

# ESTRUCTURAS LIGERAS PRINCIPIOS BÁSICOS EN LA OBRA DE JÖRG SCHLAICH

**Autora**

Isabel Navarro Carreto

**Tutor**

Juan María Songel González  
IDepartamento de Composición arquitectónica

**Titulación**

Grado en Fundamentos Arquitectónicos



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Octubre 2018

# ESTRUCTURAS LIGERAS **PRINCIPIOS BÁSICOS EN LA OBRA DE JÖRG SCHLAICH**

TRABAJO FIN DE GRADO

Octubre 2018



*“El objetivo último del diseño estructural es proporcionar la expresión estética adecuada para la solución técnica más perfecta y eficiente”*

J. Schlaich

## Resumen

En la segunda mitad del siglo XX, las estructuras ligeras han experimentado un avance significativo con la obra y la aportación del ingeniero de estructuras Jörg Schlaich, que, siguiendo la tradición de los grandes ingenieros en la búsqueda de una relación eficaz entre forma y estructura, ha diseñado obras de una gran belleza formal, que pueden ser muy inspiradoras para la arquitectura contemporánea.

A partir de algunas de estas obras, se estudiarán los métodos y principios utilizados por Schlaich, mediante los cuales ha llegado a tan novedosas soluciones estructurales, en las que se avanza en la aspiración a resistir más con menos material.

## Palabras clave

Jörg Schlaich, estructuras ligeras, membranas, cáscaras de hormigón

---

## Abstract

In the second half of the twentieth century, light structures have experienced a significant advance with the work and the contribution of the structural engineer Jörg Schlaich, who, following the tradition of the great engineers in the search for an effective relationship between form and structure, has designed works of great formal beauty, which can be very inspiring for contemporary architecture.

Starting from some of his works, Schlaich's methods and principles will be studied. He reached through them very innovative structural solutions, which are a step forward in the strive to resist more with less material.

## Keywords

Jörg Schlaich, lightweight structures, membranes, concrete shells

---

## Resum

En la segona meitat del segle XX, les estructures lleugeres han experimentat un avanç significatiu amb l'obra i l'aportació de l'enginyer d'estructures Jörg Schlaich, que, seguint la tradició dels grans enginyers en la cerca d'una relació eficaç entre forma i estructura, ha dissenyat obres d'una gran bellesa formal, que poden ser molt inspiradores per a l'arquitectura contemporània.

A partir d'algunes d'aquestes obres, s'estudiaran els mètodes i principis utilitzats per \*Schlaich, mitjançant els quals ha arribat a tan noves solucions estructurals, en les quals s'avança en l'aspiració a resistir més amb menys material

## Paraules clau

Jörg Schlaich, estructures lleugeres, membranes, corfes de formigó

# ÍNDICE

---

<b>1</b>	Introducción	
	1.1 Descripción del trabajo .....	5
	1.2 Metodología .....	6
	1.3 Objetivos.....	7
<b>2</b>	Principios teóricos	
	2.1 Qué y cuáles son las estructuras ligeras...8	
	2.2 Historia y evolución de las estructuras ligeras .....	13
	2.3 Ventajas de las estructuras ligeras .....	19
	2.4 Jorg Schlaich.....	20
	2.5 Los principios de las estructuras ligeras por Jorg Schlaich.....	21
<b>3</b>	Aplicaciones prácticas	
	3.1 Estructuras de redes de cables.....	30
	• Cubierta del Estadio Olímpico de Múnich.....	31
	3.2 Estructuras de cáscara de celosía.....	41
	• Cubierta del Banco DZ en Berlín.....	43
	3.3 Tenso estructuras cable-membrana.....	50
	• Cubierta del Mercedes Arena de Stuttgart.....	52
<b>4</b>	Diálogo ingeniero-arquitecto.....	58
<b>5</b>	Conclusiones.....	59
<b>6</b>	Citas .....	61
<b>7</b>	Bibliografía.....	62

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Descripción del trabajo

Desde muy pronto, los seres humanos empezamos a construir cosas. La arquitectura ha sufrido una espectacular transformación desde sus inicios, la cuál ha sido posible mediante la investigación y la experimentación con nuevos materiales y nuevas técnicas constructivas, además del estudio de las leyes físicas de la naturaleza que nos han permitido hacer grandes avances en esta materia.

Las necesidades de los seres humanos han ido cambiando y para ello arquitectos e ingenieros tienen el deber de desarrollar nuevas técnicas estructurales que puedan cubrir estas nuevas necesidades.

A principios del pasado siglo, una reciente preocupación por buscar la ligereza inundó los pensamientos de los profesionales del sector. Desde ese momento esta búsqueda ha sido incansable y múltiples innovaciones han ido apareciendo.

A la búsqueda de la ligereza, se le unía la preocupación por cuidar el medio ambiente; mediante la optimización de los materiales, la posible reutilización de éstos y el uso de energías renovables.

Un buen ejemplo, pionero en el desarrollo de éste nuevo método estructural es Jörg Schlaich , que tras años de experimentación ha llegado a la redacción de una serie de principios que deben cumplir las estructuras para que se las pueda considerar ligeras.

