familias de curvas a la otra.”⁹

En el caso de las de curvatura doble, si ésta es anticlástica¹⁰, la estabilidad se obtiene por la propia geometría de la misma, ya que las curvaturas, al oponerse, tensan todos los puntos de dicha superficie. Por otro lado, las de curvatura simple, o doble sinclástica¹¹, necesitan de otros cables o elementos que procuren la tensión adecuada en todos sus puntos, sobre todo ante los esfuerzos de succión del viento. Para resolverlo, se puede optar por aumentar el peso propio de la cubierta, mediante elementos de cubrición, o por tensar dicha malla de cables a través de la disposición otros secundarios que le den estabilidad ante la succión.

La consecución de la estabilidad es muy importante a la hora de diseñar estas cubiertas ya que, debido a la eficiencia de su trabajo a tracción, que poseen una gran capacidad para cubrir grandes luces, lo que resulta de gran interés y las diferencia significativamente de las estructuras a compresión.

Otra de las características más notables e interesantes de estas cubiertas es su condición de límite y la investigación que conllevó, sobre todo mediante el uso de maquetas, para lograr su optimización, resultando en superficies mínimas y por tanto de gran ligereza.

⁹ Ramón Araujo, La arquitectura como técnica (I): Superficies, (Madrid, 2008)

¹⁰ Aquellas cuyos centros de curvatura se sitúan en los lados opuestos de la superficie que generan

¹¹ Aquellas cuyos centros de curvatura se sitúan en el mismo flanco de la superficie que generan

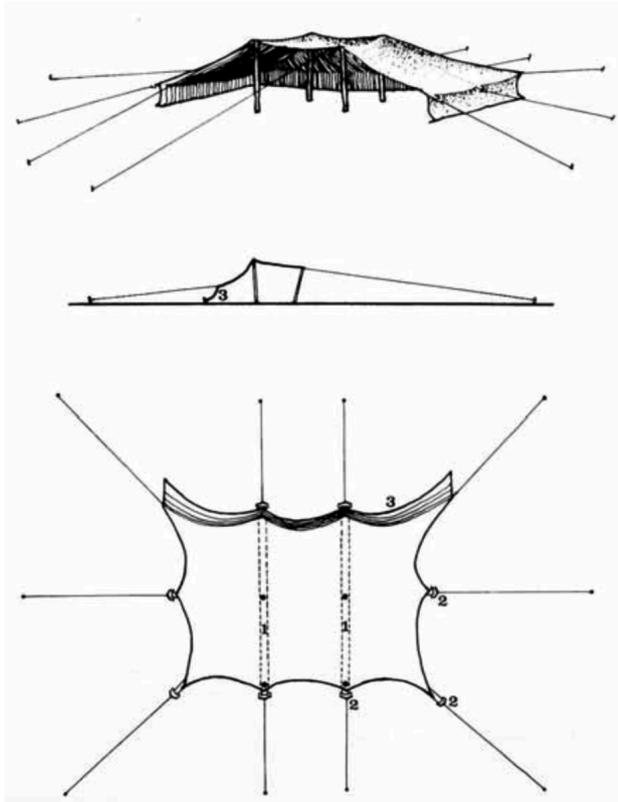


Fig. 7 Tienda negra de la zona norte del desierto sirio. Vista, sección y planta

Fig. 8 Puente colgante en Perú

Origen

Las primeras manifestaciones de estructuras tensadas se hayan en las tiendas de los nómadas, utilizadas por diversas culturas, en diferentes localizaciones como Oriente Medio, Centro de Asia o América del Norte. A pesar de ser entornos diferentes, todos ellos se caracterizan por sus climas secos y la escasez de precipitaciones, lo que deriva en la dificultad para desarrollar la agricultura y la inhibición del crecimiento de árboles, que a su vez conduce a un estilo de vida nómada y la escasez de materiales de construcción.

Las principales cualidades de las tiendas tradicionales, su gran ligereza, así como a su facilidad para montarse y desmontarse, las hicieron idóneas para las culturas nómadas. Debido a las diversas localizaciones de estas culturas, las tiendas que se desarrollaron respondían de forma diferente a cada entorno, lo que generó diversos tipos de tiendas nómadas.

La tienda negra, el tipo de tienda que se desarrolló en Oriente Medio, es la que más se aproxima a las estructuras tensadas que se analizan en el presente trabajo, tanto constructivamente como formalmente. Dichas tiendas se basaban en la utilización de una tela tensada, sometida únicamente a esfuerzos de tracción, sobre una mínima cantidad de soportes, constituyendo un sistema estructural y a su vez envolvente, capaz de soportar agentes externos como los fuertes vientos característicos de la zona.

Sin embargo, estas estructuras presentaron una escasa evolución, tanto en la Edad Media como en el Renacimiento, a pesar de ser utilizadas como campamentos militares y para las celebraciones de la nobleza.

Por otro lado, el origen de las estructuras tensadas también se haya en los puentes colgantes. Las primeras manifestaciones se dieron en China y en Perú, utilizando el mismo principio estructural, cables de bambú o fibras vegetales como el ichu¹², en forma de catenaria. Más adelante, tanto las formas como la cantidad de cables y sus materiales fueron evolucionando hasta llegar a los primeros puentes colgantes de hierro, ubicados principalmente al suroeste de China y con luces de hasta 110 metros.

En el siglo XIX, gracias a la Revolución Industrial y el gran desarrollo tecnológico y constructivo que conllevó, se produjo un verdadero avance en las estructuras tensadas, el cual se plasmó únicamente en el campo de la ingeniería, concretamente en los puentes en suspensión y de banda tensada.

¹² Planta del altiplano andino sudamericano



Fig. 9 Maqueta de la Colonia Güell, Gaudí

Fig. 10 y 11 Modelos experimentales de tela congelados, Heinz Isler

Maquetas como herramientas proyectuales, constructivas y experimentales

*“The model has an answer to (nearly) everything”*¹³

El uso de maquetas arquitectónicas se remonta a la antigüedad y la Edad Media, cuando eran creadas y utilizadas como una herramienta meramente comunicativa. Sin embargo, durante el Renacimiento italiano, a principios del Quattrocento, la maqueta adquiere un nuevo significado al comenzar a ser utilizada también como un recurso en el diseño arquitectónico. La idea de la maqueta como herramienta creativa fue desarrollada por Brunelleschi, al usar una maqueta para diseñar la cúpula de la Catedral de Florencia, utilizándola con el objetivo de estudiar la composición y la organización espacial, e incluso algunos problemas técnicos.

En el siglo XVIII, este concepto de maqueta se integró también en proceso de la educación de los arquitectos, convirtiéndose posteriormente en una herramienta imprescindible en el proceso proyectual.

Sin embargo, no fue hasta finales del siglo XIX, cuando Antoni Gaudí concibió la maqueta como medio para estudiar y predecir el comportamiento estructural de sistemas y geometrías que no podían ser definidos por medio de ecuaciones matemáticas. Esta nueva concepción fue plasmada en las maquetas funiculares que él mismo desarrolló, las cuales estaban basadas en el principio estructural de los arcos catenarios. Dichas maquetas se realizaban con cuerdas de las que colgaban pesos, generando únicamente esfuerzos de tracción, que posteriormente eran fotografiadas e invertidas, obteniendo el resultado final, sometido únicamente a compresión. Este innovador proceso supuso una arquitectura cuyas formas geométricas obedecían fielmente a la distribución natural de los esfuerzos estructurales a los que estaban sometidas, y cuyos espacios eran el resultado directo de dichos esfuerzos.

A principios del siglo XX, dichos conceptos fueron utilizados por ingenieros y arquitectos como Félix Candela, Eduardo Torroja, Heinz Isler y Frei Otto para la investigación y el estudio estructural de sistemas de superficie activa, es decir, cáscaras¹⁴ y membranas. Para ello, también usaron como herramienta la maqueta, debido también a la ausencia de otros métodos matemáticos más precisos. Esto les permitió estudiar y analizar el funcionamiento de estas estructuras y la distribución natural de los esfuerzos a los que estaban sometidas, pero también les permitió investigar los espacios que éstas estructuras generaban y definían en sí mismas, resultando muy diferentes, e innovadores.

¹³ Heinz Isler

¹⁴ Es preciso aclarar que las cáscaras no son estructuras tensadas, sin embargo su funcionamiento estructural es muy similar a las de las membranas ya que al invertirlas, los esfuerzos de tracción se transforman en esfuerzos de compresión, funcionando como cáscaras estructurales. Esta similitud hace que el proceso de investigación y desarrollo a partir de las maquetas sea análogo al de las membranas y estructuras tensadas y por ende, objeto de interés del presente trabajo.

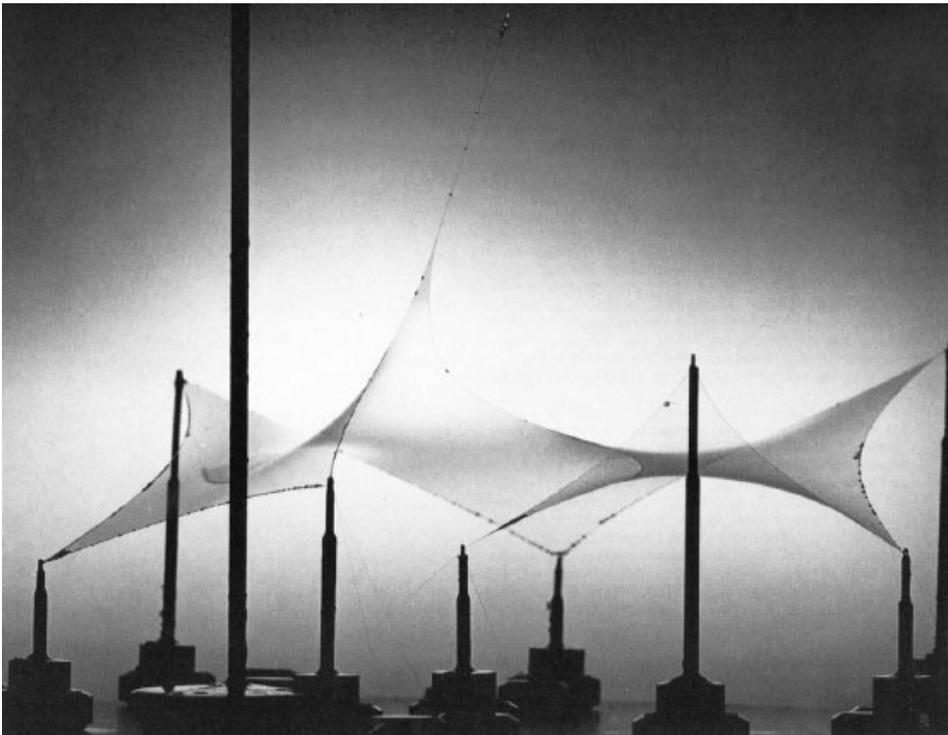
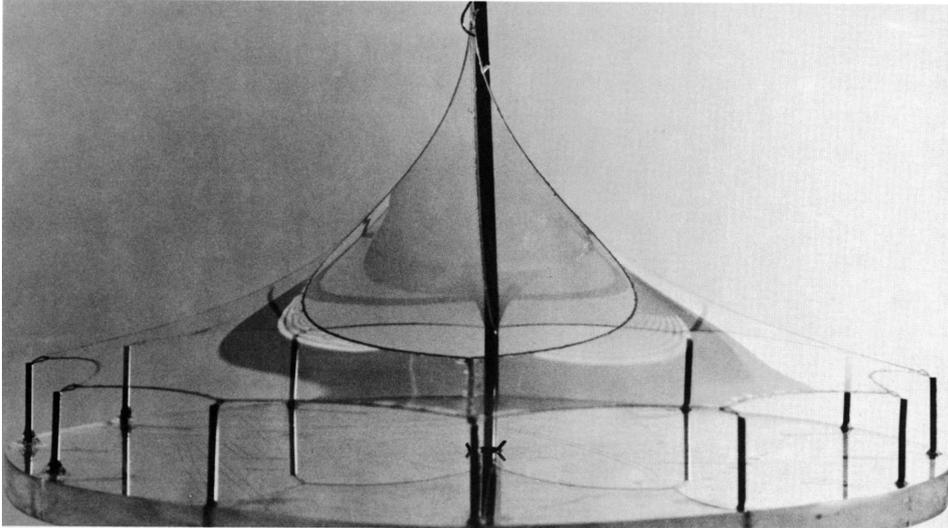


Fig. 12 y 13 Modelos experimentales de jabón, Instituto de Estructuras Ligeras y Frei Otto

“Para mí las maquetas han sido siempre un medio tanto para la creación de lo nuevo como también a la vez para la comprobación.”¹⁵

Frei Otto abogaba que, únicamente a partir del desarrollo de maquetas era factible el conocimiento de las ecuaciones matemáticas que rigen la naturaleza, las estructuras y sus formas, lo que permite crear estructuras nuevas, diferentes de las ya existentes, y calcularlas para posibilitar su construcción. Por ende, una de las claves de su trabajo fue, junto con el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart¹⁶, el desarrollo de diferentes metodologías experimentales para investigar, desarrollar y calcular estructuras tensadas.

Estos métodos experimentales se pueden dividir en dos categorías según su finalidad: métodos de investigación formal y métodos de medición.

La búsqueda de la forma mediante métodos íntegramente experimentales es una investigación constante en el trabajo de Frei Otto debido a varios factores, a la complejidad de las leyes que rigen las estructuras tensadas, pero también a la relación directa entre tensión y forma que caracteriza estas estructuras. Dicha relación directa implica que la forma debe emerger de procesos meramente físicos, generándose por sí misma, por lo que no puede ser dibujada ni preconcebida.

La base de estos métodos es el desarrollo de diferentes modelos a escala cuyos materiales y procesos de construcción y medición fueron experimentales y diversos, evolucionando y mejorando con el tiempo así como la experiencia y el conocimiento adquirido a partir de los anteriores.

En 1961, Frei Otto comenzó a experimentar con líquidos jabonosos, atendiendo a que son líquidos de alta tensión superficial, por lo que al sumergir un esqueleto de borde en ellos, se obtiene una superficie mínima y equitensional.

“Toda estructura pretensada con tensiones desiguales causará problemas. Estas estructuras tienden a formar arrugas y a estirarse en los puntos de mayor tensión, de modo que la membrana se puede rasgar o tomar una forma que se desvíe fuertemente del patrón original. Las estructuras correctamente diseñadas deben mostrar tensiones uniformes en todas las direcciones”¹⁷.

¹⁵ Frei Otto. Conversación con Juan María Songel González, “Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente” (tesis doctoral, Departamento de Composición Arquitectónica, Universidad Politécnica de Valencia, 2005)

¹⁶ Fundado por Frei Otto en 1964, y actualmente conocido por ILEK, *Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren*

¹⁷ Frei Otto, *Das hängende Dach: Gestalt und Struktur*. (Berlín: Bauwelt-Verl, 1954) Traducción castellana: *Cubiertas colgantes*. (Barcelona: Labor, 1958)

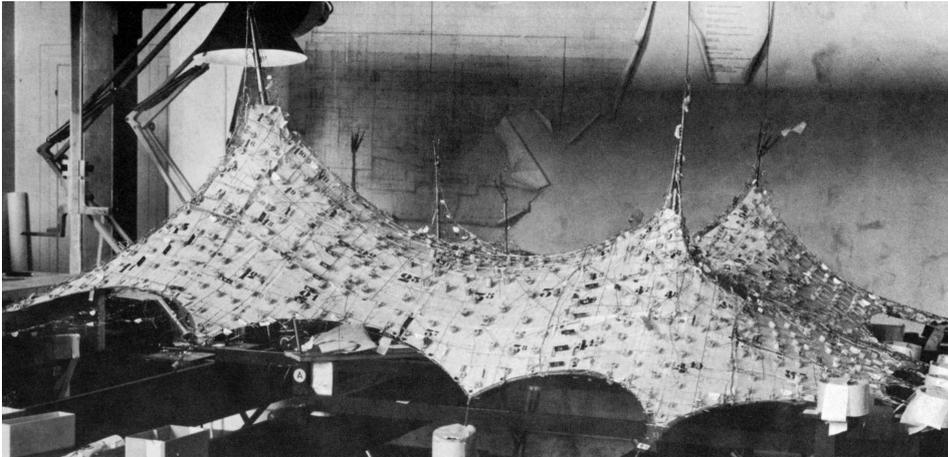
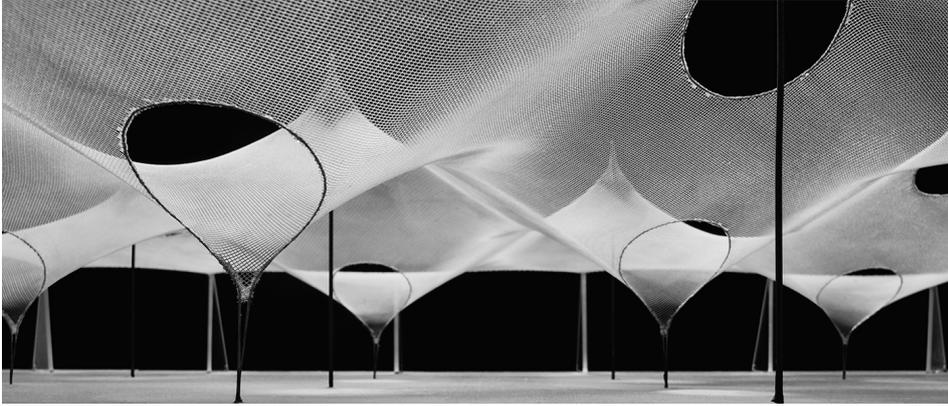


Fig. 14 Modelos experimentales de tul, Instituto de Estructuras Ligeras y Frei Otto

Fig. 15 Modelos experimentales de cables tensados, Instituto de Estructuras Ligeras y Frei Otto

El desarrollo de una serie de ensayos con películas de jabón le permitieron obtener superficies de formas óptimas y mínimas mediante un proceso de generación autónomo y natural, ya que éstas se generaban por sí solas, pero también a conocer en mayor profundidad las leyes naturales que las regían. Uno de los principios de las estructuras sometidas únicamente a esfuerzos de tensión es que dichas estructuras son iguales, independientemente de la escala a la que se construyan, por lo que los conocimientos y conclusiones extraídas de estos ensayos y modelos fueron trasladados directamente a estas estructuras suponiendo un gran avance y la apertura de una nueva vía de investigación.

Esta técnica de modelos de películas de jabón se complementaba con la elaboración de otros modelos, de diferentes materiales y a diversas escalas, que permitieran su medición y cálculo preciso para su posterior construcción. Estos modelos también supusieron la aplicación de métodos experimentales debido a la ausencia de otros procedimientos o recursos informáticos para calcular estas estructuras. La construcción de dichos modelos debía ser más similar a la de la estructura final, por lo que se construyeron a base de tejidos de malla, desarrollándose con maquetas de tul y de cables pretensados.