El presente trabajo se ha desarrollado realizando un análisis exhaustivo del trabajo y obra del ingeniero de estructuras Jörg Schlaich , desde sus inicios hasta el día de hoy para explicar todos los grandes avances que ha realizado en materia de encontrar una relación eficaz entre forma y estructura de un edificio, deduciendo de éstos una serie de principios que son los que vamos a explicar detenidamente en éste documento.

Posteriormente se va a desarrollar un análisis desde el punto de vista de la relación entre la forma y la estructura, constructivo y de relación con el entorno, de una serie de obras en las cuales ha participado Jörg Schlaich y en ellas podemos discernir los principios para estructuras ligeras que en apartado anterior hemos desarrollado.

Y éste va a ser el tema del siguiente trabajo, profundizar en el análisis de estos principios y verlos aplicados en algunas de las obras de Schlaich.



## 1.2 Metodología

La metodología a utilizar en este proyecto ha sido, en primer lugar, la búsqueda de información acerca del tema en artículos, revistas especializadas y estudios previos, así como toda la información relacionada con el tema que encontramos en internet. Además, se efectuó una investigación bibliográfica para conocer qué libros se habían publicado sobre la materia y cuáles podrían resultar útiles para este proyecto.

Ésta búsqueda de información fue laboriosa ya que la mayoría de ella se encuentra en alemán o inglés, por lo que hubo un largo trabajo de traducción, ya que nos encontrábamos con numeroso vocabulario técnico.

Posteriormente, se produjo una selección de la información, contrastando todas las fuentes de las que se extrajese, en especial las de Internet, y descartando aquellas poco fiables. Los datos se contrastaron en todos los lugares donde se pudiesen encontrar para comprobar que coincidiesen y que no existiesen discrepancias. En definitiva, se procesó y filtró toda la información obtenida.

Con todo ello se comenzó la redacción del proyecto. Durante su realización se presentaban nuevas incógnitas, por lo que la búsqueda y procesamiento de la información se produjo a lo largo de todo el proceso.

Una vez terminado el cuerpo central del proyecto se efectuó una exhaustiva revisión y corrección. De igual modo, este proceso se realizó de manera continua buscando en todo momento la mejora del mismo.

Por último se maduraron las conclusiones obtenidas tras su realización y se cuidaron todos los aspectos formales del proyecto tratando de ser consecuente con las pautas marcadas para su confección.

## 1.3 Objetivos

- Explicar los **principios y métodos** mediante los cuales Jörg Schlaich ha llegado a novedosas soluciones estructurales
- **Dar a conocer el trabajo** de ingenieros estructurales como Jörg Schlaich, que muchas veces queda opacado tras el nombre de los arquitectos junto con los que trabaja.
- **Presentar las ventajas** de construir estructuras ligeras en la actualidad
- **Analizar** desde diferentes puntos de vista varios proyectos emblemáticos en los que ha participado Jörg Schlaich
- **Conocer** nuevas técnicas y materialidades de la construcción de las nuevas estructuras hoy en día.

## 2. PRINCIPIOS TEÓRICOS

### 2.1 ¿Qué y cuáles son las estructuras ligeras?

Toda estructura diseñada de una manera inteligente y responsable aspira a ser " lo más ligera posible", por lo que podríamos decir que una estructura es más ligera cuanto menor es la relación de su propio peso con la carga de trabajo que soporta. Frei Otto, pionero en este tipo de estructuras, define de forma sintetizada el principio de construcción ligera como el modo de construir con un consumo mínimo de medios: materiales, energéticos y económicos <sup>1</sup>.

Reconocemos por primera vez que un puente colgante soportado por cuerdas anudadas es claramente más ligero que un puente metálico de celosía , y que a su vez es más ligero que un puente hecho de vigas de hormigón armado. Lo que de inmediato genera la pregunta de: ¿ por qué no construimos más puentes colgantes cuando, de hecho, son muy pocos y solo se utilizan para grandes luces? . Esta idea nos ayuda a comprender que la demanda de ligereza no puede ser el único criterio al diseñar estructuras.

Podemos afirmar así que las estructuras ligeras tienen dos archi-enemigos: cargas naturales y los altos salarios de hoy en día <sup>2</sup>. Las estructuras ligeras son propensas a una gran deformación por la nieve y los cambios de temperatura, son sensibles a la vibración inducida por el viento, lo que puede dañarlas (el trauma del Tacoma de los ingenieros civiles)<sup>3</sup> y pueden hacer frente fácilmente a los terremotos. Si bien es posible contrarrestar tales ataques naturales mediante el desarrollo de formas ingeniosas y arriostramiento inteligente, difícilmente tenemos una oportunidad contra los altos salarios de hoy en día y nuestra actitud descuidada hacia los recursos naturales, que favorece la cantidad y rechaza la calidad en nuestra sociedad materialista.

Las estructuras ligeras, por supuesto, no se limitan a la construcción de puentes y cubiertas de grandes luces ; los mismos principios también se pueden usar para fachadas, pabellones de exposición, etc. Ya que como en principio son más costosas, las estructuras livianas pueden calificarse fácilmente como elitistas, parece que solo grandes empresas pueden afrontar estos gastos, pero están fuera de alcance cuando se trata de bajar a escala de vivienda, comercio o zonas industriales.