Las maquetas de tul, cuyas fibras generan una estructura abierta con forma de red, describían con gran exactitud la forma y las condiciones de contorno que se extraían de las películas de jabón, lo que permitía la comprobación y visualización de toda su geometría ya que éstas no eran tan frágiles y efímeras.

Los modelos de cables pretensados se realizaban a escalas menores y se monitorizaban, permitiendo una mayor precisión. En los primeros modelos se utilizaron galgas extensiométricas, las cuales realizan una lectura directa de las deformaciones para conocer su estado de sollicitación, controlando que las tensiones fueran las adecuadas para garantizar el equilibrio de la estructura. Posteriormente se procedía a la medición manual de la longitud de los cables y se dibujaba, también manualmente, toda la geometría, trasladándola a análisis matemáticos para su ulterior construcción. Mediante este proceso se garantizaba el funcionamiento de la estructura, sin embargo, los mínimos errores cometidos en la maqueta, en sus mediciones y en su traslado a la escala real, provocaban que la estructura estuviera sobredimensionada, resultando más costosa e ineficiente de lo que debería según los principios de estas estructuras.



Fig. 14 Modelos experimentales de cables tensados discutidos en el Instituto de Estructuras Ligeras por Frei Otto y sus colaboradores

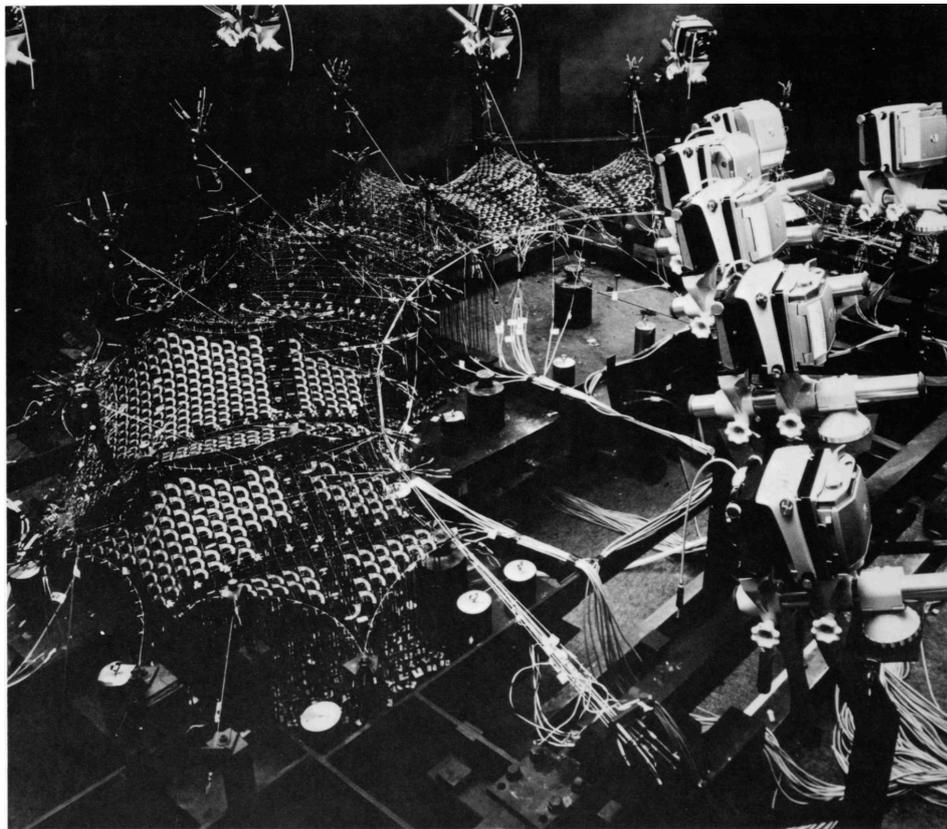


Fig. 15 Modelos de cables tensados sometidos a fotogrametría, Instituto de Estructuras Ligeras

Para lograr una mayor optimización, se necesitaban métodos de análisis y medición más precisos, por lo que se utilizaron los últimos avances en fotogrametría desarrollados por Klaus Linkwitz y el Instituto de Geodesia de Stuttgart. Mediante la sincronización de una serie de cámaras se fotografiaba la maqueta, generando una imagen del conjunto de la misma, pero también imágenes de ésta antes y después de someterla a tensión, permitiendo conocer su deformación. Estas imágenes eran mucho más precisas por lo que a partir de ellas se obtenían también las posiciones exactas de todos los puntos de intersección de cables y la geometría de los cables del contorno. Toda esa información se introducía posteriormente en una máquina automática que dibujaba la planta y los alzados de la red de cables.

Estos modelos y métodos de análisis más precisos les permitieron también desarrollar programas informáticos que ayudaran a analizar y calcular estas estructuras, ya que se basaban en los resultados obtenidos a partir de ellos. Dichos programas informáticos también les permitieron lograr una mayor precisión y consecuentemente una mayor optimización.

Además, todas las investigaciones, métodos y conclusiones eran publicadas y difundidas por el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart, propiciando el desarrollo y la consolidación de arquitectura tensada.

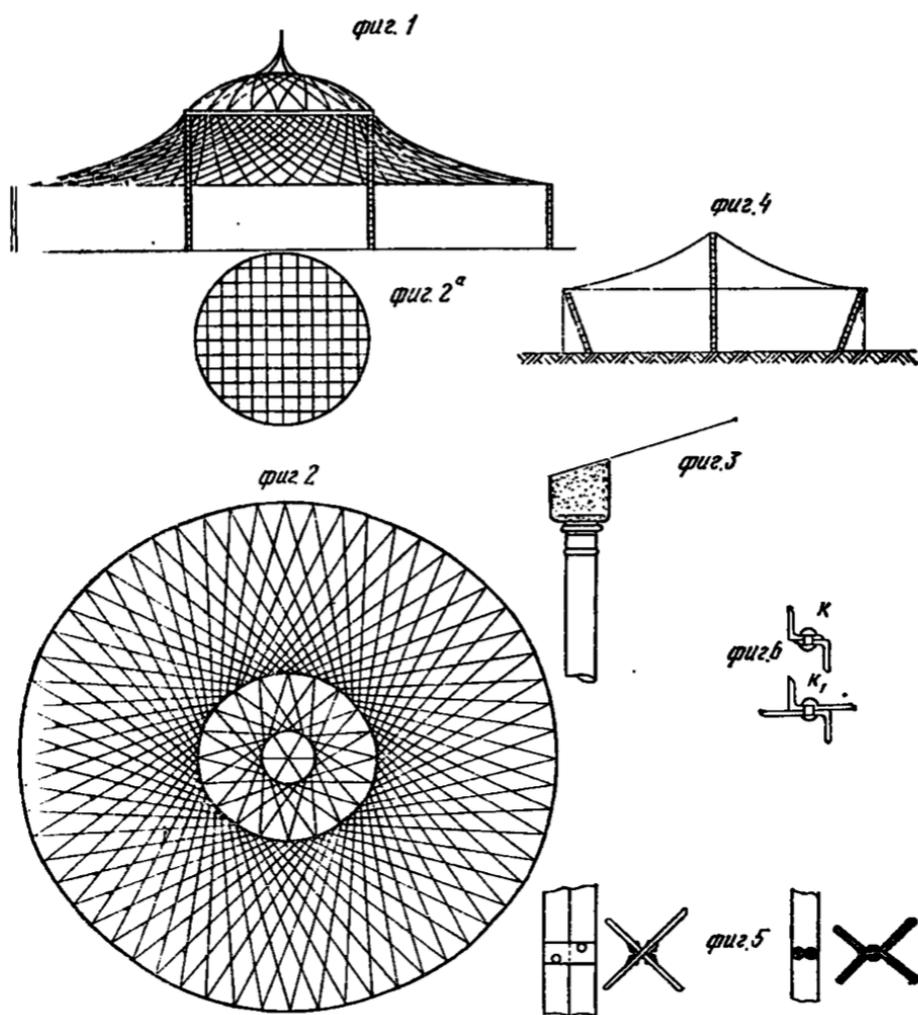


Fig. 16 Patente estructura tensada para cubiertas, Vladimir Shukov, 1895

PRIMERAS APLICACIONES DE LAS ESTRUCTURAS TENSADAS A LA ARQUITECTURA.

Los avances que se llevaron a cabo en el campo de las estructuras tensadas no empezaron a materializarse en la arquitectura hasta finales del siglo XIX. El ingeniero ruso Vladimir Grigorievich Shukov fue el pionero en la aplicación de las estructuras tensadas de redes de cables a la arquitectura.

En 1895, patentó un sistema de estructura tensada para cubiertas basada en una red de cables a tracción en forma de superficie hiperbólica.

“La cubierta en forma de red que se ha obtenido de esta manera representa, comparado con otras formas habituales, un ahorro significativo de peso. Los elementos de las redes dependen de un solo esfuerzo, tracción (en el hiperboloide) o compresión (en la red que forma la cúpula de remate). Los elementos que componen la red, roblonados o atornillados en los puntos de intersección componen una superficie que puede resistir grandes cargas”¹⁸

En la Exposición Panrusa celebrada en Nizhy Novgorod¹⁹ en el año 1896, Shukov construyó ocho pabellones de estructuras ligeras de acero, cubriendo una superficie total de 27.000 m². En cuatro de estos pabellones aplicó sus conocimientos en estructuras tensadas, dando lugar a las primeras cubiertas tensadas del mundo y desarrollando 3 tipologías diferentes, atendiendo a la geometría de sus plantas, rectangular, ovalada y circular.²⁰

¹⁸ Rainer Graefe, “Hängedächer des 19. Jahrhunderts”, *Projektbereich Architektur. Geschichte des konstruierens* 2(1985) : 70-94

¹⁹ Ciudad ubicada en el oeste de Rusia. Traducido del ruso, *Ciudad Nueva de Abajo*, traducción de la autora

²⁰ Dato técnico extraído la tesis: Isaac R. López César, “Las Exposiciones Universales. Laboratorio de estructuras” (Tesis doctoral, Departamento de Tecnología de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidade da Coruña, 2012)

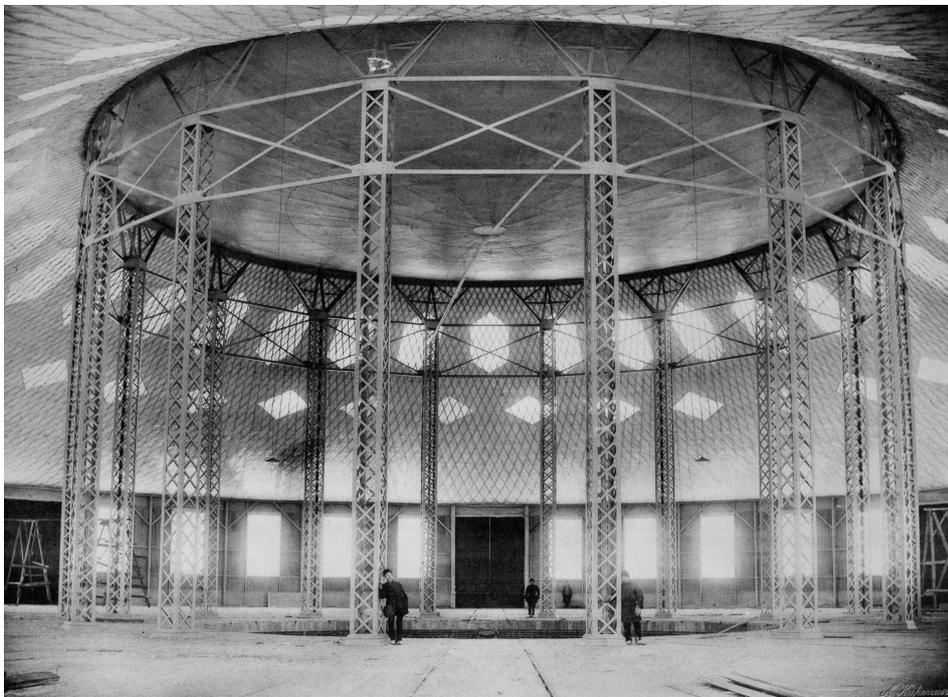


Fig. 17 Y 18 Pabellón Rotonda, en construcción y finalizado, Vladimir Shukov, 1896

El de planta circular, el Pabellón Rotonda o Pabellón de la Técnicas Estructurales, estaba formado por dos cubiertas tensadas diferentes y destaca entre los demás, ya que también supuso la construcción de la primera estructura tensada hiperbólica. La estructura de este pabellón consistía en un anillo interior tensado, de 25m de diámetro, que descansaba sobre 16 columnas a 15 metros de altura, y un anillo exterior, ubicado a 21,5m del primero, a compresión, de 68m de diámetro. Entre ellos, se colgaba una red de 640 cables tensados roblonados en sus encuentros, que formaban una superficie de doble curvatura anticlástica. La gran diferencia que suponía esta red respecto a las tradicionales, compuestas por elementos regulares, era que los cables se disponían en diagonal, generando celdas romboidales, las cuales se iban deformando y ampliando a medida que se alejaban del anillo interior del que partían.

Esta cubierta generaba esfuerzos de tracción en el anillo interior, lo que se compensaba parcialmente con otra cubierta tensada dispuesta en el interior de este anillo, de 25m de diámetro y con una flecha de 1.5m. Sin embargo, esta segunda cubierta no era de red de cables si no que era una membrana formada por chapas de 1,5mm de espesor roblonadas. El desagüe de esta cubierta central se resolvió mediante dos tuberías que partían del centro y la conducían hacia el interior de dos de los pilares, por los que bajaba hasta el suelo.²¹

²¹ Todos los datos técnicos expuestos en el presente apartado, excepto en aquellos que se especifique lo contrario, han sido extraídos del libro: E. Yu. Ageeva y A.I. Spiridonova, *ВАНТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ В ЗРЕЛИЩНЫХ ЗДАНИЯХ*. (Nizhny Novgorod, Universidad Estatal de Arquitectura e Ingeniería Civil de Nizhny Novgorod, 2015). Traducido del ruso “*Construcciones tensadas en edificios dedicados al ocio*”, traducción del autor



Fig. 19 Vista general del Pabellón Rotonda y los Pabellones Longitudinales en construcción, Vladimir Shukov, 1896

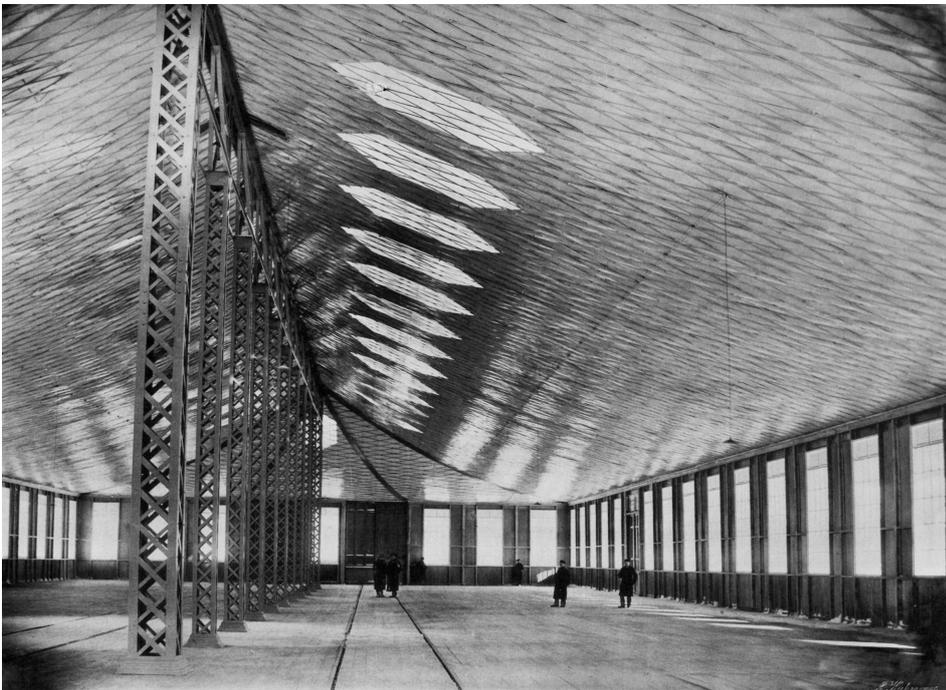


Fig. 20 Pabellón Longitudinal, Vladimir Shukov, 1896

En el interior del Pabellón Rotonda había un círculo de 18m de diámetro del que partían, de forma radial, 18 caminos. Dos de ellos conducían a dos pabellones adyacentes e idénticos de planta rectangular, denominados Pabellones Longitudinales, de 68m de longitud y 30m de anchura. Su estructura estaba compuesta por una viga de celosía soportada por 9 pilares, a 11 metros de altura, de la cual colgaba una red de cables de curvatura simple, por lo que fue la primera estructura de celosía estructural colgante. Esta red de cables era similar a la de la Rotonda, sin embargo, al ser una cubierta a cuatro aguas, estaba dividida en 4 zonas mediante cables más resistentes, 20x6mm, que partían de los extremos de la viga de celosía hasta las esquinas del pabellón.²²

En los lados longitudinales, los elementos romboidales se deformaban y aumentaban longitudinalmente como en el pabellón circular. Sin embargo, en los faldones, esta deformación y aumento se producía en dirección transversal, transmitiendo las fuerzas en dicha dirección y con luces mucho mayores. Esto provocaba que estas zonas no estuvieran sometidas a la tensión que deberían, generando inestabilidades, por lo que los faldones se subdividieron en 3 zonas mediante la colocación de dos cables de mayor resistencia, 30x6mm, que conectaban los extremos de la viga superior con los lados transversales, proporcionando a la red de cables una mayor rigidez y tensión.