Los ingenieros y arquitectos disfrutan trabajando en el elitismo que es totalmente opuesto al espíritu de los pioneros de estructuras livianas, como Buckminster Fuller, Konrad Wachsmann, Wladimir Suhov, Max Mengerlinghausen y Frei Otto. Los ingenieros y arquitectos de hoy en día persiguen el exhibicionismo constructivo, sin notar que el 98 por ciento de lo que se construye a su alrededor se beneficiaría enormemente de su atención, y que, por lo tanto, hay un aspecto profundamente antisocial en sus actividades.

Por tanto lo que necesita nuestra sociedad son modestas, sensibles, eficientes, pero también afrontables, **estructuras ligeras.**

Dentro del mundo de las estructuras ligeras podemos encontrar muchos tipos diferentes pero que tienen una característica en común y es que se trata de sistemas estructurales de forma activa, y en el caso de estructuras ligeras de membrana, de superficie activa. Se trata de sistemas portantes de material flexible, no rígido, en los que la transmisión de cargas se efectúa a través de una forma adecuada y una estabilización de la forma característica. El estado de tensiones es sencillo, ya que los componentes básicos de la estructura solo están sometidos a esfuerzos normales: a compresión o a tracción.

El pilar vertical y el cable suspendido en vertical son los prototipos de los sistemas de forma activa. Uniendo dos cables suspendidos en diferentes puntos se obtiene un cable portante que, además de soportar su propio peso, puede transmitir cargas lateralmente a través de esfuerzos de tracción. La forma inversa del cable portante es el arco funicular para una carga determinada es la línea de suspensión correspondiente a dicha carga.

Por tanto, la característica principal de los sistemas estructurales de forma activa es que desvían las fuerzas exteriores a través de fuerzas normales: el arco funicular mediante compresión y el cable suspendido mediante tracción.

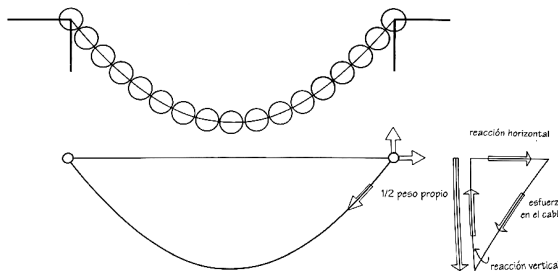


Fig. 1 Mecanismo portante del cable portante

### Cable portante

El cable portante sólo puede absorber tracciones. Si sólo actúa su peso propio, adopta la forma de una catenaria.

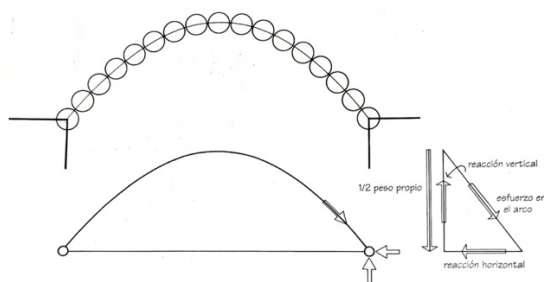


Fig. 2 Mecanismo portante del arco funicular

### Arco funicular

El cable portante invertido sólo absorbe compresiones de la misma magnitud que el cable portante. La línea que adopta un arco que sólo ha de soportar su propio peso es, una catenaria

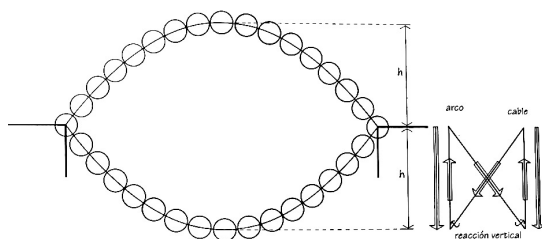


Fig. 3 Mecanismo portante del arco funicular

### Combinación cable portante y arco funicular

La combinación de ambos no provoca ninguna reacción horizontal, ya que las componentes horizontales de ambos son opuestas y se equilibran entre sí.



A través de la aplicación de estos principios estructurales, de su combinación o su variación se consiguen infinidad de estructuras diferentes.

Por lo tanto debemos hacer una diferenciación importante entre estructuras ligeras que trabajan a tracción y a compresión, ya que no funcionan de la misma manera. Las que trabajan a tracción tienen un mejor comportamiento frente a grandes luces sin el problema del pandeo, cosa que empeora en las estructuras a compresión. Dependiendo de las dimensiones y características del proyecto que queramos realizar deberemos adoptar la solución constructiva más apropiada.