²² Datos técnicos extraídos de la tesis: Isaac R. López César, “Las Exposiciones Universales. Laboratorio de estructuras” (Tesis doctoral, Departamento de Tecnología de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidade da Coruña, 2012)

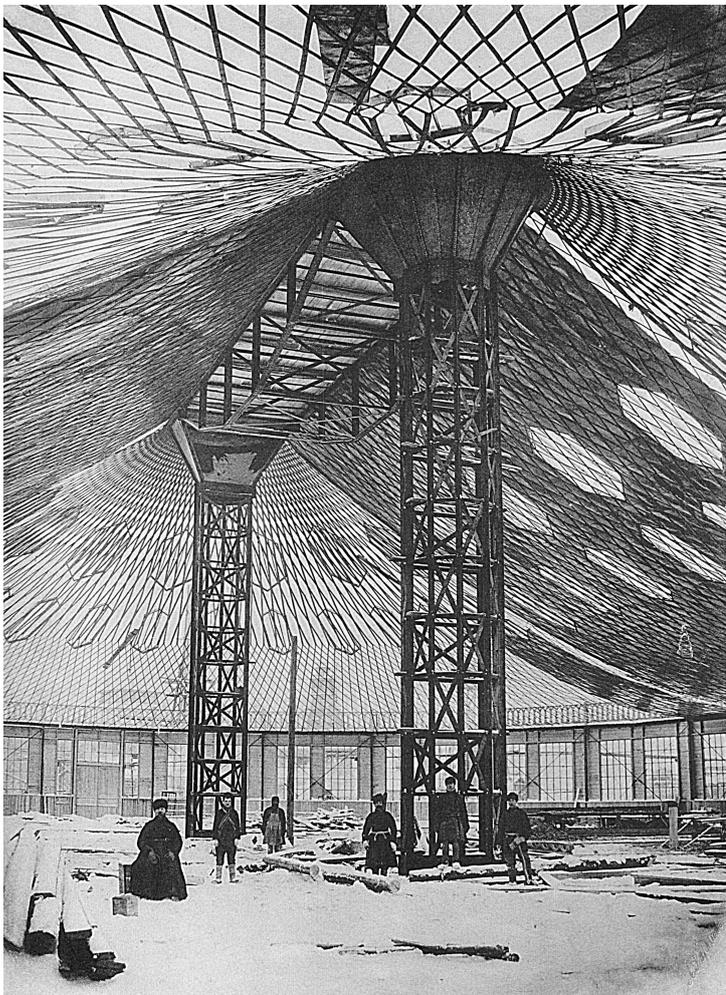
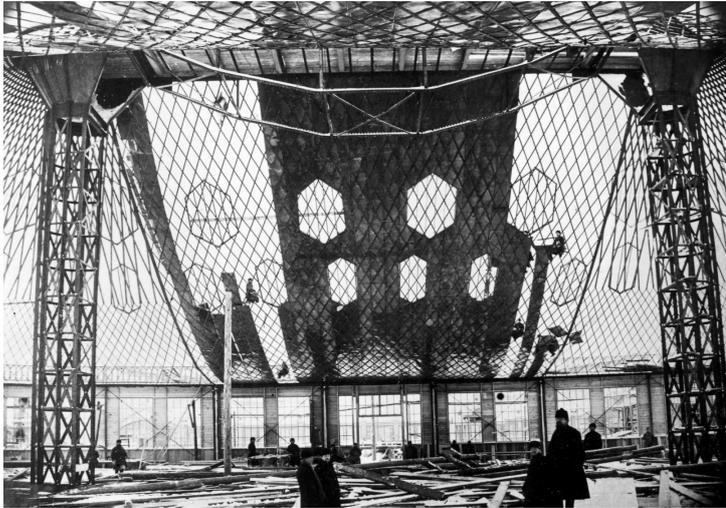


Fig. 21 y 22 Pabellón Oval, Vladimir Shukov, 1896

El cuarto pabellón era de planta ovalada, llamado el Pabellón Oval, de 98 metros de largo y 51 metros de ancho, y su estructura consistía en una viga en vientre de pez a 15 metros de altura, soportada por dos soportes centrales de celosía con capiteles de chapa. Para la construcción de la cubierta de este pabellón, al ser de planta ovalada, Shukov unió los principios de las cubiertas que había utilizado en los otros dos pabellones. En las zonas centrales se dispusieron dos redes de cables de curvatura simple, y en los extremos, con forma semicircular en planta, redes que formaban una superficie de doble curvatura. Las de curvatura simple eran idénticas a las de los Pabellones Longitudinales, sin embargo, en los extremos, se tuvo que aplicar una malla diferente ya que a diferencia de la Rotonda, una única red de cables cubría la totalidad de la superficie circular. En la zona más próxima al centro de la circunferencia, la malla formaba celdas muy pequeñas por la proximidad de los cables, por lo que creaba una superficie casi cerrada. Dicha malla, a medida que se aleja de la viga central, se deformaba, por lo que el tamaño de las celdas aumentaba exponencialmente, perdiendo rigidez. Consecuentemente, a un radio de 23.5 metros de distancia, los cables se subdividían en dos mitades, formando una red de celdas de tamaño más reducido. Las zonas de unión de las mallas de diferente curvatura presentaban problemas estructurales debido a la diferencia de forma de las celdas y de deformación ante cargas externas, por ello, se dispusieron cables mayores en las zonas de conexión, 150x6mm.

La estabilidad de estas cubiertas ante fuerzas verticales producidas por el viento, la lluvia o la nieve se consigue de forma diferente en cada cubierta, dependiendo de su curvatura. Las cubiertas del Pabellón Rotonda y las de los extremos del Pabellón Oval, son superficies de doble curvatura anticlástica por lo que su propia geometría garantiza su estabilidad. Sin embargo, las de los Pabellones Longitudinales, así como las centrales del Pabellón Oval, son de curvatura simple, lo que unido a la ligereza de las redes de cables que las conformaban, 20kg/m², provocaba deformaciones ante fuerzas verticales. Para evitar las deformaciones en las de curvatura simple y contribuir a la estabilidad de las de curvatura doble, se colocaron placas de hierro galvanizado, comúnmente utilizadas en Rusia, ancladas directamente a las redes de cables, lo que aumentó el peso propio de las cubiertas, garantizando la estabilidad de las mismas.

La gran velocidad a la que se erigieron estos pabellones, debido a que no requerían herramientas y dispositivos complejos ni trabajadores especializados, supuso la finalización de su construcción en menos de 4 meses. Este hecho, unido a que el material que se utilizó fue mínimo comparado con los pabellones ordinarios, reflejó las grandes ventajas de las cubiertas tensadas, la facilidad, simplicidad y rapidez de su construcción, así como su bajo coste debido a la optimización de los materiales utilizados.

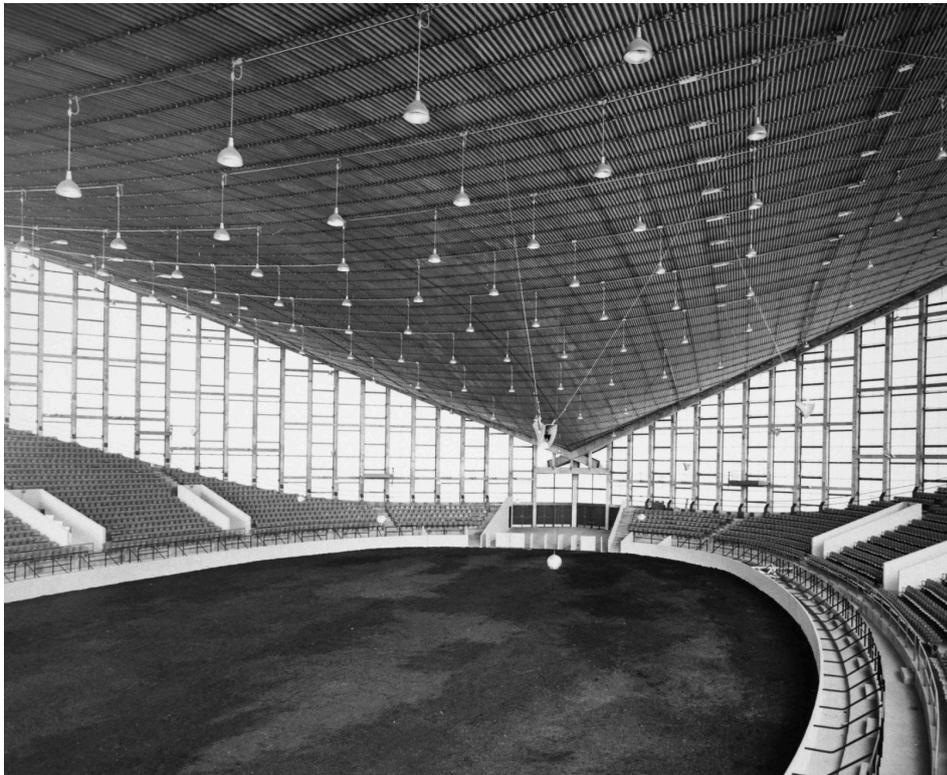


Fig. 23 y 24 Vista exterior e interior del Dorton Arena, Raleigh, Mathew Nowicky, 1953

A pesar de los grandes avances logrados por Vladimir Shukov y las ventajas que presentaban, las cubiertas tensadas no se desarrollaron inmediatamente después como cabría esperar, si no que parece que fueron olvidadas hasta mediados del siglo XX. Esto se debe en gran parte a la desconfianza que generaban estas estructuras ya que no había ningún método de cálculo preciso para comprobar su estabilidad, pero también a su escasa difusión. Pese a ello, estas cubiertas constituyen los antecedentes de las estructuras modernas a tracción compuestas por redes de cables.

La cubierta tensada del Dorton Arena en Raleigh²³, pesar de ser posterior a las de Shukov, es comúnmente considerada como la primera cubierta de cables tensados del mundo, debido en gran parte a que tuvo una difusión mucho mayor. Esta cubierta inspiró enormemente a Frei Otto, quien estaba escribiendo su tesis doctoral sobre las cubiertas tensadas. La construcción del Dorton Arena, en 1953, y la publicación de la tesis de Otto "*Das hängende Dach*"²⁴ en 1954, supusieron un gran avance, lo que provocó que muchos arquitectos, atraídos por la eficiencia de las estructuras a tracción, comenzaran a interesarse por este campo, reinterpretando las estructuras tensadas tradicionales, las tiendas nómadas, y aportando alternativas formales.

Estas primeras aplicaciones de las estructuras tensadas supusieron un gran avance, sin embargo, su consolidación y la consecución de la integración y armonía entre estructura y forma no se produjo hasta la década de los 60, fruto de la sinergia entre ingenieros y arquitectos.

²³ Diseñado por el arquitecto polaco Mathew Nowicky conjuntamente con Severoud Associates

²⁴ Traducido del alemán, "*Cubiertas colgantes*", traducción del autor

CONSOLIDACIÓN DE LA ARQUITECTURA TENSADA. EQUIVALENCIA DE PROYECTO Y ESTRUCTURA

A pesar de los grandes avances realizados desde finales del siglo XIX, la consolidación de la arquitectura tensada no se produjo hasta la década de los 60. Fue entonces cuando la colaboración entre arquitectos e ingenieros fue más profunda y generalizada, debido en gran medida a la complejidad y los singulares principios que rigen estas estructuras.

Las obras que se desarrollaron y construyeron a partir de entonces supusieron la consecución de la convergencia entre proyecto, forma y estructura, gracias al desarrollo de edificios de mayor escala y complejidad estructural, resultado de la sinergia entre arquitectos e ingenieros.

Lo que diferencia a estas obras de sus precedentes es que la estructura y la técnica son el germen y la idea principal de los proyectos, por lo que en ellas, forma y estructura son indivisibles, conforman un todo.

Entre estas obras destacan el Estadio Olímpico de Tokio, de 1964 y el Estadio Olímpico de Munich, de 1972, obras que supusieron un gran avance ya que ambas fueron y son las mayores cubiertas tensadas de redes de cables diseñadas y erigidas hasta la actualidad.

Estas dos grandes obras se caracterizan por el hecho de ser consecuencia del principio de relación directa entre estructura y forma que las rige, resultado de la investigación y experimentación desarrollada para construir las. En ambas, la técnica es una disciplina interna del proyecto, por lo que las decisiones estructurales y materiales son actos simultáneamente constructivos y proyectuales.

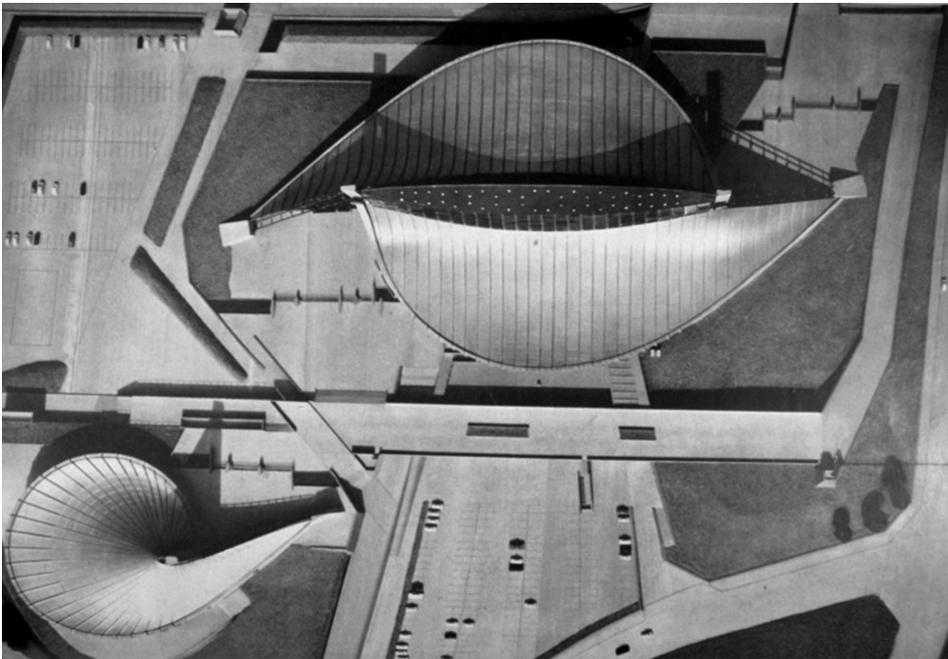


Fig. 25 y 26 Vistas exteriores del Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Gimnasio Nacional Yoyogi, 1964

En 1959, se seleccionó la ciudad de Tokio para albergar las Olimpiadas de 1964, lo que conllevaba la construcción de diversos equipamientos deportivos. Entre ellos, se encontraba el Gimnasio Nacional de Yoyogi, en el distrito de Shibuya, el cual comprendía la construcción de dos gimnasios, la piscina olímpica y el pabellón olímpico, con un aforo de 15.000 y 5.000 espectadores respectivamente.²⁵

En 1961 el Ministerio de Educación le encargó al japonés Kenzo Tange el diseño y la construcción de estos gimnasios, el cual trabajó junto con el ingeniero Tsuboi Yoshikatsu, tras haber colaborado en varios proyectos anteriores.²⁶

El gran aforo y el programa de los pabellones impusieron la creación de un espacio diáfano y de grandes dimensiones. Por ende, el diseño de una estructura que les permitiera alcanzar grandes luces, creando un espacio único y diáfano, fue el punto de partida del proyecto, esto provocó que, desde el inicio, Tange y Yoshikatsu trabajaran conjuntamente en la concepción de ambos pabellones y en la investigación estructural de éstos.

²⁵ Todos los datos técnicos expuestos en el presente apartado han sido extraídos de la tesis: Diego Paniagua Padilla, “La arquitectura tensada en la década de los 60” (Trabajo de Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 2016)

²⁶ Biblioteca infantil en Hiroshima, 1952 y Catedral de Santa María en Tokio, 1964

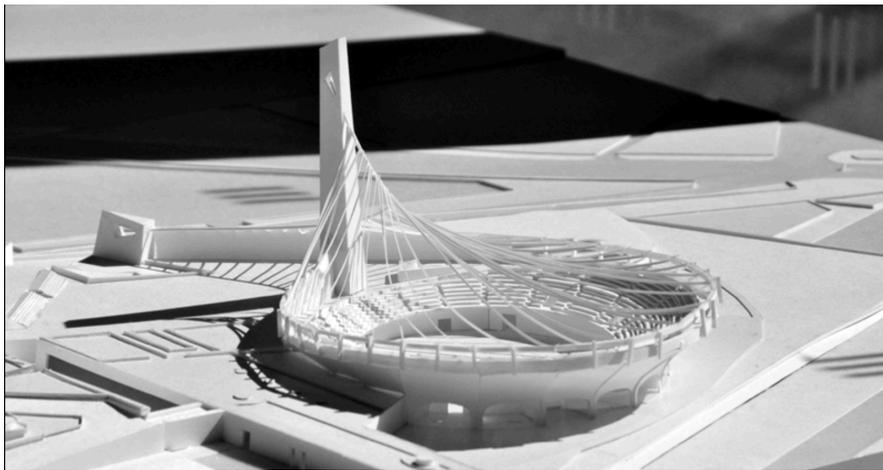
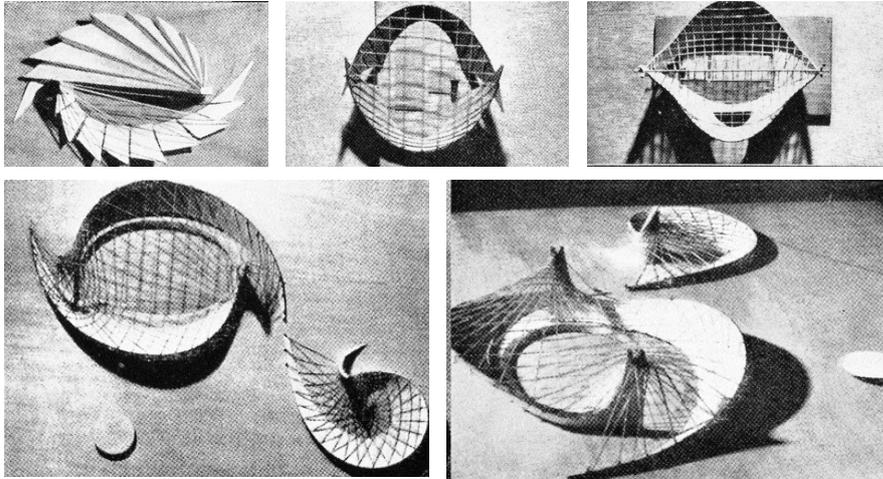


Fig. 27 Modelos experimentales, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Fig. 28 y 29 Maquetas finales de la piscina y el pabellón olímpicos, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Idea del proyecto

“Our biggest problem was the Swimming Stadium: how to distribute the enormous space and what structure to use to roof it. We considered various options for the structure. With my colleague Tsuboi and other collaborators, we arrived quite early at the choice of a suspended structure, a steel tensile structure. [...] Dimensions, I though, suggest structure: starting from the beam to the arch to the vault to the dome to the suspended structure, according to the distances to be connected, like bridges.”²⁷

La construcción de las cubiertas de cables tensados del Estadio Raleighen 1953 y del Ingalls Hockey Ring de Eero Saarinen en 1958, creando espacios de amplias dimensiones y grandes luces, sirvió como precedente a Tange y Yoshikatsu para la investigación de este tipo de estructuras y su utilización en el Gimnasio Nacional Yoyogi.

“The suspended structure allowed me to create an 'open form', the 'single open space' that we desired”²⁸

El germen de la idea de estos gimnasios fue la estructura per se, la concepción de una estructura que permitiese cubrir un edificio diáfano de grandes dimensiones.