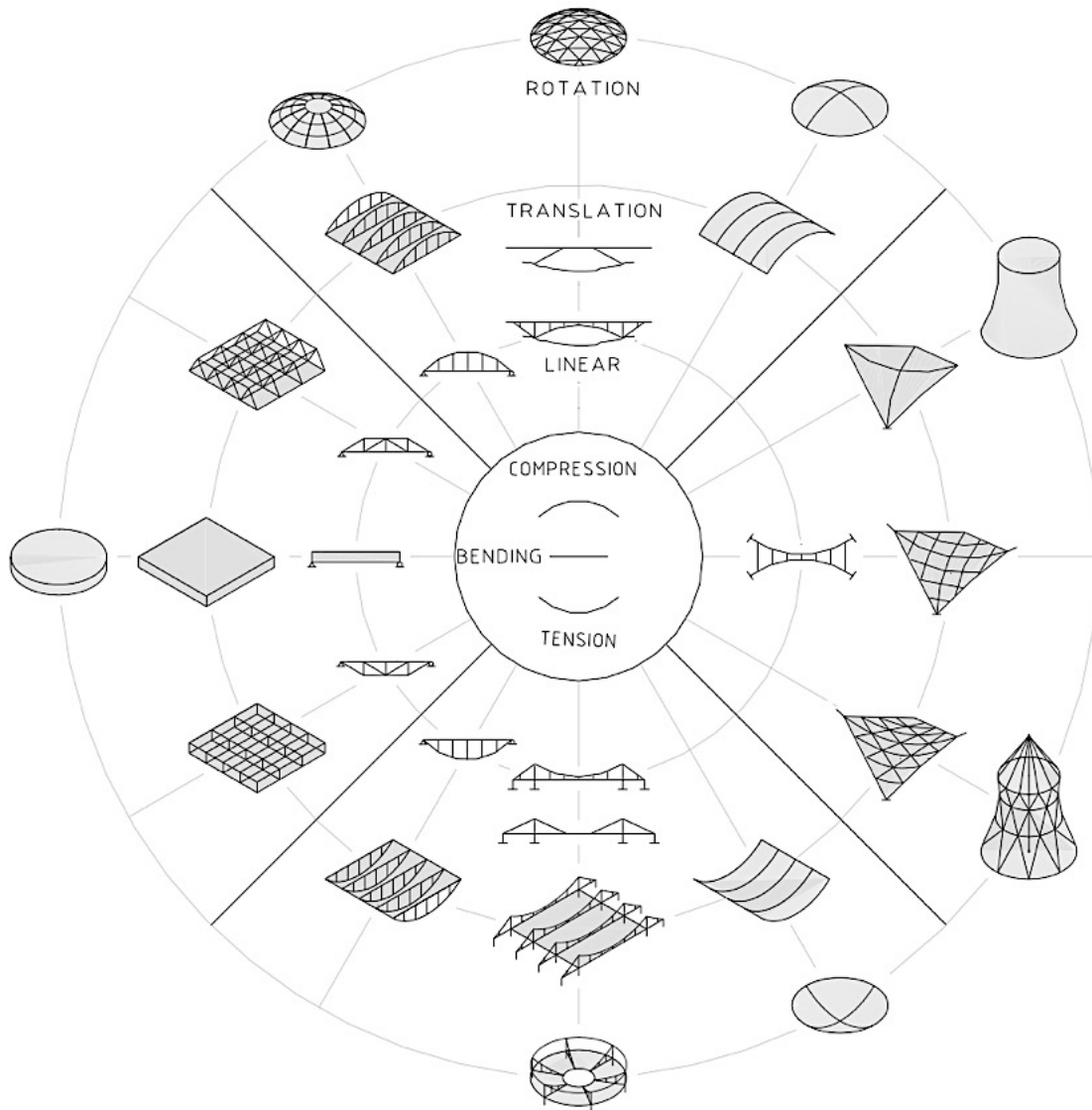


Fig. 4 Esquema de clasificación de estructuras, diferenciando las que trabajan a compresión y tracción elaborado por Jörg Schlaich <sup>4</sup>

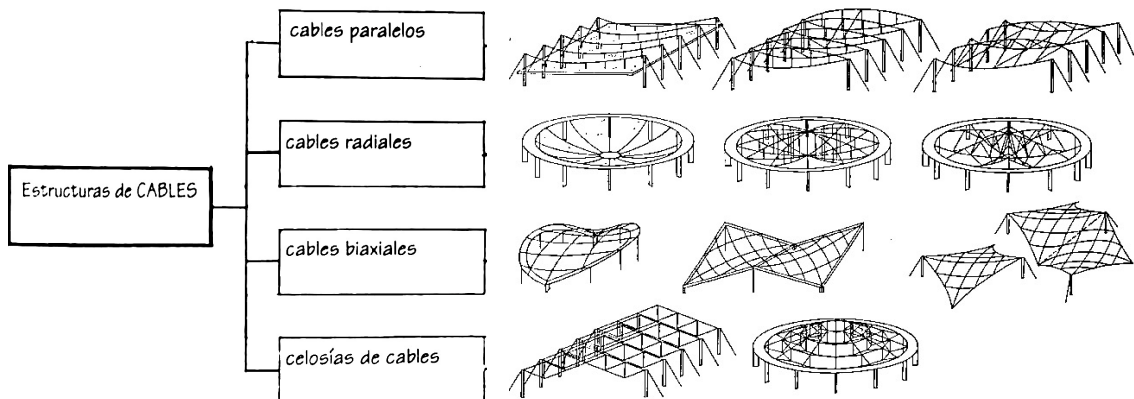
A continuación encontraremos una clasificación más exhaustiva de las diferentes estructuras ligeras y su forma de trabajar realizada por Heino Engel <sup>5</sup>:

## TRACCIÓN

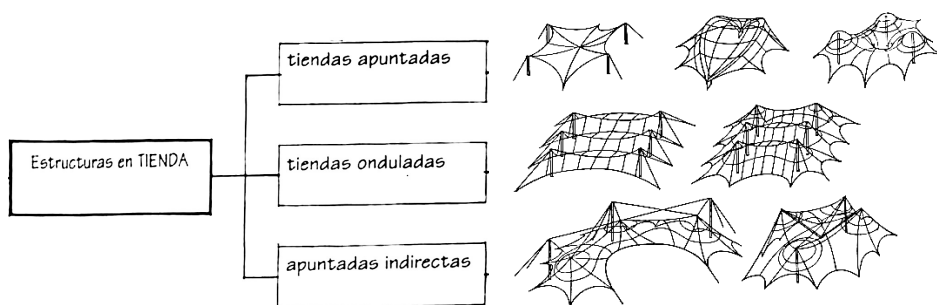
### SISTEMAS ESTRUCTURALES DE FORMA ACTIVA

Las estructuras de cable son especialmente apropiadas para cubiertas de grandes luces con materiales livianos donde el elemento principal es el cable y el esfuerzo predominante es el de tracción. Algunas de sus características son:

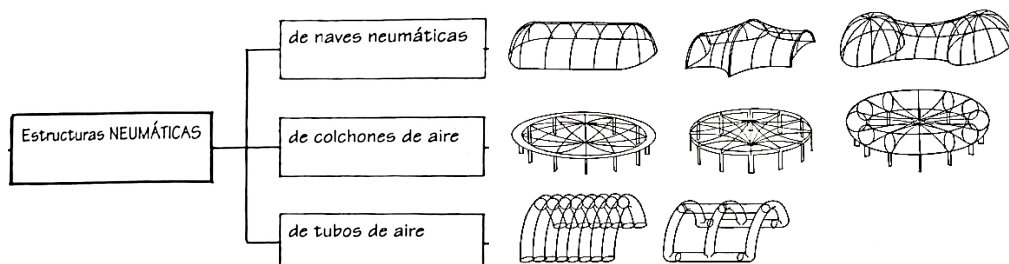
- La forma responde a las cargas
- Carecen de rigidez transversal
- No son una estructura auto portante, necesitan de estructuras auxiliares que sostengan los cables



Las estructuras en tienda son soluciones estructurales livianas y flexibles, que trabajan a flexión, con posibilidad de adaptar su forma al funicular de las cargas externas. La cubierta más sencilla es la calificada como "de cuatro puntos"



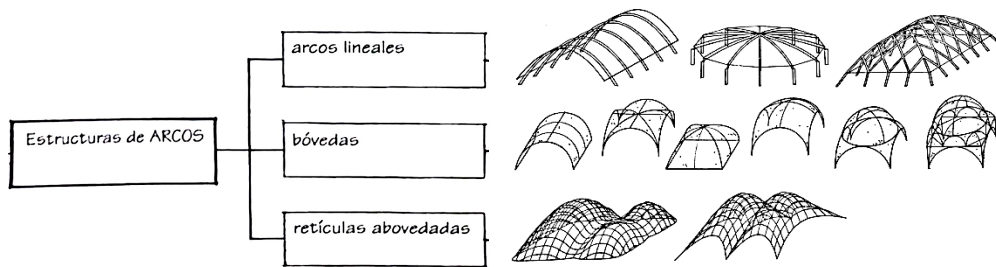
Las estructuras neumáticas se tratan de un volumen de aire encerrado en una envoltura flexible resistente a tracciones que se comporta como un sólido homogéneo y elástico. Pueden absorber, transmitir y trasladar fuerzas exteriores.



## COMPRESIÓN

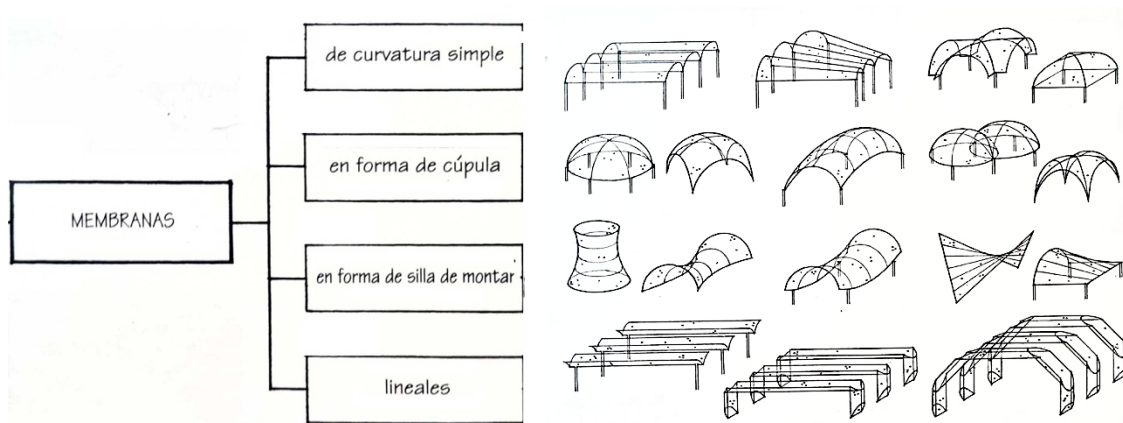
El arco es una estructura que trabaja a compresión, que se usa para cubrir superficies grandes y pequeñas empleando la mínima cantidad de material posible. Algunas de sus características:

- Generan fuerzas horizontales en los apoyos que deben ser absorbidas mediante tensores
- La línea de presiones está asociada a un estado de cargas, el eje del arco coincidirá con dicho estado de cargas. Cualquier variación en la carga, modificará la forma del arco.