La exploración e investigación de estas cubiertas se llevó a cabo mediante la ejecución de modelos tridimensionales en los que se exploraban diferentes soluciones estructurales y formales. Se partió del estudio del gimnasio de la piscina olímpica, ya que era el de mayores dimensiones. Para ello, se elaboraron más de 10 maquetas a escala 1:100 y 1:30 en las cuales se estudiaban los espacios que generaban, y las formas de éstos, atendiendo a la preocupación por generar un espacio abierto y único de escala humana. Además, para estudiar la viabilidad de estas estructuras, éstos modelos se sometieron a pruebas mecánicas para conocer y prever con mayor exactitud su comportamiento estructural.

Estas maquetas y sus resultados eran analizadas y discutidas una a una por los ingenieros y arquitectos hasta que se decidió la solución estructural final, la cual se extrapoló al pabellón olímpico, diseñándolo con un planteamiento semejante y consiguiendo la unidad del conjunto.

²⁷ Kenzo Tange, “Gli Stadii olimpici a Tokio”, *Domus Architettura Arredamento Arte* 424 (marzo 1965): 2-13

²⁸ Tange, “Gli Stadii olimpici a Tokio”, 1965

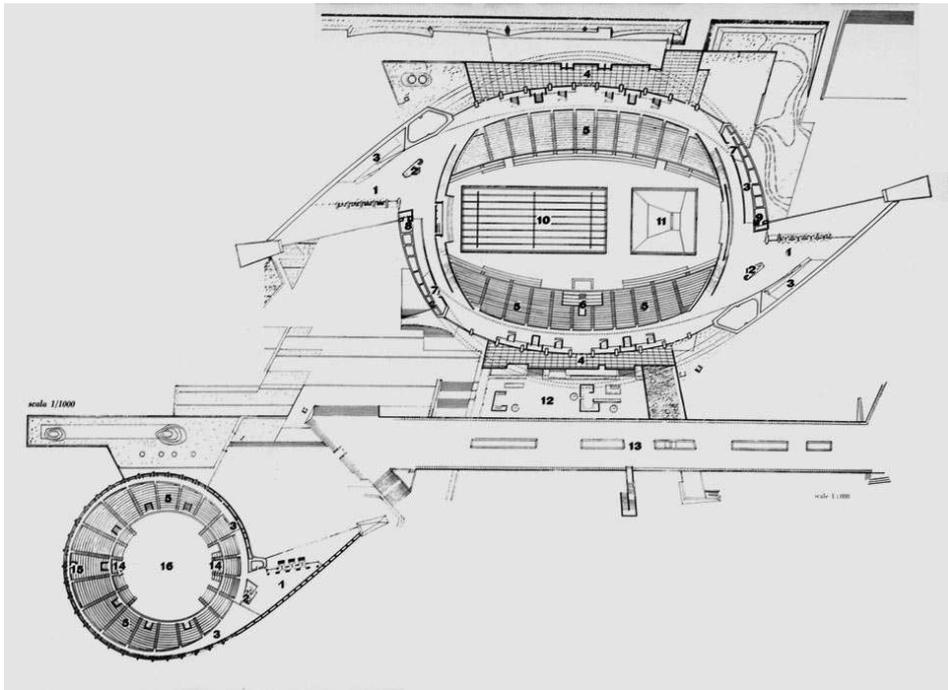


Fig. 30 Vista exterior, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Fig. 31 Planta del conjunto, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Descripción general

Esta solución estructural, y por lo tanto también formal debido a la relación directa que caracteriza estas estructuras, se basa en la suspensión de las cubiertas entre uno o dos mástiles, anclados al terreno través de unos bloques semienterrados separados de éstos, y unos anillos perimetrales de hormigón. La planta de ambos gimnasios es circular, sin embargo, dichos anillos conectan los mástiles con los anclajes al terreno contrarios, abrazando todo el volumen de cada pabellón, y generando formas elípticas y abiertas.

“The suspended structure [...] It also allowed us to create a visual and ideal relationship between the two stadiums. There is tension not only in the buildings' structure but also in the relationships between the two buildings facing on another with their two open 'mouths'.”²⁹

Estas zonas abiertas generan los accesos, dos en la piscina y uno en el pabellón, conectando visualmente los gimnasios, creando tensión entre ellos. Esta conexión visual se afianza con dos conexiones físicas, una plaza que une los accesos de ambos gimnasios y una pieza alargada que los conecta a un nivel inferior, albergando los espacios secundarios, las piscinas de entrenamiento, las zonas de descanso, las áreas de servicios e instalaciones, etc. Dicha pieza completa el programa sin alterar la visión del conjunto y genera en su cubierta, una pasarela peatonal que conecta la plaza que precede el otro acceso de la piscina con la plaza que une ambos gimnasios.

Todas estas conexiones y plazas se encuentran elevados con respecto a los gimnasios y los alrededores, por lo que las cubiertas emergen del suelo, generando los accesos conforme se elevan. A través de ellos se accede a las zonas superiores de los respectivos espacios interiores, por lo que la circulación es descendiente desde las tribunas hacia las piscinas y la pista.

El conjunto de los graderíos y las zonas en las que se desarrollan las competiciones conforman en ambos gimnasios sendas formas circulares. En el caso de la piscina olímpica, se trata de un espacio de 126 metros de diámetro en el que se distribuyen simétricamente las tribunas, siguiendo el eje este-oeste que genera la propia estructura de la cubierta y dónde se ubican los accesos y las zonas para la circulación hacia las tribunas inferiores. En él se celebraron primordialmente eventos de natación y saltos, por lo que constaba de dos piscinas y de 6 plataformas de salto, sin embargo, gracias a su naturaleza versátil, también puede acoger eventos de baloncesto o hockey sobre hielo, con un aforo total de 16.246 espectadores. En lo referente al pabellón olímpico, en el espacio interior circular de 65 metros de diámetro se inscriben dos círculos no concéntricos que definen los graderíos y las pistas, con una capacidad de hasta 5.300 espectadores según el evento que se desarrolle, baloncesto o boxeo. Esta descentralización entre los 3 círculos que definen la planta del pabellón genera una asimetría que le confiere al espacio interior un mayor dinamismo.

²⁹ Kenzo Tange, “Gli Stadii olimpici a Tokio”, *Domus Architettura Arredamento Arte* 424 (marzo 1965): 2-13

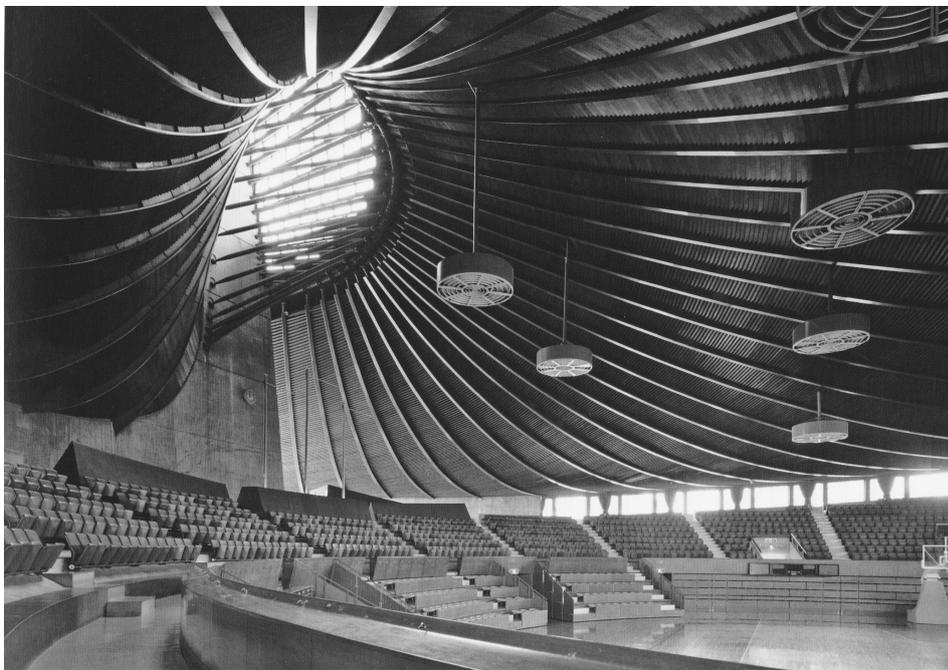
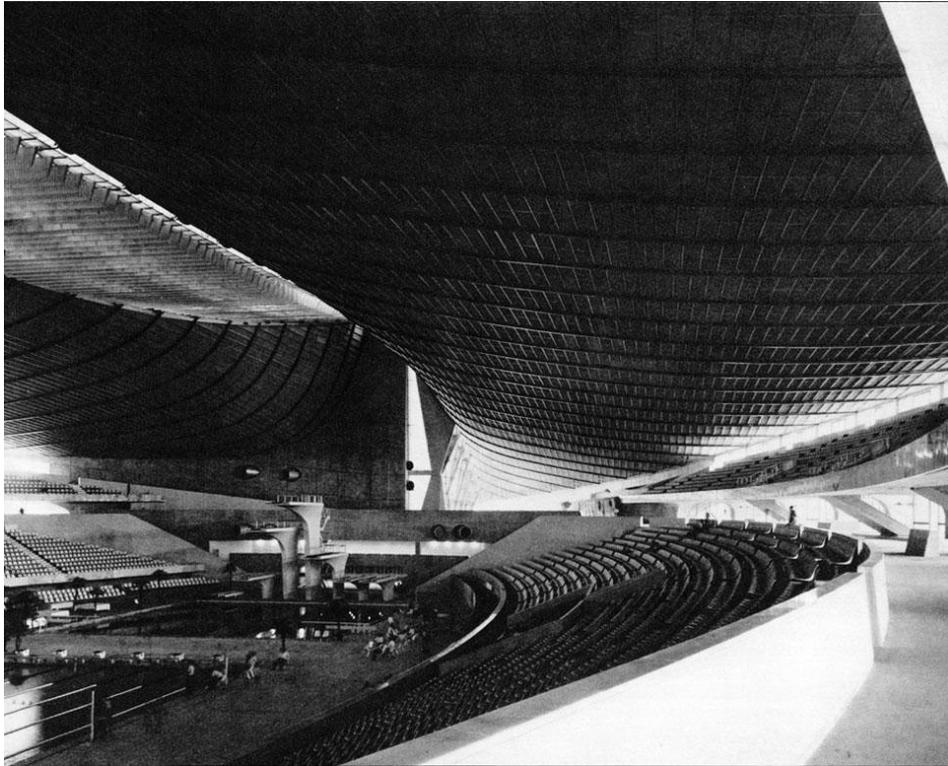


Fig. 32 Vista interior de la piscina olímpica, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Fig. 33 Vista interior del pabellón olímpico, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

La disposición y diferencia de niveles entre los accesos y las zonas dónde se desarrollan las competiciones deportivas genera una de las cualidades más destacables del proyecto, el protagonismo de las cubiertas, que, emergiendo del suelo, dominan completamente el espacio del conjunto, otorgándoles la importancia que tienen dada su concepción, resolución y tamaño.

Dichas cubiertas tensadas son el principio estructural de ambos gimnasios y el germen de estos proyectos por lo que éstas determinan tanto la forma exterior, lo que implica también su disposición y relación entre ambos, como el espacio interior, generando espacios dinámicos de sección cambiante debido a las formas de las cubiertas al estar suspendidas y depender directamente de las tensiones a las que se someten.

“Another consideration was added to these: in comparison to the 'convex' space of the dome, the 'concave' space of the suspended structure encloses a much smaller volume, and this also simplifies problems of heating, air conditioning, acoustics, all problems inherent in a huge interior space. But the biggest problem, with respect to the interior space, was guaranteeing that it not take on inhuman proportions when empty or filled with just a few people.”³⁰

A pesar de las grandes dimensiones de los gimnasios, la geometría de estas cubiertas reduce el espacio interior que generan, haciendo que éste sea de escala humana, y permitiendo la creación de un espacio único, sin divisiones espaciales, funcional y proporcionado, ya que mejora la acústica y racionaliza el volumen interno.

“Once I entered the Swimming Stadium, I saw how the space changed dynamically depending on my movements, and it seemed to me that the movements of the people themselves give the space its dynamism.”³¹

³⁰ Tange, “Gli Stadii olimpici a Tokio”, 1965

³¹ Tange, “Gli Stadii olimpici a Tokio”, 1965

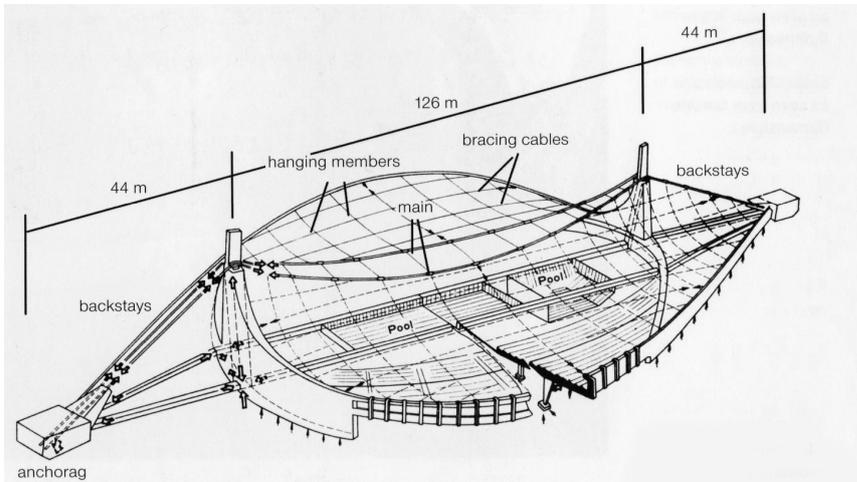


Fig. 34 Esquema estructural de la piscina olímpica, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Fig. 35 Vista interior de la piscina olímpica, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Funcionamiento estructural y aspectos técnicos

Ambas estructuras se basan en los puentes colgantes, las cubiertas son unas membranas tensadas que se suspenden entre uno o dos mástiles y unos anillos de hormigón que trabajan a compresión, llevando las cubiertas a su estado límite, lo que les confiere estabilidad.

En la piscina olímpica, la estructura principal de la cubierta, dos grandes cables de acero de 33 cm de diámetro, se suspenden entre dos grandes columnas de hormigón, de 45 metros de altura, describiendo una curva en forma de catenaria. De estos cables parte una red estructural secundaria de vigas metálicas colgadas que se recogen en las zonas perimetrales de las tribunas, mediante unas costillas y anillos de hormigón que conjuntamente trabajan a compresión, soportando la tracción de los cables.

Esta red secundaria se ata mediante una serie de cables transversales, garantizando la estabilidad y la tensión adecuada. Además, estos cables generan una estructura de red de cables sobre la que se anclan las placas de acero soldadas, de 4 mm de espesor, que constituyen la envolvente y la protección de la cubierta y que en el interior se aíslan con amianto. Este conjunto de cables estructurales conforma en su totalidad un paraboloides hiperbólico ya que los cables principales de donde parte la cubierta describen una catenaria de curvatura cóncava y los anillos de hormigón que la recogen una curvatura convexa.

Los cables principales de 33 cm de diámetro se apoyan en dos pilares de hormigón, a unos 30 metros de altura y separados 126 metros, que posteriormente se anclan al suelo mediante unos bloques semienterrados, a 44 metros de distancia desde dichos pilares, generando un eje este-oeste de una longitud de más de 214 metros. Estos bloques son de hormigón armado y, a la vez que recogen los esfuerzos de tensión producidos por los cables principales, actúan como cimentación. Además, éstos se hallan unidos entre ellos por la zona inferior del gimnasio como medida ante posibles movimientos sísmicos.

Estos dos cables nacen de dichos bloques con una separación de 2 metros, la cual conservan hasta sus apoyos en los pilares. Sin embargo, la red de vigas secundaria que parte de los principales provoca que éstos se separen longitudinalmente conforme se alejan de los apoyos, describiendo una curva tanto en alzado, por estar suspendidos, como en planta. Esta separación en la zona central de la cubierta se aprovecha para generar un amplio lucernario que ilumina el interior del gimnasio, otorgándole a la cubierta una mayor sensación de ligereza. En dicho lucernario se dispone una serie de vigas de celosía que se apoyan en los cables principales y sobre las que se anclan unas chapas metálicas tanto en la zona superior como en los laterales, de forma escalonada, protegiéndolo y a su vez permitiendo la entrada de luz al gimnasio. Esta separación central se controla mediante la disposición de un sistema de cables que los atan y que parten de unos reguladores anclados a los pilares, unos 5 metros por encima de los principales, con la finalidad de mantener la tensión de los cables en la zona central.

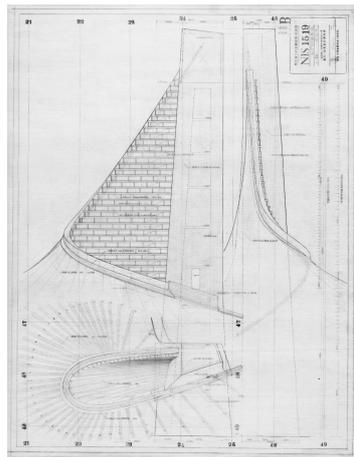
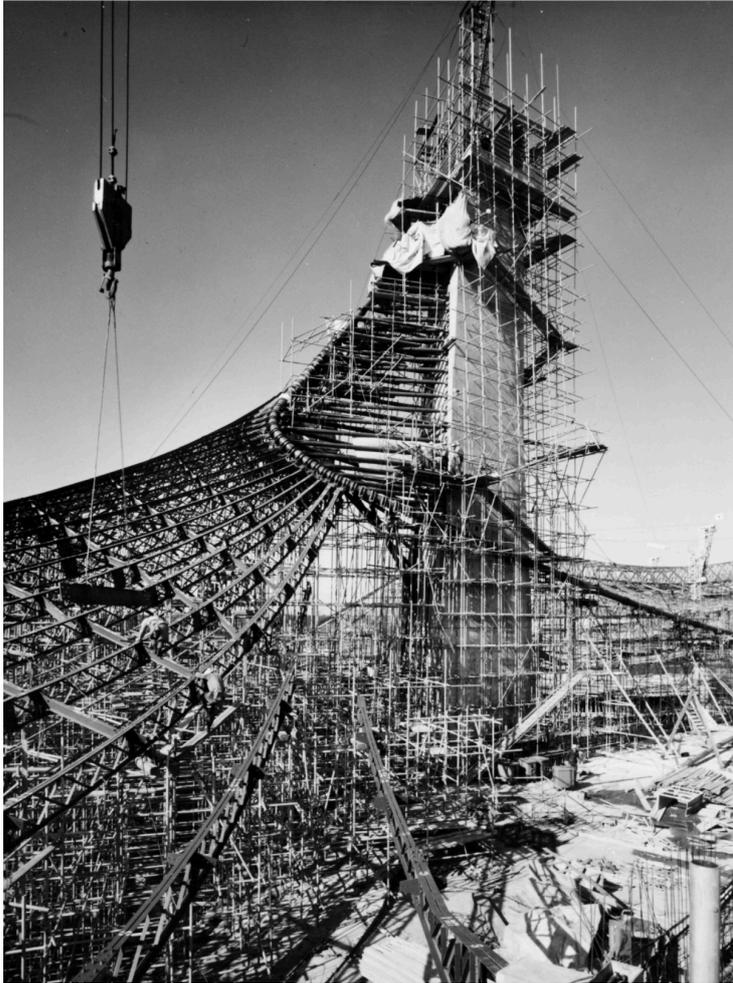


Fig. 36 Vista exterior del pabellón olímpico, construcción, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Fig. 37 Vista interior del pabellón olímpico, lucernario, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Fig. 38 Plano de detalle de la estructura de la cubierta, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

En el gimnasio olímpico, a diferencia de la piscina, la estructura principal de la cubierta consta de un único cable que parte de la zona superior de un soporte de hormigón armado, al cual se ancla también con ayuda de una serie de barras metálicas que trabajan a tracción, hasta llegar a un bloque semienterrado de cimentación. La red estructural secundaria se compone de vigas colgantes de metal que se suspenden entre el cable principal y un anillo de hormigón de planta circular, de aproximadamente 65 metros de diámetro, que se prolonga hasta el bloque semienterrado, a 44 metros, que ancla el cable al terreno. Esta estructura secundaria se ata a su vez con cables transversales de menor sección donde se fijan los materiales interiores y exteriores de la cubierta, creando en su conjunto una red de cables que genera una superficie helicoidal de doble curvatura anticlástica. En éste pabellón también se crea un lucernario, sin embargo, éste se forma entre el cable principal y el mástil, donde converge toda la cubierta generando un movimiento ascendente helicoidal muy sugerente.

Ambas cubiertas generan superficies de doble curvatura anticlástica definidas por las tensiones a las que se someten por lo que las transiciones entre espacios y curvaturas obedece las leyes naturales. Esta geometría provoca que el agua transite por gravedad hacia los puntos más bajos de estas cubiertas, cerca de los bloques semienterrados, donde se recoge y se expulsa al terreno.

Esta geometría en sí misma les otorga la estabilidad debido a la oposición de dichas curvaturas y obedece las leyes aerodinámicas, por lo que de este modo evita los problemas que produce en las grandes superficies el viento y los tifones de la zona provenientes del Pacífico. Además, en los apoyos de los cables en los pilares de hormigón de ambos gimnasios se dispusieron amortiguadores hidráulicos para adaptar la tensión de éstos cuando se producen fuertes vientos o movimientos sísmicos. Tanto estos amortiguadores como los reguladores de la piscina son visibles en el exterior ya que Tange los integra en el edificio y los destaca pintándolos de color rojo.

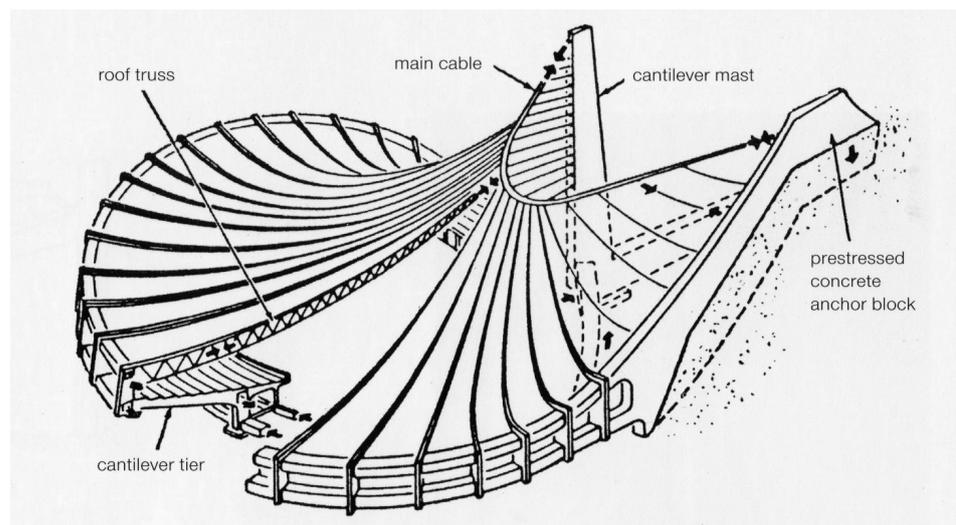


Fig. 39 Esquema estructural pabellón olímpico, construcción, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

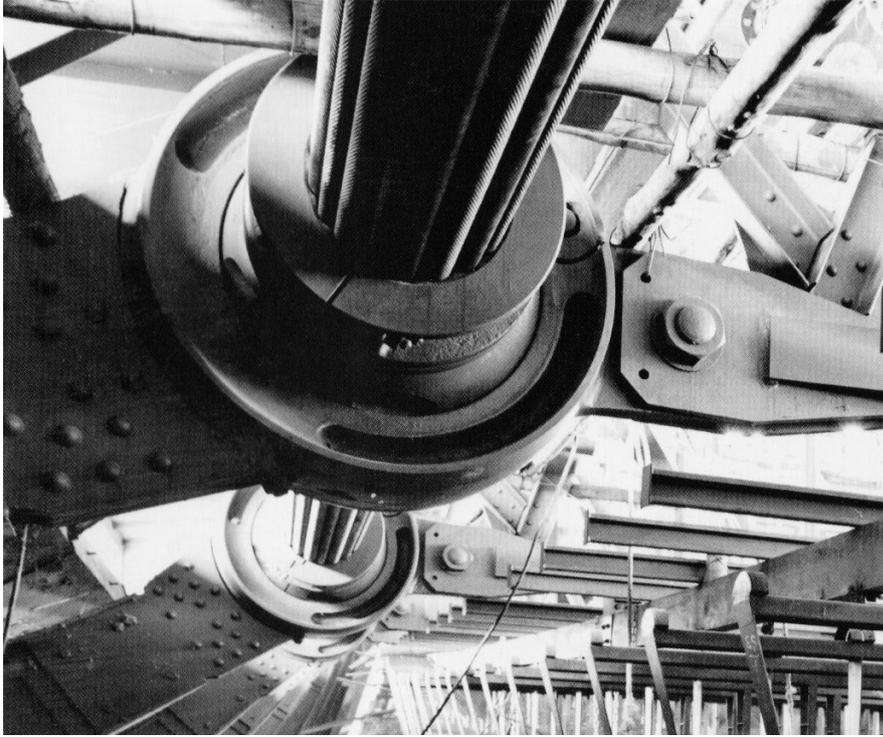


Fig. 39 Detalle unión y encuentros cables principales y secundarios

Fig. 40 y 41 Vistas exteriores de la piscina olímpica, entrada y voladizo de las tribunas, Gimnasio Nacional de Yoyogi, 1964

Uno de los grandes problemas de ambas cubiertas era cómo unir los cables principales y las vigas colgadas, ya que éstos se moverían durante el proceso de construcción. Por este motivo, las uniones entre ellos se diseñaron y construyeron de forma especial para que pudiesen absorber los importantes movimientos tanto de traslación como de rotación que se producirían durante el montaje y la obra. Estos nudos se diseñaron con varios anillos y de modo que funcionaran para todas las diferentes uniones, lo que sistematizó y facilitó la construcción de la cubierta.

Al llegar dichas vigas metálicas a los anillos perimetrales, éstas se levantan ligeramente de la cubierta y son recogidas individualmente por unas costillas de hormigón, generando aperturas en los anillos. De este modo la luz natural penetra por estos huecos de los muros perimetrales, creando una mayor sensación de liviandad y suspensión de la cubierta en el interior.

Estas costillas y anillos soportan la tracción de los cables de toda la cubierta por lo que están sometidos a grandes esfuerzos de compresión, los cuales conducen hacia el terreno prolongándose hacia abajo. A medida que se prolongan en forma de muro, éstos se van retranqueando hacia el interior generando un gran vuelo. Este marcado voladizo, unido a hecho de que dichos anillos describen una geometría de curvatura convexa, lo que provoca que éstos se eleven aún más del suelo con gran facilidad, produce que se perciban como si fueran muy ligeros y estuvieran levitando, colgando de la cubierta y no viceversa, que es como trabajan realmente.

Dichos muros acaban en el terreno en forma de arquería, permitiendo la entrada a los espacios secundarios servidores de la piscina, que transmite los esfuerzos al terreno mediante de cimentaciones de zapatas aisladas. Las zonas de los anillos más próximas a los grandes pilares y bloques de hormigón conducen los esfuerzos que absorben de la cubierta hacia el terreno en forma de muros ciegos, disolviéndose en el encuentro con dichos pilares y bloques, con cimentaciones de zapata corrida.

Entre estos pilares y bloques, sendas cubiertas se elevan desde el suelo, generando las entradas a los gimnasios, estas zonas de las cubiertas siguen la geometría de los cables principales y se suspenden entre éstos y los muros perimetrales, generando grandes voladizos de las cubiertas, de curvatura cóncava. Esta curvatura reduce el espacio interior, creando una sutil transición entre la apertura hacia el exterior, de enormes proporciones, y el espacio interior que le precede, de escala mucho más humana. Además, para soportar estos grandes vuelos se disponen unos pilares metálicos en forma de V, de 4,45 metros de anchura entre los vértices, los cuales a su vez reducen la escala de la entrada al dividir el espacio y generar las diferentes puertas.



Fig. 42 Planta del Parque Olímpico de Munich, concurso, 1972

Fig. 43 Vista exterior del Parque Olímpico de Munich

Parque Olímpico de Munich, 1972

En abril de 1966, el COI³² seleccionó la ciudad de Munich para la celebración de los Juegos Olímpicos de 1972. En diciembre de ese mismo año, se convocó un concurso público de ámbito nacional para el diseño y la construcción del Parque Olímpico, el cual debía contener el estadio, el pabellón de deportes y la piscina cubierta. La ubicación que se eligió era una zona poco desarrollada al norte de la ciudad, en *Oberwiesenfeld*, la cual se caracterizaba por la presencia del *Nymphenburg Canal*, pero sobretodo de una gran montaña artificial, fruto de los escombros provenientes de los bombardeos en Munich.³³

Uno de los grandes requisitos era que el proyecto debía suponer un importante impulso para el futuro desarrollo de la zona y su posterior utilización como zona recreativa. Sin embargo, el requisito más condicionante del concurso fue que el techo del estadio debía ser translúcido. Esto se debía al gran interés por retransmitir los Juegos Olímpicos en la televisión a color, por ende, la entrada de luz era primordial y las construcciones con materiales opacos no eran aceptadas.

En 1967, los arquitectos Behnisch & Partner junto con el ingeniero Heinz Isler y el paisajista Günter Grzimek fueron seleccionados como los ganadores del concurso. Su proyecto se basaba en una gran cubierta suspendida translúcida que conectaba todas las instalaciones deportivas, integradas en el paisaje. El jurado valoró positivamente la propuesta debido al moldeado del terreno que planteaba y a la inclusión de la colina formada por los escombros, la cual pasó a denominarse la colina olímpica, *Olympiaberg*.

Dicha cubierta suspendida se inspiraba en la del pabellón Alemania, proyectada por Frei Otto, de la Exposición Mundial de 1967 celebrada en Montreal, pero de luces y dimensiones mucho mayores, ya que Heinz Isler estaba convencido de que era posible triplicar dichas luces. Tras el fallo del concurso, la estructura no había sido calculada por lo que se recurrió a la colaboración con Frei Otto y con otros ingenieros como Fritz Leonhardt y Jörg Schlaich³⁴, debido a su experiencia con este tipo de cubiertas.

³² Comité Olímpico Internacional

³³ Bombardeos producidos entre 1947 y 1958 en la ciudad de Munich

³⁴ Ambos ingenieros habían colaborado con Frei Otto en el pabellón alemán de Montreal de 1967



Fig. 44 Maqueta del Parque Olímpico de Munich, concurso, 1972

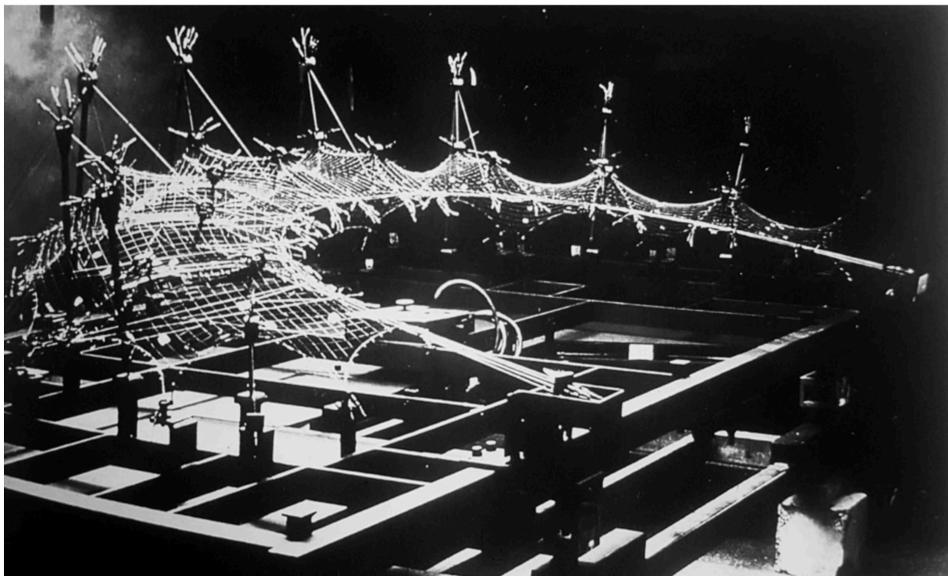


Fig. 45 Maqueta de cables tensados, Parque Olímpico de Munich, IEL, 1972

Idea del proyecto

El programa y el gran aforo que se exigían en el concurso suponía la creación de una serie de espacios cubiertos de grandes dimensiones. Por ende, el germen de la idea de este proyecto era la construcción de una cubierta ligera y translúcida que aunara y protegiera todas las instalaciones principales del Parque Olímpico, conformando un todo y no una serie de elementos aislados. Sin embargo, tras su estudio, la forma de la propuesta inicial, así como el planteamiento de una única cubierta que conectara todo, se consideró inviable, debido en gran medida a que las formas de dicha cubierta no obedecían a la distribución natural de las tensiones.

Consecuentemente, se llevaron a cabo varias investigaciones basadas en la experiencia previa del pabellón alemán y en el uso tanto de modelos de jabón como de diferentes maquetas a escala para la búsqueda de la forma más óptima y el cálculo de éstas estructuras.

“Los instrumentos de medida y el aparataje experimental fueron desarrollados y afinados continuamente en el Instituto durante el proyecto de la cubierta del Estadio Olímpico de Munich en varias vías: una nueva máquina más perfeccionada de superficies jabonosas para medida de tensión superficial, aparatos para la determinación de tensiones en redes pretensadas y otros instrumentos que se desarrollaron en colaboración con el Otto-Graf-Institut”³⁵

Este proceso de experimentación comenzaba con el estudio de las superficies óptimas con pompas de jabón, a continuación se realizaban maquetas a escala 1:125 de tul, a través de las cuales se obtenía la información sobre el comportamiento estructural del conjunto y de los espacios que se creaban. Posteriormente, se ejecutaban maquetas de alambre refinado a escala 1:75 que se analizaban por medio de galgas extensiométricas y fotogrametría, con la finalidad de comprobar su viabilidad con mayor exactitud y de medir las longitudes de todos los cables, hasta llegar a la solución final.

De forma paralela, Fritz Leonhardt, con los primeros ordenadores que llegaron al Instituto de Estructuras Ligeras, comenzó a desarrollar modelos numéricos para la representación y el cálculo informático de éstas estructuras basándose en los modelos físicos que se realizaban. Estos métodos de cálculo asistido se aplicaron por primera vez en partes de este proyecto, lo que supuso un gran avance y la consecución de una mayor precisión.

³⁵ Frei Otto. *Frei Otto complete works*. (Boston: Birkhäuser, 2005)

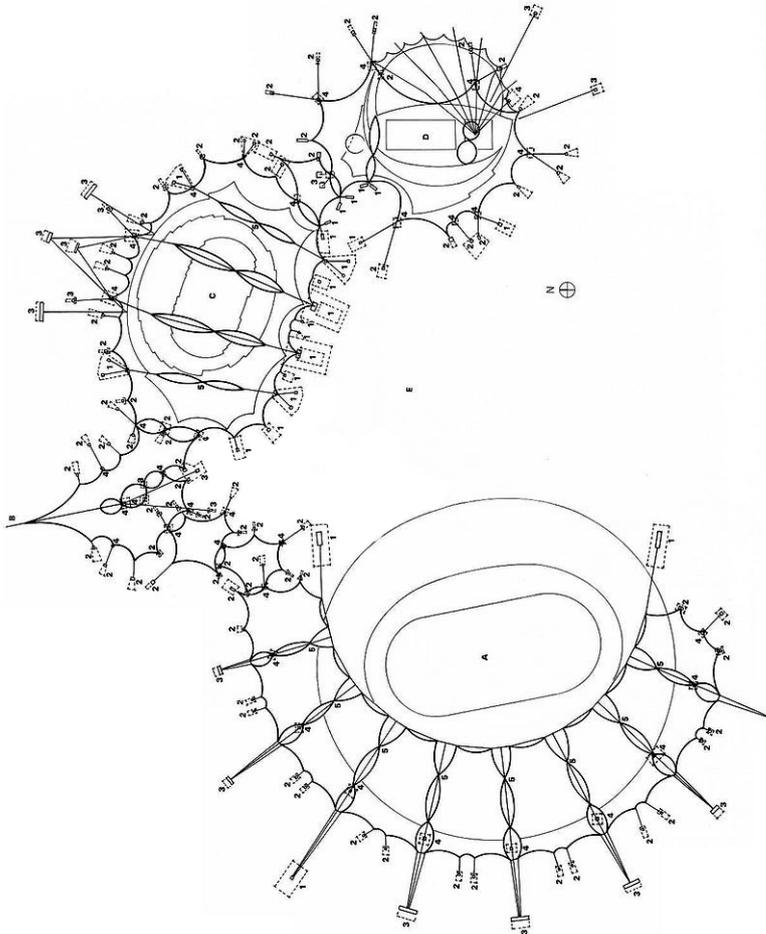


Fig. 46 Planta del Parque Olímpico de Munich

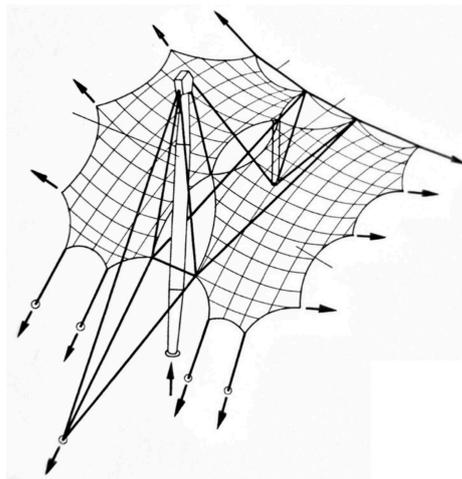


Fig. 47 Modulación de la cubierta del estadio olímpico, Parque Olímpico de Munich

Descripción general

La cubierta que genera el proyecto nace en el acceso al Parque Olímpico, al inicio de la pasarela peatonal que lo conecta con la zona norte. Al llegar al solar, dicha cubierta empieza a quebrarse y ampliarse, colonizando todo el perímetro y cubriendo y conectando las principales instalaciones deportivas, el estadio, el pabellón y la piscina, conformando un todo.