## SISTEMAS ESTRUCTURALES DE SUPERFICIE ACTIVA

Los sistemas estructurales de superficie activa son sistemas de superficies flexibles que, a pesar de no resistir flexiones, resisten esfuerzos cortantes, de tracción y compresión en los que la redirección de las fuerzas se realiza mediante la resistencia de las superficie y su forma adecuada.



## 2.2 Historia y evolución de las estructuras ligeras

Los inicios de las estructuras ligeras surgen en la segunda década del siglo XX , con lo que podemos definir como la "aventura laminar", en la que se buscaba la más resistente y esbelta forma laminar, experimentando con las múltiples posibilidades que el nuevo material, el hormigón, ofrecía.

Las "Thin Concrete Shells", como son internacionalmente conocidas, son un conjunto resistente y esbelto de formas espaciales construidas en hormigón armado y/o pretensado, en las que el espacio está definido por la propia forma de la estructura laminar.

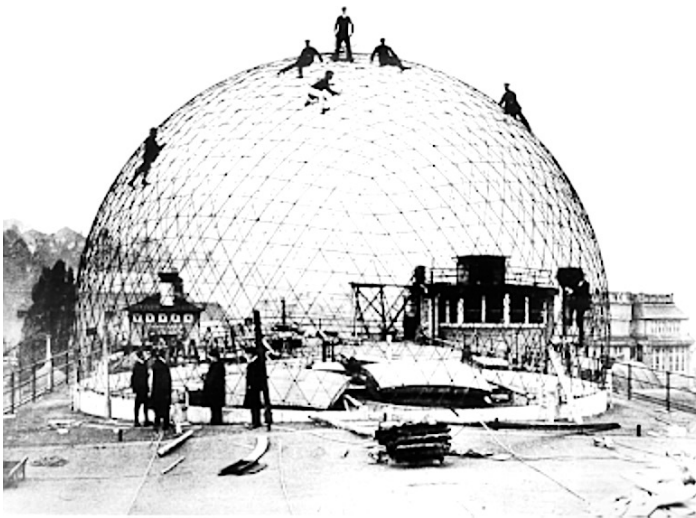


Fig. 5. Primera "Thin concrete Shell" en Jena (Alemania)  
Dyckerhoff-Widmann (1922-1923).

Ésta aventura laminar, que duró hasta los años 70, fue llevada a cabo por numerosos protagonistas, que influyeron de diferentes maneras en el desarrollo de éstas estructuras. Algunos fueron constructores de las cáscaras que actualmente forman parte del Patrimonio Histórico de nuestras ciudades, otros crearon nuevos métodos de cálculo , otros racionalizaron los procesos de construcción o patentaron las primeras piezas laminares prefabricadas. Entre todos ellos hicieron de las Estructuras Laminares uno de los hitos de la arquitectura del siglo XX. Algunos de estos reconocidos nombres fueron; Robert Maillart ( 1872-1940), Eugéne Freyssinet ( 1879-1962), Eduardo Torroja ( 1899-1961) o Félix Candela ( 1910-1997) entre muchos otros.



Fig. 6 Cubierta del mercado de Algeciras,  
Eduardo Torroja (1934)

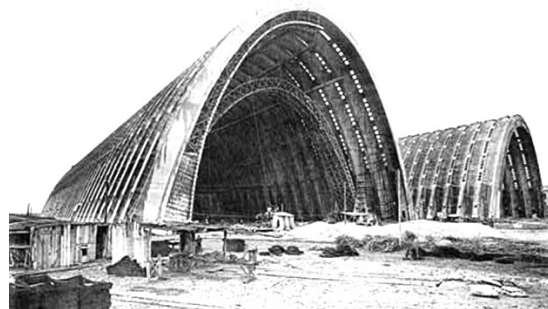


Fig. 7 Hangares de Orly ( París), Eugene Freisyinet (1923)



Con ésta nueva técnica lograron una máxima luz libre de 280 m entre apoyos mediante una estructura laminar de hormigón armado y doble hoja en el CNIT de París, frente a los 43 m de diámetro de la cúpula del Panteón de Agripa en Roma, que es la máxima luz alcanzada con las técnicas antiguas.