La creación y el moldeado de la topografía, que dialoga con la colina olímpica y con el canal *Nymphenburg*, mediante el lago propuesto, permite disponer las pistas deportivas en las zonas más bajas, generando los graderíos siguiendo las curvas topográficas en torno a ellas. Los espacios secundarios que completan el programa se hayan tanto debajo de estos graderíos como enterrados en las áreas circundantes. Esta disposición permite que la cubierta se tienda como un velo sobre el terreno, produciendo un impacto mínimo sobre el parque.

La estructura de dicha cubierta se basa en la suspensión de una serie de redes de cables pretensados entre mástiles de diferentes alturas, tanto internos como externos, cuyas formas son fruto de la experimentación con líquidos de alta tensión superficial, por lo que son superficies equitensionales. A pesar de constituir un todo, esta cubierta va cambiando y adaptándose al terreno, generando las diferentes instalaciones deportivas que alberga el Parque Olímpico.

Por un lado, la cubierta del estadio olímpico tiene un diseño modular de superficies regladas, paraboloides hiperbólicos³⁶. La propuesta inicial definía esta cubierta con forma libre como el resto, sin embargo, debido a sus dimensiones y sus condicionantes, resultaba inviable por lo que se modificó y se optó por la modulación. Dicha modulación consiste en su división en 9 módulos iguales conectados de forma que la estructura funciona únicamente a través del trabajo conjunto de todos ellos ya que comparten elementos de apoyo y de contorno. Esta modulación, además de hacer factible esta cubierta, supuso un mayor orden estructural, lo que favoreció la simplicidad del proyecto y por lo tanto su diseño, cálculo, producción y construcción en serie.³⁷

³⁶ Superficie doblemente reglada por lo que puede construirse a partir de rectas, también denominado superficie de silla de montar

³⁷ Todos los datos técnicos expuestos en el presente apartado, excepto en aquellos que se especifique lo contrario, han sido extraídos del artículo: W. Schmidt, “Cubierta del Estadio Olímpico en Munich - Alemania Federal” Informes de la Construcción 25, 248 (marzo,1973): 49-54

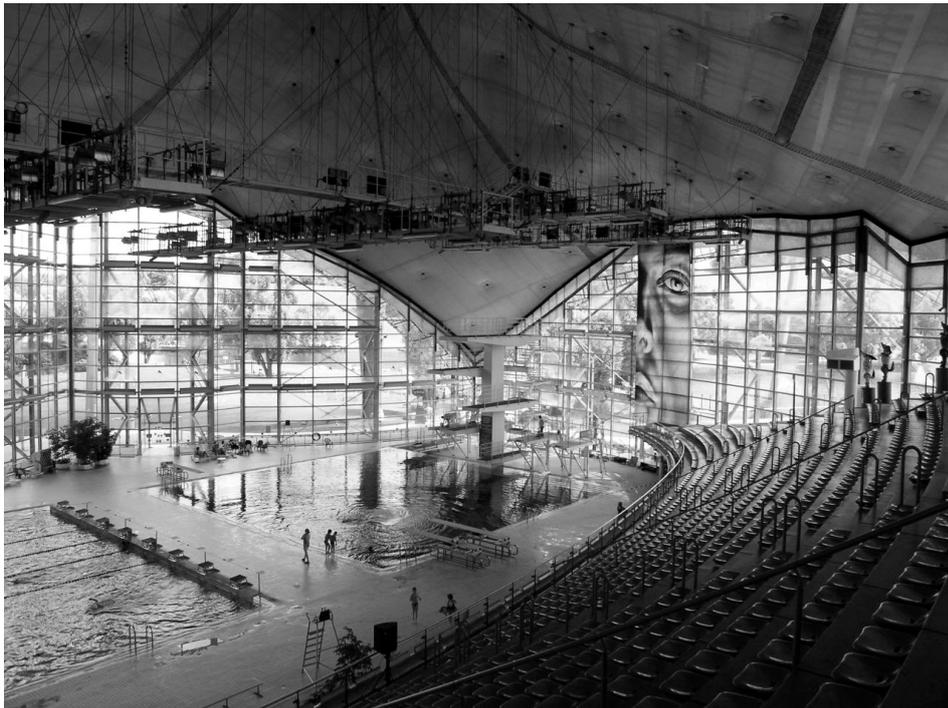


Fig. 48 Vista interior del estadio olímpico, Parque Olímpico de Munich

Fig. 49, Vista interior de la piscina olímpica, Parque Olímpico de Munich

Este estadio, situado en la zona oeste, tiene forma casi circular y consta de una pista de 400 metros de cuerda³⁸ y un graderío que la rodea completamente, a pesar de que la cubierta solo esté presente en la mitad occidental del mismo. Dicho graderío se integra casi por completo en la diferencia de nivel entre la pista y las zonas comunes generada por la topografía, sin embargo, un tercio de éste se alza por encima de la cota más alta del terreno hasta una altura máxima de 16m, alcanzando un aforo de 77.000 espectadores.

En esta zona superior, así como en la zona opuesta soportada por el terreno, los graderíos se hayan escalonados como medida para adaptarse a la forma circular del estadio. Al igual que el Gimnasio Nacional de Yoyogi, los accesos se hayan en el nivel superior, el de tránsito y de comunicación entre instalaciones, por lo que la circulación también es descendiente hacia los asientos y las pistas. Esto también se produce en la zona en la que el graderío sobresale ya que se disponen una serie de vomitorios de accesos y evacuación a dicho nivel, lo que permite descender y ascender hacia las diferentes gradas. Dichas circulaciones dividen el graderío en 28 sectores, además, la pendiente de las escaleras diseñadas para estas circulaciones se hizo coincidir con la de las gradas, de modo que no obstaculizara la visión de los espectadores.

Por otro lado, la cubierta del pabellón olímpico también está fraccionada en varias secciones, a pesar de haberse diseñado inicialmente como una forma libre, sin embargo, su modulación no es tan rígida como en el estadio olímpico. En lo referente a la de la piscina olímpica, ésta sí que tiene forma libre o compuesta, ya que es de menor tamaño, lo que facilita tanto su cálculo como su construcción. Ambas cubiertas, a diferencia de la del estadio, son opacas, lo que las asemeja en mayor medida al pabellón alemán de Montreal. En contraste con dicho pabellón y el estadio olímpico, estas instalaciones deportivas se encuentran delimitadas por unos muros de vidrio no coincidentes con el perímetro de las cubiertas generando umbrales de entrada a sendas instalaciones. Por ende, la iluminación en estos pabellones proviene de dichos muros, los cuales se sitúan en las aperturas que se generan entre los apoyos de las cubiertas en los mástiles y en el suelo. En estas instalaciones deportivas, las gradas también se generan mediante la diferencia de nivel existente entre las pistas y los accesos, alcanzando un aforo de 10.600 espectadores en el pabellón y 8.400 en la piscina olímpica.

Las cubiertas que resuelven las diferentes conexiones entre instalaciones y marcan los accesos al Parque Olímpico son translúcidas como las del estadio y junto a las de dichas instalaciones suman una superficie de 74.800m².

Por ende, el diseño y la materialización de esta cubierta supuso la construcción de la mayor cubierta tensada del mundo en su día, título que mantiene en la actualidad.

³⁸ Dato técnico extraído la tesis: Alfonso Cano Pintos, "El estadio Olímpico. Sus fundamentos arquitectónicos" (Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 2016)

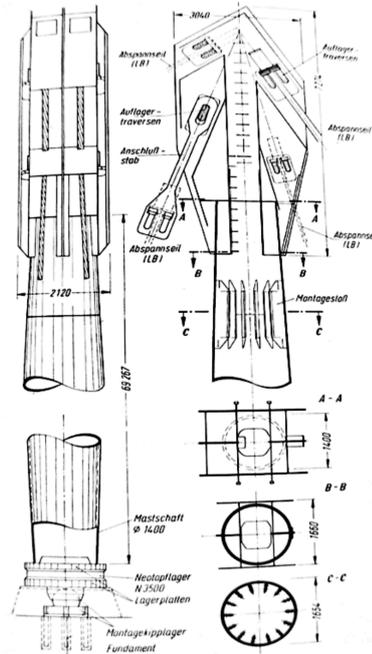


Fig. 50 y 51, Vista y detalles de los mástiles, Parque Olímpico de Munich

Fig. 52 Vista exterior del estadio olímpico en construcción, Parque Olímpico de Munich

Funcionamiento estructural y aspectos técnicos

A pesar de que esta cubierta va generando los diferentes espacios e instalaciones deportivas, a la vez que va adaptándose al terreno, tanto su funcionamiento estructural como su construcción son iguales en todas las zonas que genera y cubre.

El principio de esta estructura se basa en la suspensión de una serie de cubiertas de redes de cables tensados entre mástiles y anclajes en el terreno, a través de los cuales se generan y consiguen las superficies equitensionales.

Estos mástiles, como soportes principales de esta estructura, varían en altura dependiendo de su disposición y las cargas que resisten, llegando a alcanzar desde los 11 hasta los 80 metros y soportando una carga de hasta 3.200 MPa. En los apoyos y las cimentaciones de estos mástiles se dispusieron juntas de neopreno de 1,77 m de diámetro sobre cojinetes de bolas, esto permitió el movimiento al que se sometían durante el proceso de montaje de las redes de cables y su tensado y su posterior inclinación hasta la posición concreta que debía tener cada uno.

Dichas mástiles son tubos de acero de sección circular cuyos extremos se hallan apuntalados, en forma de cono. La zona central de estos soportes está formada por una chapa de acero que varía entre los 20 y los 37 mm de espesor con un diámetro de 1,9 y 3,5 m respectivamente. Los extremos superiores e inferiores, los cuales cada uno supone un cuarto del mástil están formados por chapas de acero de espesor variable entre los 40 y los 60 mm. Éstos cabezales se soldaron en los talleres por lo que en obra únicamente se produjo su unión con las zonas centrales, lo que se resolvió mediante la soldadura en la zona interior de piezas de acero rígidas y del uso de tornillos de alta resistencia.

Sobre los cabezales de los mástiles se ubican las poleas, las cuales, mediante unas barras soldadas a éstas, de 150 mm de diámetro, sujetan los cables que sostienen las mallas que conforman la cubierta. En un principio se pretendía que las cubiertas apoyaran en los mástiles como en el pabellón de Montreal, sin embargo, finalmente se optó por que las cubiertas colgaran de éstos mediante cables ya que de este modo se obtenían mayores variaciones de curvatura, y por ende, mayor rigidez. Además de éstos cables, en los extremos de las cubiertas también existen tensores que las anclan al terreno, así como otros que arriostan los mástiles para asegurar su correcta inclinación y estabilidad.

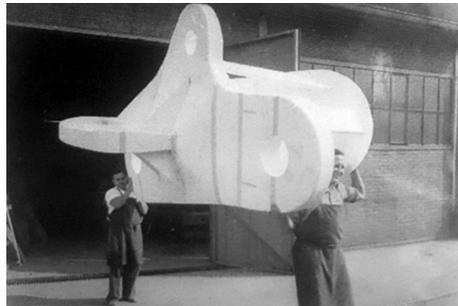
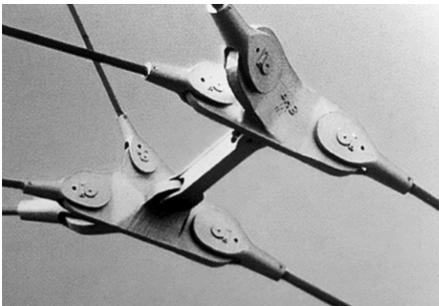
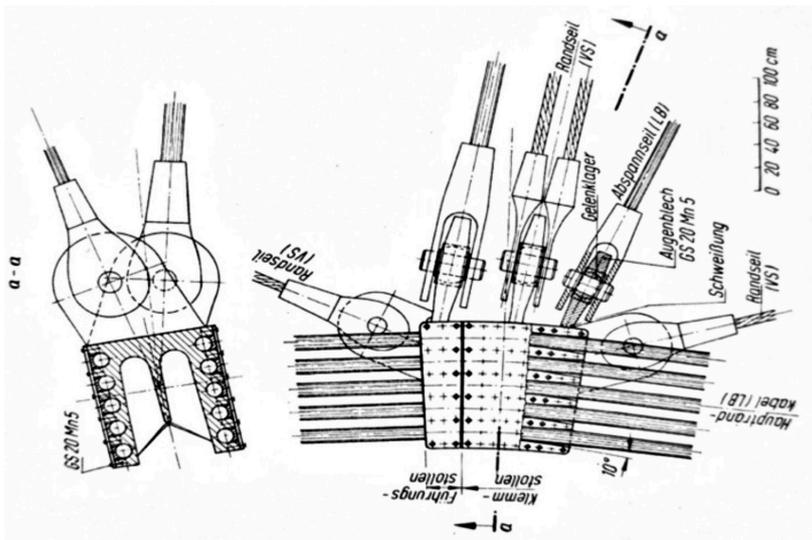
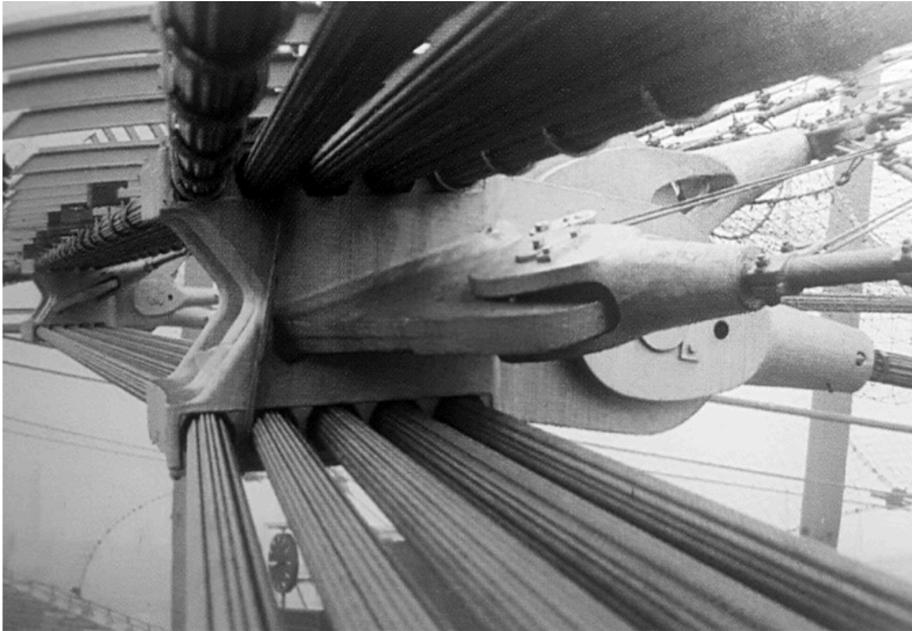


Fig. 53 y 54 Vista y detalle de los cables marginales y sus uniones, Parque Olímpico de Munich

Fig. 55 y 56 Uniones cables tensados en obra y modelo, Parque Olímpico de Munich

En lo referente a las cubiertas del pabellón y la piscina olímpicos, así como de las diferentes conexiones entre instalaciones deportivas, éstas se suspenden únicamente mediante los mástiles y apoyos en el terreno mencionados. Sin embargo, en el caso del estadio olímpico, su condición de cubierta parcial sobre el graderío generaba un problema ya que los mástiles no podían estar ubicados sobre las gradas o las pistas, dado que obstaculizaría la visión de los espectadores. Para solucionarlo, los mástiles se dispusieron en la zona posterior de las gradas, de modo que las cubiertas se tensan entre los cables que parten de éstos, los que las arriostran al suelo y un cable perimetral en la zona más cercana a la pista.

Este cable marginal resuelve el gran voladizo de la cubierta, elevándose hasta 40 metros por encima de la pista, por lo que no obstruye la visión en ninguna zona. El mencionado cable se divide en 2 haces, los cuales constan de 5 cordones de 15,75 mm de diámetro, arrollados en sentidos contrarios en cada haz como medida para evitar la torsión que podían sufrir al tensarse. Estos cordones a su vez están formados de alambres de acero de 5,3 mm de diámetro, 150 Kp/mm² de resistencia y 22,5 MPa de carga de rotura. Dicho cable de borde conecta y unifica los 9 módulos de la cubierta, describiendo un semicírculo perimetral de 457 m de longitud, y soportando una carga de 4.500 MPa que se arriostra en los extremos de la cubierta mediante bloques de anclaje de hormigón armado, también semienterrados como en el caso del Gimnasio Nacional de Yoyogi.

Además de este importante cable marginal que resuelve el voladizo de la cubierta hacia la pista del estadio, en el resto del perímetro, tanto de la del estadio como de todas las demás, existen también cables de borde que ayudan a tensarlas y a otorgarles la forma que deben tener. Dichos cables se extienden hasta que se recogen en algunos puntos en los que se arriostran las cubiertas al terreno, también mediante bloques de anclaje.

Las uniones de todos los mencionados cables que soportan y tensan la cubierta se resuelve mediante abrazaderas de acero fundido de alta calidad, de diseño variable según el número y el tipo de conexiones que deben albergar en un mismo punto.