Fig. 8. Panteón de Agripa, Roma ( Años 118 y 125 d.C )



Fig. 9 Edificio CNIT en París (1958 )

### Félix Candela [6](#)

En poco tiempo Félix Candela se convirtió en uno de los grandes protagonistas de esta historia. Sus cascarones no sobrepasaron nunca los 30 m , pero usó una sola lámina, con bordes libres y con un grosor que pocas veces excedía los 4 cm. La base de su éxito se basaba en la utilización en la mayor parte de sus obras de la misma forma geométrica, el paraboloides hiperbólico [7](#).

Para él la mejor forma de aprender y estar capacitado para construir estas conchas, era la experimentación directa, construyendo modelos, a escala real, tal y como se hacía en la antigüedad, y es así como adquirió su autoaprendizaje.



Fig. 10 Modelo experimental: Bóveda Ctesiphon, San Bartolo, México (1049)



Fig. 11 Modelo experimental: conoide en la Fábrica de Fernández, San Bartolo, México (1950)



Fig. 12 Modelo experimental: Paraguas, Las Aduanas, México (1953)

La relevancia de su obra residía en que él mismo tenía capacidad para actuar como arquitecto, ingeniero y constructor , como se llamaría en la época medieval “un maestro de obras”

En 1963 la “ Internacional Association for Structural Shells ( IASS) “ fundada por Eduardo Torroja en 1959 en Madrid lo nombró junto a Pier Luigi Nervi, socio de honor por sus numerosas y relevantes aportaciones al desarrollo de las Estructuras laminares.



Fig. 13 Restaurante Los Manantiales, Félix Candela, Xochimilco, México (1958)



Fig. 14 Iglesia de San José Obrero, Félix Candela, Monterrey, México ( 1959)

## El desvanecimiento de las cáscaras de hormigón

A finales de los años sesenta, ya se había conocido todo acerca de las estructuras laminares. Nuevos tipos de estructuras empezaron a aparecer de forma paulatina junto con nuevos materiales. Fue por esto que el IASS decidió cambiar su nombre en 1970 bajo las mismas siglas a “ International Association for Shell and Spatial Structures” .

Las cáscaras de hormigón dejaron de construirse y estos pueden ser algunos de los motivos [8](#):

- 1) Requerían un alto presupuesto  
La mano de obra cualificada y los complicados encofrados, hacía que los cascarones fueran un elemento caro de construir, que no todos podían permitirse.
- 2) Vuelta a las formas poligonales  
Tras la libertad de formas curvas que ofrecían las estructuras laminares, se volvió a las líneas rectas y las cajas de la arquitectura Moderna
- 3) Difíciles de usar  
A la hora de colocar tabiques, instalaciones, ventanas, mobiliario etc. Las formas curvas no son prácticas y resultan mucho más complejas de adaptar.
- 4) Falta de luz natural  
Los cascarones son figuras opacas que difícilmente se puede abrir ventanas en ellas, por lo que se convierten en espacios oscuros
- 5) No se adaptan a las necesidades actuales  
Las estructuras laminares no cumplen con el requisito de aislar térmicamente, por lo que para que cumplieran habría que revestirlas con material aislante , lo que anularía su aspecto de lámina delgada.
- 6) Falta de normativa  
Los cascarones fueron estructuras que nunca estuvieron contempladas en la normativa de edificación, lo que dificultó mucho su desarrollo
- 7) Formas difíciles de analizar  
Las complicadas formas que adoptaban los cascarones eran difícilmente calculadas a mano, lo que no las dotaba de precisión y estaban expuestas a errores y fallos técnicos.
- 8) No eran útiles para grandes luces  
Apenas fueron utilizadas para grandes edificios, se usaban para construcciones de pequeña escala

## Las láminas de cerámica armada

Eladio Dieste (Uruguay, 1917-2000) surge como el último de los gigantes de las bóvedas del pasado siglo. Su gran aportación fue el uso del ladrillo de una manera única, como nunca antes se había hecho.

Su obra, no muy conocida en España hasta hace poco, da una lección de delicadeza en el diseño además de una brillante economía de medios y resultado.

Las cubiertas de grandes luces y gran espesor de cerámica armada basan su concepto en los principios de arcos y funiculares. La cerámica armada nace de aliar la técnica del hormigón armado y el molde móvil para construir cáscaras. Su puesta en obra está caracterizada por las siguientes ideas básicas [2](#):

- La utilización de la forma catenaria en todas las secciones transversales de la bóveda;
- La utilización de mampuestos cerámicos de pequeñas dimensiones (ladrillos)
- La disposición de armaduras entre las juntas, transversales y longitudinales, de los ladrillos;
- Unos desencofrados en cuestión de horas
- La utilización de un molde móvil de pequeña longitud, desplazable según el eje longitudinal de la bóveda;
- Utilización de mano de obra local.

Las ventajas que ofrecía este método frente a las cubiertas de hormigón armado eran varias [10](#):

- El ladrillo ofrece una alta resistencia mecánica ( algunos unos 1.500 kg/cm<sup>2</sup>), resistencias que igualan o superan a los mejores hormigones, con un precio muy inferior.
- La liviandad de los mampuestos de tierra cocida es inalcanzable con el hormigón o cemento
- Tienen un módulo de elasticidad mucho menor, lo que da a las estructuras una mayor adaptabilidad a las deformaciones.
- Buen envejecimiento con el mínimo mantenimiento
- Buen aislante térmico y acústico
- Al existir muy poco mortero de relleno, disminuye enormemente el tiempo de ejecución, ya que se puede desencofrar en sólo 14 horas.