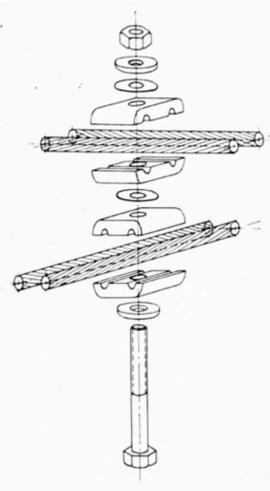


Fig. 57 y 58 Vista y detalles de las uniones entre cables y cubierta, Parque Olímpico de Munich

Fig. 59 Acabado de la cubierta, construcción, Parque Olímpico de Munich

Gracias a los cables y anclajes descritos, las cubiertas se suspenden entre los diferentes apoyos generando formas de curvaturas variables y por ende, espacios muy cambiantes y diferentes. Para la materialización de las superficies de estas cubiertas se optó por su construcción mediante redes de cables de acero pretensados. Éstos están espaciados en ambos sentidos 75 cm, conformando una malla reticular, a excepción de los bordes en los que la forma y las dimensiones son distintas, adaptándose a la geometría de la cubierta. Dichos cables, de 25 mm de diámetro y formados por 19 cordones galvanizados, se unen por medio de anclajes giratorios de aluminio, permitiendo su movimiento y rotación durante el montaje así como la adaptación de la malla a la geometría óptima equitensional de la cubierta.

En lo referente al cerramiento de esta estructura de redes de cables, toda la superficie se cubre con una capa translúcida que protege el interior pero también permite pasar la luz, lo que propició la retransmisión de los Juegos Olímpicos en la televisión en color. Tras varias pruebas con diferentes materiales se optó por la utilización de placas de vidrio acrílico, debido a su gran translucidez y resistencia al fuego de clase B1, las cuales se tiñeron parcialmente con un tenue tono de gris. Estas placas, de 2,9 x 2,9 m y 4 mm de espesor, están dispuestas sobre la estructura de mallas de cables y unidas a éstas en todas sus intersecciones. Para fijarlas, se colocaron válvulas de neopreno en la zona superior de los anclajes de aluminio y sobre éstas las placas. Para perforarlas y unir las a las válvulas, mediante procedimientos térmicos, se desarrolló un sistema especial que facilitara su uso y garantizara la calidad incluso en grandes pendientes de hasta 80°. Las placas de vidrio acrílico se encuentran unidas entre sí mediante bandas de caucho vulcanizados en obra y unidos a las placas por medio de perfiles en U atornillados en los perímetros de las placas. De este modo se asegura la continuidad de la superficie de la cubierta y se permite el movimiento de las placas ante el aumento de temperatura o la presencia de viento o nieve.

En cuanto al desagüe de las cubiertas, éste se resuelve mediante la propia geometría de las cubiertas ya que por gravedad el agua desciende y se concentra en los puntos más bajos de éstas, los más cercanos al suelo. Es en éstos puntos donde el agua cae al exterior por lo que para recogerla y conducirla a la red de saneamiento se disponen rejillas circulares, marcadas por un cambio de pavimento. Además, en los perímetros de las cubiertas, para conducir mejor el agua y retener mejor la nieve, se disponen unas pequeñas placas de vidrio acrílico ancladas a la malla por medio de perfiles metálicos y válvulas de neopreno y dispuestas perpendicularmente a las de cerramiento.

La gran precisión en el cálculo y el diseño de la estructura, así como la planificación del sistema de montaje, facilitaron y agilizaron en gran medida su construcción, además de evitar los problemas que podían darse durante la ejecución de la obra. Tanto los mástiles como los cables se suministraron en obra con sus dimensiones precisas y marcados y organizados mediante números para conocer su posición exacta. El proceso constructivo se realizó en 3 fases, la colocación de los mástiles y elementos de anclaje, la elaboración de las mallas de cables de acero en el suelo y su posterior colocación y tensado, y por último la instalación del revestimiento final de la cubierta.

Tras el estudio y análisis conciso de estos proyectos y estructuras en definitiva, se aprecia en ellos una mayor depuración de la estructura y la técnica en comparación con las primeras aplicaciones de las estructuras tensadas a la arquitectura, consiguiendo con gran maestría la armonía entre estructura y forma y suponiendo la consolidación de la arquitectura tensada. Además, la concepción y construcción de estas obras constituyen un importante punto de inflexión ya que nunca antes se habían erigido unas cubiertas tensadas de estas dimensiones.

“It is said that the collaboration between an architect and a structural engineer is not easy. But I think I was lucky to be able to collaborate with Professor Tsuboi Yoshikatsu in this project. [...] In such a system the shell and the life in it- structure and architecture- should be fused and integrated into unity, which calls for very close collaboration between the architect and the structural engineer.

There were many people who worked on and built the project, architects and structural engineers. And it is important to say that a continuous relationship between the work of each was necessary just like the work of the structural components themselves, because the variation in one element was reflected, given the continuity of the structure, in all the other elements. In this architecture, formal unity is essential.”³⁹

Como reflejan las palabras de Kenzo Tange, la sinergia entre arquitectos e ingenieros es indispensable desde el inicio para la unicidad de proyecto y estructura, especialmente en estas obras. Esta unión y armonía se manifiesta con gran claridad en estos proyectos, ya que en ellos, la forma y la estructura conforman un todo, no se puede entender la una sin la otra. Es por ello que en el Gimnasio Nacional de Yoyogi y en el Parque Olímpico de Munich se puede apreciar que la solución estructural no sólo participa de la idea arquitectónica, sino que es el germen de la misma.

³⁹ Kenzo Tange, “Gli Stadii olimpici a Tokio”, *Domus Architettura Arredamento Arte* 424 (marzo 1965): 2-13

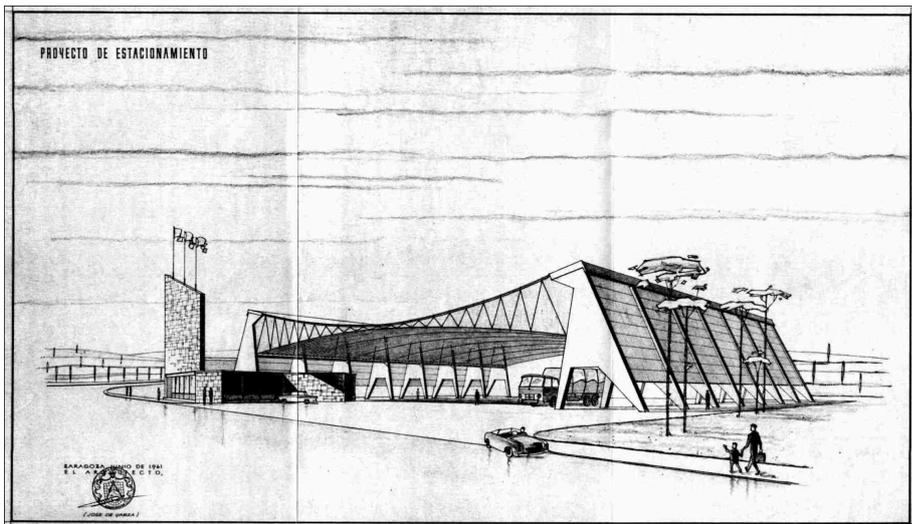


Fig. 60 y 61 Vista exterior e interior, Picadero Club de Campo

Fig. 62 Vista exterior, Proyecto Estacionamiento

EPÍLOGO ESPAÑOL

En el panorama nacional, la presencia de cubiertas tensadas es reducida, sin embargo, destaca la figura de Carlos Fernández Casado, y de José de Yarza García. El primero sobresale por la obra del Picadero del Club de Campo, construida en Madrid en 1968, una cubierta tensada pesada, de cables y hormigón.

José de Yarza García destaca por dos obras de cubiertas de redes de cables ligeras, por lo que es de mayor interés en el presente trabajo. Además, se trata de un arquitecto nacido en Zaragoza en 1907 que desarrolló su obra principalmente en esta, nuestra ciudad.

Su investigación en el ámbito de las estructuras tensadas comienza a finales de la década de los 50 cuando adquiere el libro “*Das hängende Dach*”, la tesis doctoral de Frei Otto publicada en 1954 en el cual éste expone los orígenes de estas cubiertas además de su evolución y su aplicación en la arquitectura, tanto en obras ya construidas como teóricas, acompañadas de cálculos y detalles constructivos. Este exhaustivo manual genera en él un gran interés por este campo, lo que le lleva a investigar y estudiar estas estructuras en mayor profundidad mediante varios proyectos, la Estación de Servicio de los Enlaces, de 1962, y la Capilla del Colegio de los Marianistas, de 1968, ambos erigidos en Zaragoza, además de otros proyectos no construidos.

El “Proyecto de Nave de Fundición”, cuyo encargo recibe en 1956, es el primero en el que plantea una cubierta tensada. A pesar de que únicamente se conservan croquis a mano alzada, se detecta en ellos la intención de utilizar una cubierta tensada de curvatura simple como solución estructural para resolver esta nave, dada la naturaleza longitudinal de ésta.⁴⁰

En el año 1960, recibió otros dos encargos “Proyecto de Umbráculo desmontable para estacionamiento de Vehículos Gigantes” y “Proyecto de Edificio para Moldeados Plásticos”, a pesar de que únicamente se ejecutó el primero, a partir de los numerosos planos y dibujos que se conservan del segundo se puede ver perfectamente el diseño y las intenciones del arquitecto. En ambos, Yarza se basó en los conocimientos obtenidos a través de la tesis de Frei Otto, proponiendo sendas cubiertas tensadas de curvatura simple.

⁴⁰ Información extraída del archivo personal de José de Yarza García a partir de la tesis doctoral: Guzmán de Yarza García, “José de Yarza García; Vínculos Europeos en la Modernidad Periférica Española” (Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 2015)



Fig. 63 y 64 Vista en construcción y final, Estación de los Enlaces, Zaragoza

En las secciones transversales que se conservan de ambos proyectos se observa que ambas estructuras estaban formadas por pórticos de hormigón sobre los que se disponían unas vigas relingas, entre las cuales se suspendían una serie de cables de acero, en forma de catenaria. Para que dichas cubiertas resistieran el empuje de las fuerzas verticales, a vez de aumentar el peso propio de la cubierta, se optó por disponer otra serie de cables de acero en forma de catenaria invertida, suspendidos entre dos vigas relingas y atados a los anteriores por medio de una triangulación resuelta mediante otros cables de menor sección. En lo referente a los pórticos, los diferentes dibujos muestran el estudio y la investigación que Yarza realiza para la consecución de la forma que mejor responda a la estructura y los esfuerzos que soporta. También se observa en los planos que los pórticos de ambos proyectos se diseñan con forma de “pajarita” resultado directo de este estudio de las fuerzas resultantes, ya que debe soportar la tracción proveniente de los cables principales, en la zona superior, pero también de los cables secundarios, fijados a través de las vigas relingas dispuestas aproximadamente a la mitad de éstos, y su anclaje en el terreno. En lo referente al acabado de la cubierta se opta por paneles Novopan terminados en planchas de aluminio y atornillados mediante perfiles en omega.⁴¹

Los planos del proyecto de ejecución de la Estación de Servicio denotan una clara influencia de la tesis de Frei Otto, sobretodo en lo referente a los detalles constructivos de las diferentes uniones, tanto de los cables entre sí como de éstos con la cimentación o los apoyos. Además, Yarza también utilizó las maquetas como medio para la investigación y experimentación de este tipo de estructuras, así como para calcularlas y conocer mejor su funcionamiento.

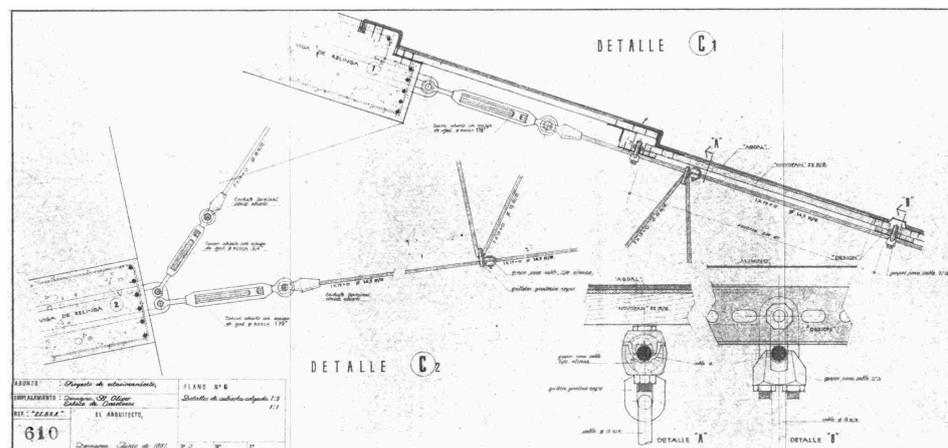


Fig. 65 Detalle constructivo cubierta tensada y acabado, Estación de los Enlaces, Zaragoza

⁴¹ Información extraída del archivo personal de José de Yarza García a partir de la tesis doctoral: Guzmán de Yarza García, “José de Yarza García; Vínculos Europeos en la Modernidad Periférica Española” (Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 2015)

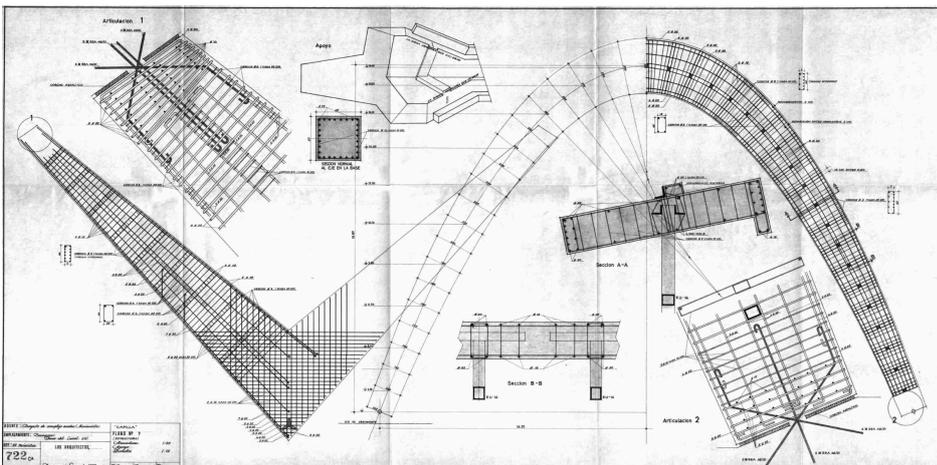
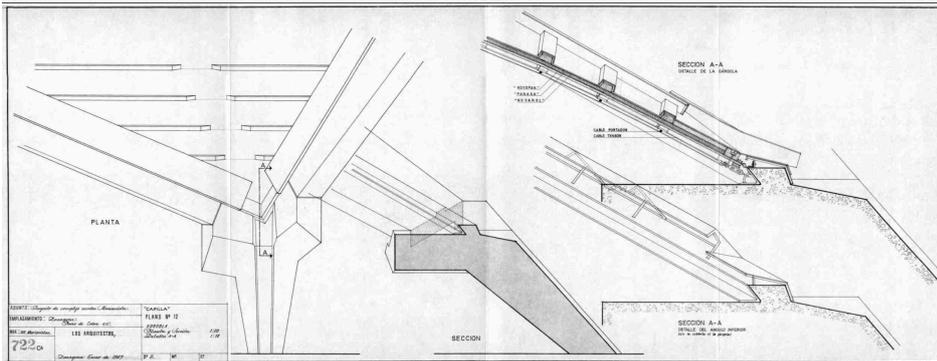
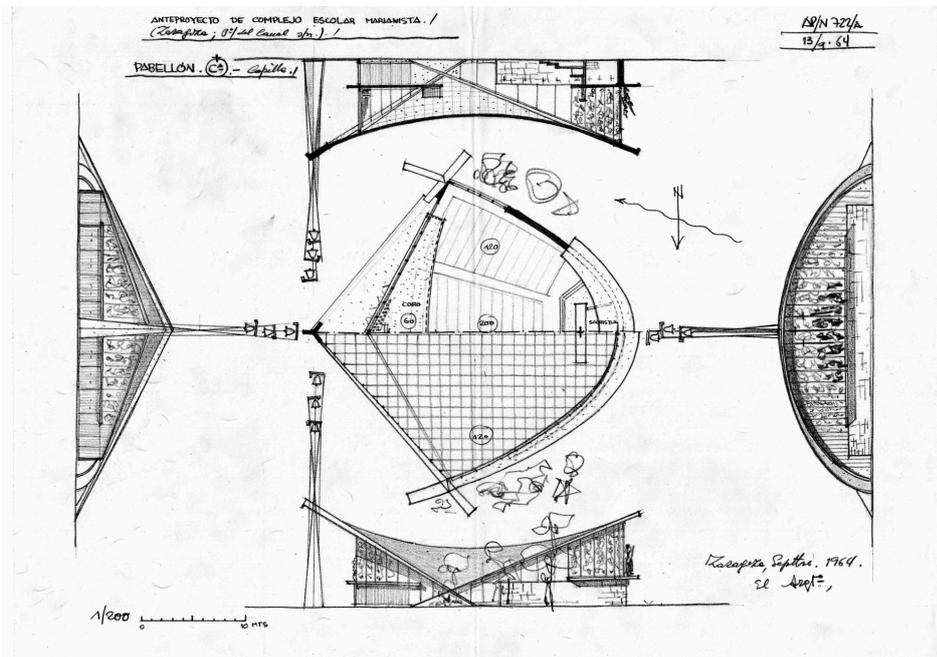


Fig. 66 Planta, alzados y sección, Capilla de los Marianistas, Zaragoza

Fig. 67 y 68 Detalles cubierta, desagüe y armados, Capilla de los Marianistas, Zaragoza

En lo referente a la Capilla del Colegio de los Marianistas, el primer documento que se conserva es un plano del anteproyecto, consistente en una planta, tres alzados y una sección, en el que se percibe con gran claridad la intención de proyectar una cubierta tensada de doble curvatura que genere y envuelva el espacio interior de la capilla. Este proyecto entronca directamente con el Dorton Arena de Raleigh de Matthew Nowicky y Severud Associates, finalizado en 1953 y cuya foto protagoniza la portada de la tesis de Frei Otto, así como con otros proyectos como el Shizuoka Convention Hall de Kenzo Tange, de 1957, cuyas publicaciones forman parte de la biblioteca de Yarza.

El principio estructural de esta obra consiste en la suspensión de una cubierta tensada de redes de cables entre dos grandes pórticos de hormigón, uno triangular y otro parabólico, que parten del mismo punto y continúan de forma inclinada hacia el lado contrario. Esto permite tejer entre ellos una malla de cables de curvaturas opuestas generando una superficie de doble curvatura.

En este proyecto, gracias a toda la documentación que se conserva en el archivo, se puede observar el gran interés de Yarza por calcular manual y gráficamente toda la estructura del edificio, así como de diseñar todos los detalles constructivos y estructurales del mismo.⁴² Entre los planos se pueden encontrar detalles como los armados de cada uno de los pórticos, los encuentros de los cables con dichos pórticos, las diferentes capas de la cubierta y el remate de la misma entre muchos otros. También se puede advertir el detalle de los encuentros articulados de los pórticos, los cuales aprovecha para generar el desagüe de la cubierta, que baja por gravedad y por la propia geometría de la cubierta, hasta recogerse en estos canales que la conducen hasta sendas albercas situadas en el contacto de los pórticos con el terreno.

Estos proyectos, a pesar de ser mucho más modestos que los analizados anteriormente en cuanto a sus dimensiones y consecuentemente en su tecnología y materiales, destacan por varios factores. Por un lado, por el poder que tienen sus respectivas estructuras y la técnica utilizada como generadoras de proyectos y por otro, de la gran depuración de dicha técnica, lo que deriva en la unicidad y equivalencia de proyecto y estructura. Igualmente es de gran valor el estudio y la experimentación llevada a cabo por José de Yarza, así como el minucioso cálculo y detalle en el proceso de diseño de estas estructuras, plasmado en cada uno de sus dibujos y sus planos. Todo ello, unido al hecho de que se proyectaron y construyeron en la década de los 60, coetáneos e incluso previos a los referentes mundiales mencionados, les otorgan un mérito e importancia mucho mayor.

⁴² Información extraída del archivo personal de José de Yarza García a partir de la tesis doctoral: Guzmán de Yarza García, “José de Yarza García; Vínculos Europeos en la Modernidad Periférica Española” (Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 2015)

CONCLUSIONES

Llegados a este punto, tras el profundo estudio y análisis que se expone en el presente trabajo, el aprendizaje obtenido resulta tanto gratificante como fructífero, especialmente en el ámbito del proyecto de investigación personal de mayor envergadura del que forma parte. Por ende, es tanto pertinente como crucial, manifestar y exponer lo que se ha aprendido a lo largo de la elaboración de esta investigación. Huelga decir, que estas conclusiones así como las experiencias aprendidas, son válidas y aplicables a todos los ámbitos de la arquitectura y no únicamente a las estructuras tensadas, el campo tratado con mayor profundidad en el trabajo.

En primer lugar, la importancia de una colaboración intensa y profunda entre arquitectos e ingenieros desde el inicio de los proyectos, así como de la trascendencia y el valor que tienen los conocimientos de las estructuras y su entendimiento, en el campo y el ejercicio de la arquitectura. Esto nos lleva a recordar las palabras de Kenzo Tange:

“It is said that the collaboration between an architect and a structural engineer is not easy. But I think I was lucky to be able to collaborate with Professor Tsuboi Yoshikatsu in this project. [...] In such a system the shell and the life in it- structure and architecture- should be fused and integrated into unity, which calls for very close collaboration between the architect and the structural engineer.[...] There were many people who worked on and built the project, architects and structural engineers. And it is important to say that a continuous relationship between the work of each was necessary just like the work of the structural components themselves, because the variation in one element was reflected, given the continuity of the structure, in all the other elements. In this architecture, formal unity is essential.”⁴³

Esta sinergia es la esencia de la propia arquitectura ya que, en el arte de construir, la diferencia de disciplinas no existe, no se puede entender la arquitectura sin la estructura, ya que sin ésta no es posible concebir la arquitectura según los tres principios de Vitruvio que la definen, utilitas, firmitas y venustas.

⁴³ Kenzo Tange, “Gli Stadii olimpici a Tokio”, *Domus Architettura Arredamento Arte* 424 (marzo 1965): 2-13

*“Desde que se produjo la separación entre arquitectos e ingenieros los arquitectos naturalmente se han ocupado más de la visión cualitativa y del estudio minucioso de las construcciones y estructuras, mientras que los ingenieros siempre se han centrado más en el cálculo, siendo así que sencillamente los dos enfoques son necesarios. Yo estoy tanto en el lado de los ingenieros como en el lado de los arquitectos. No hay ninguna separación. Toda posible separación es errónea. La física experimental es exactamente tan necesaria como la teórica. Y no ayuda nada separar, hay que integrar.”*⁴⁴

Esta separación de disciplinas es criticada por Frei Otto en su conversación con Juan María Songel en 2004. En ella, Otto también defiende otro de los principios aprendidos en la elaboración del presente trabajo, la importancia de la investigación y la experimentación en la arquitectura, y critica la carencia y ausencia de ésta.

"Poder construir presupone el conocimiento de todas las formas de la arquitectura y de la construcción, al igual que de su desarrollo. Construir significa progresar en ese proceso, investigar y hacer. [...] Todavía hay innumerables posibilidades abiertas, innumerables descubrimientos por hacer.

*En la actualidad, ni los arquitectos ni los ingenieros llevan a cabo labores de investigación notable.”*⁴⁵

Además, en el proceso de investigación, es de gran valor la constante búsqueda mediante el uso de maquetas, ya que éstas son herramientas tanto proyectuales como constructivas y experimentales y en ellas se puede estudiar el comportamiento de las estructuras pero también las formas que generan en sí mismas. Igualmente, a través de la construcción de modelos de diferentes materiales y escalas, y de su observación, esta investigación es más fructífera y la comprobación es más directa, ya que en ocasiones no existen otros métodos de cálculo o de constatación de su viabilidad.

La investigación de estas estructuras se basa en gran medida en la búsqueda de la eficiencia y la optimización de éstas, lo que conlleva la consecución de una construcción sostenible, ya que los materiales utilizados son mínimos, al igual que las superficies que se buscan y exploran mediante la experimentación. Este principio de construcción sostenible es de gran importancia, no únicamente en el ámbito de las estructuras tensadas, sino de forma global en la arquitectura y la ingeniería así como en todas las disciplinas que intervienen en el arte de construir.

⁴⁴ Frei Otto. Conversación con Juan María Songel González, “Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente” (tesis doctoral, Departamento de Composición Arquitectónica, Universidad Politécnica de Valencia, 2005)

⁴⁵ Frei Otto. Conversación con Juan María Songel González, 2005

Por otro lado, tras el estudio proyectos de estructuras tensadas, se denota y es destacable la gran trascendencia de las Exposiciones Universales, así como de los Juegos Olímpicos, en la construcción e investigación de nuevas técnicas estructurales y del desarrollo de la tecnología para la materialización de estas obras. Además, los espacios deportivos son de especial importancia en el progreso y la proliferación de dichas estructuras, debido a la necesidad de crear grandes espacios diáfanos para albergar las instalaciones deportivas y un aforo cada vez mayor, dotado de buena visibilidad.

Finalmente, y en lo referente al proyecto de investigación personal del que este Trabajo de Fin de Grado forma parte, el estudio de éstas estructuras, de su funcionamiento, origen, precedentes y ejemplos más destacados ha sido de gran importancia y . Esto se debe a que las cubiertas tensadas, en sí mismas, son capaces de generar espacios de gran interés pero también de ser el germen y las generadoras de grandes proyectos. Por ello, su análisis e investigación resulta esencial y enormemente pertinente y didáctico, tanto en el ámbito puramente teórico como en el práctico.

BIBLIOGRAFÍA

- Ageeva, E. Yu. y Spiridonova, A.I. 2015. *ВАНТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ В ЗРЕЛИЩНЫХ ЗДАНИЯХ*. (Nizhny Novgorod, Universidad Estatal de Arquitectura e Ingeniería Civil de Nizhny Novgorod). Traducido del ruso “Construcciones tensadas en edificios dedicados al ocio”, traducción del autor
- Araujo, Ramón. 2008 .La arquitectura como técnica (I): Superficies. Madrid
- Araujo, Ramón. 2004.Geometría, tectónica y arquitectura. *Tectónica* 36: 4-17
- Archivos Arquitectos. José de Yarza García. <http://archivosarquitectos.com/archivos/jose-de-yarza-garcia/>
- Bunka, Kenchiku. 1965. Kenzo Tange for Tokio. *Domus*. <https://www.domusweb.it/en/from-the-archive/2011/08/04/kenzo-tange-for-tokyo.html>
- Cancino Yáñez, Rodrigo Ignacio. 2018. Estructuras de grandes luces con uso de cables y cubierta flexible. Trabajo de Fin de Grado. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile
- Cano Pintos, Alfonso. 2016. El estadio Olímpico. Sus fundamentos arquitectónicos. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid
- Cassinello, P., Schlaich y M., Torroja, J.A. 2010. Félix Candela. In memoriam (1910-1997) From thin concrete shells to the 21st century's lightweight structures. *Informes de la Construcción* 62, 519 (julio-septiembre): 5-26
- de Alarcón Alvarez, Concepción y de Alarcón Alvarez, Enrique. 1971. Las cubiertas de grandes luces. *Soluciones actuales. Informes de la Construcción* 23, 229 (abril): 49-60
- de Yarza García, Guzmán. 2015. José de Yarza García; Vínculos Europeos en la Modernidad Periférica Española. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid
- Esgrig, Jélix y Pérez Valcárcel, Juan. 1989. Conceptos básicos para el diseño y análisis de estructuras ligeras tensadas. *Revista de Edificación* 6 (junio): 40-54
- Esgrig, Jélix y Pérez Valcárcel, Juan. 1989. Conceptos básicos para el diseño y análisis de estructuras ligeras tensadas (2ª parte). *Revista de Edificación* 8 (diciembre): 9-24
- Fernandez Casado, Carlos. Picadero del Club de Campo. Madrid. España. 1968. <https://www.cfcsl.com/picadero-del-club-de-campo-madrid-espana-1968/>

Fernández Troyano, Leonardo. 2005. Arquitectos e Ingenieros. Historia de una relación. *Revista de obras públicas: Órgano profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos* 3460: 41-54.

Forster, B. y Mollaert, M. Arquitectura textil. Guía europea de diseño de las estructuras superficiales tensadas.

Graefe, Rainer. 1985. Hängedächer des 19. Jahrhunderts. *Projektbereich Architektur. Geschichte des Konstruierens* 2: 70-94

Glaeser, Ludwig. 1972. The work of Frei Otto. The Museum of Modern Art. New York

Hendriks, Charlotte. 2015. The physical architectural model: the architect's most important tool. Research Methods Lecture Series

J.S. Dorton Arena. Structurae. <https://structurae.net/en/structures/j-s-dorton-arena>

Kawaguchi, Mamoru. 2011. La estructura como medio de expresión arquitectónica en pabellones deportivos. Palau Sant Jordi (Barcelona), Yoyogi Olympic Stadium (Tokio), Singapore Indoor Stadium (Kallang) y Namihaya Dome (Osaka). Conferencia presentada en el I Congreso Europeo de Infraestructuras Deportivas. Valencia

Kenzo Tange. Catálogo Artium. <http://catalogo.artium.eus/book/export/html/7728>

Labarta Aizpún, Carlos y Alfaro Lera, Jose Antonio. Proyecto, docencia e investigación: construcción y visualidad en dos cubiertas, Zaragoza, 1964

López César, Isaac R. 2012 Las Exposiciones Universales. Laboratorio de estructuras. Tesis doctoral. Departamento de Tecnología de la Construcción. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidade da Coruña

Martínez Verón, Jesús. 2016. Estación de servicio Los Enlaces. Zaragoza. Arquitectura. Siglo XX. <https://zaragozarquitecturasigloxx.com/2016/07/02/estacion-de-servicio-los-enlaces/>

McKay, Graham. 2013. *Unsung Hero: Yoshikatsu Tsuboi*. <https://misfitsarchitecture.com/2013/11/15/unsung-hero-yoshikatsu-tsuboi/>

Monjo Carrió, Juan. 1985. La arquitectura textil. *Informes de la Construcción* 36, 367 (enero-febrero): 5-30

Monjo Carrió, Juan. 1991. Introducción a la arquitectura textil. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

Mulligan, Mark. 2012. Kenzo Tange's Yoyogi Olympic Arena. https://www.youtube.com/watch?time_continue=560&v=hbeo2nvaNjA

Nárdiz Ortiz, Carlos. 2017. Entre la arquitectura y la ingeniería. Universidade da Coruña. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Fundación de la Ingeniería Civil de Galicia.

Navarro Carreto, Isabel. 2018. Estructuras Ligeras. Principios Básicos en la obra de Jörg Schlaich. Trabajo de Fin de Grado. Escola Tècnica Superior d' Arquitectura. Universitat Politècnica de Valencia.

Otto, Frei. 1954 *Das hängende Dach: Gestalt und Struktur*. Berlin: Bauwelt-Verl. Traducción castellana: 1958. *Cubiertas colgantes*. Barcelona: Labor.

Otto, Frei. The Institute for Lightweight Structures. University of Stuttgart. Soap films and tents. Experiments, models, projects and executed buildings. https://www.youtube.com/watch?v=degls4ve_Dc

Paniagua Padilla, Diego. 2016. La arquitectura tensada en la década de los 60. Trabajo de Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid.

Petroski, Henry. 2002. Dorton Arena. On the occasion of its 50th anniversary and its dedication as a National Historic Civil Engineering Landmark. *American Scientist*. 90 (november-december): 502-507

Santos Guerras, Juan José. 1990. El desarrollo de las cubiertas colgantes pesadas. *Informes de la Construcción* 41, 405 (enero-febrero): 5-18

Schmidt, W. 1973. Cubierta del Estadio Olímpico en Munich - Alemania Federal. *Informes de la Construcción* 25,248 (marzo): 49-54

Songel González, Juan María. 2005. Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente. Tesis doctoral. Departamento de Composición Arquitectónica, Escola Tècnica Superior d' Arquitectura. Universitat Politècnica de Valencia.

Sprague, Tyler. 2010. Eero Saarinen, Eduardo Catalano and the Influence of Mathew Nowicki: A Challenge to Form and Function

Tange, Kenzo. 1965. Gli Stadii olimpici a Tokio. *Domus Architettura Arredamento Arte* 424 (marzo): 2-13

Tejera Parra, Javier. 2011. Construir con membranas. *Arquitectura textil*. *Tectónica* 36: 4-19

Tres y yo. 2012. El velo sobre el parque: Cubierta del Parque Olímpico de Múnich. <https://tresiyo.com/blog/2012/08/22/el-velo-sobre-el-parque-cubierta-del-parque-olimpico-de-munich/>

V. Hassel, Joshua. 2016. Frei Otto: Spanning the Future. The evolution of tensile architecture. Documental. <https://www.youtube.com/watch?v=Gb5p0htTj4U>

Weber, Carlo. 2011. Olympiapark München. Tecnología y naturaleza, herramientas de integración urbana. Conferencia presentada en el I Congreso Europeo de Infraestructuras Deportivas. Valencia

Whitehead, Rob. 2016. Model Behavior: The Evolving Use of Physical Prototypes in Structural Shell Design, 1959-1974. Architecture Conference Proceedings and Presentations.

Yunis, Natalia. 2015. Pritzker 2015: Frei Otto y la importancia de la experimentación en la arquitectura. <https://www.archdaily.co/co/763636/pritzker-2015-frei-otto-y-la-importancia-de-la-experimentacion-en-la-arquitectura>

CRÉDITOS DE LAS IMÁGENES

Fig. 1 <https://architecturehereandthere.com/2017/07/29/crystal-palace-modernists/> (Noviembre 2019)

Fig. 2 DUNLOP, B., HECTOR, D. 3 Architectures. Lost masterpieces. London: Phaidon Press Limited, 1999. Copyright expired.

Fig. 3 © Jan Derek Sayson

Fig. 4 <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/> (Noviembre 2019)

Fig. 5 y 6 Monjo Carrió, Juan. 1991. Introducción a la arquitectura textil. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

Fig. 7 DREW, Philip. Tensile Architecture. Frogmore, St Albans: Crosby Lockwood Staples, Granada Publishing, 1979. ISBN 025897012X

Fig. 8 <https://www.perurail.com/es> (Noviembre 2019)

Fig. 9 <https://www.pinterest.es/pin/326862885441013190/>

Fig. 10 y 11 © Heinz Isler Archive

Fig. 12, 13, 14, 15, 16 Instituto de Estructuras Ligeras, Stuttgart

Fig. 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24 Ageeva, E. Yu. y Spiridonova, A.I. 2015. *ВАНТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ В ЗРЕЛИЩНЫХ ЗДАНИЯХ*. (Nizhny Novgorod, Universidad Estatal de Arquitectura e Ingeniería Civil de Nizhny Novgorod).

Fig. 25 a+ u Magazine, <https://au-magazine.com/shop/architecture-and-urbanism/au-201910/> (Noviembre, 2019)

Fig. 26 <https://culturanipon.blogspot.com/> (Noviembre 2019)

Fig. 27 <https://culturanipon.blogspot.com/> (Noviembre 2019)

Fig. 28 y 29 <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com/2008/08/gimnasio-nacional-de-tokio-kenzo-tange.html> (Noviembre 2019)

Fig. 30, 32, 33, 34 y 35 <https://culturanipon.blogspot.com/> (Noviembre 2019)

Fig. 36, 37, 38 a+ u Magazine, <https://au-magazine.com/shop/architecture-and-urbanism/au-201910/> (Noviembre, 2019)

Fig. 39, 40 y 41 <https://culturanipon.blogspot.com/> (Noviembre 2019)

Fig. 42 <http://www.behnisch-partner.de/projects/sports-facilities/olympia-park-munich>

Fig. 43 Nils Gore, <https://www.flickr.com/photos/mistersmed/albums/72157604376851829/with/2385585783/> (Noviembre 2019)

Fig. 44 <http://www.behnisch-partner.de/projects/sports-facilities/olympia-park-munich>

Fig. 45 Instituto de Estructuras Ligeras, Stuttgart

Fig. 46 y 47 Nils Gore, <https://www.flickr.com/photos/mistersmed/albums/72157604376851829/with/2385585783/> (Noviembre 2019)

Fig. 48 <http://www.behnisch-partner.de/projects/sports-facilities/olympia-park-munich>

Fig. 49 Nils Gore, <https://www.flickr.com/photos/mistersmed/albums/72157604376851829/with/2385585783/> (Noviembre 2019)

Fig. 50,51, 52, 53, 54, 55, 56 Schmidt, W. 1973. Cubierta del Estadio Olímpico en Munich - Alemania Federal. Informes de la Construcción 25,248 (marzo): 49-54

Fig. 57 Nils Gore, <https://www.flickr.com/photos/mistersmed/albums/72157604376851829/with/2385585783/> (Noviembre 2019)

Fig. 58 Schmidt, W. 1973. Cubierta del Estadio Olímpico en Munich - Alemania Federal. Informes de la Construcción 25,248 (marzo): 49-54

Fig. 59 © Evonik Industries AG, Konzernarchiv Hanau <https://www.world-of-plexiglas.com/es/estadio-olimpico-munich-plexiglas-carpa/> (Noviembre 2019)

Fig. 60 y 61 Carlos Fernandez Casado <https://www.cfcsl.com/picadero-del-club-de-campo-madrid-espana-1968/> (Noviembre 2019)

Fig. 62, 63, 64, 65, 66, 67 y 68 <http://jdeyarza.archivosarquitectos.com/es/original/> (Noviembre 2019)