La colocación tradicional de los ladrillos en un determinado aparejo, desaparece totalmente en la arquitectura de Dieste, ya que le añade un nuevo componente, el acero. Para ello dispone las piezas sin contrapear ni aparejar, lo que genera una red de pizas, donde poder colocar el acero, que incorpora de manera regular en todo el conjunto de la fábrica. Todo esto le permite crear la llamada "Cerámica estructural", donde varía la cantidad de armado dependiendo de la ductilidad que desee en cada proyecto.

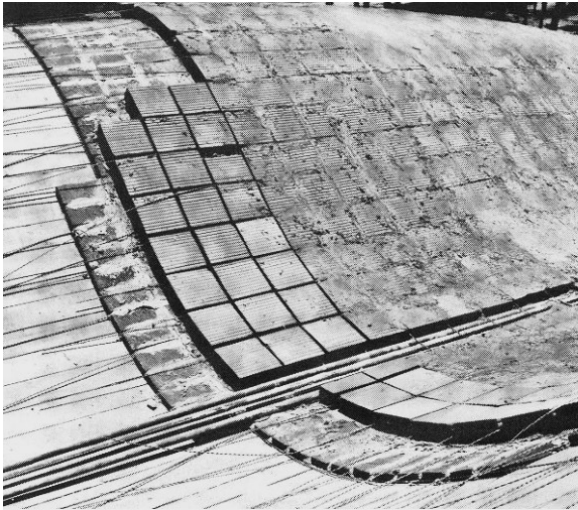


Fig. 15. Construcción de la cubierta ondulada de la Iglesia de la Atlántida con las piezas en retícula y el armado homogéneo, dejando un espacio para incorporar el armado del tirante.

Las bóvedas Gausas fueron otra de las invenciones de de Dieste, cuyas formas, características estructurales y técnicas constructivas están ampliamente expuestas en sus publicaciones y fueron un fenómeno en el mundo de la arquitectura y la ingeniería.



Fig. 16,17 Y 18. Sección de bóvedas Gausas, aspecto exterior e interior de una nave en Montevideo.

Su obra es muy extensa en Uruguay, aunque también se puede encontrar algunas de sus creaciones en Brasil o España. Hoy en día adquiere tanto valor que toda la obra de Dieste al completo quiere ser reconocida Patrimonio Mundial por la UNESCO.

Dieste realizó decenas de obras en en ámbitos rurales y urbanos: iglesias, viviendas, gimnasios, fábricas, silos, terminales de bus, y más. Entre otras se destacan la Parroquia Cristo Obrero de Estación Atlántida y la Parroquia San Pedro de Durazno. Algunas como el Centro Deportivo Municipal Carolino, la Torre de Telecomunicaciones y la Casa Berlingieri, en Maldonado, fueron declaradas Monumento Histórico Nacional.



Fig. 19. Parroquia Cristo Obrero de Estación Atlántida (1960) Fig. 20 Terminal de ómnibus (1973)



## La aparición de las estructuras ligeras traccionadas y las cáscaras de celosía

El nombre Frei Otto [11](#) tuvo mucho que ver en ésta nueva era de estructuras. El primer edificio que podemos incluir en este grupo fue su Pabellón Alemán para la Expo de Montreal en 1967. Se trataba de un edificio cuyas formas no se habían visto nunca antes, estaba compuesto por mallas de cables recubiertas de membranas, y simulaban formas parecidas a las de una tienda de campaña. Su principal diferencia respecto a las cáscaras de hormigón es que se trataba de estructuras muy rígidas que lograban esa estabilidad mediante la combinación de un alto grado de pretensado con la doble curvatura, además que eran mucho más ligeras que éstas.

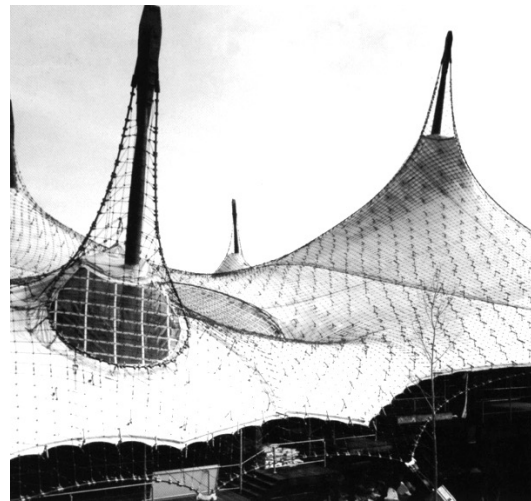


Fig. 21 y 22. Imágenes del Pabellón Alemán para la Expo del 67 en Montreal, Frei Otto.

Desde entonces nuevas tendencias aparecieron en el panorama estructural:

- Cubiertas de membrana para vanos muy amplios, con una estructura de acero mínima
- Cascarones transparentes, compuestos de entramados metálicos acristalados

Debido a la abundancia actual de opciones para la construcción de estructuras ligeras, los cascarones vuelven a estar de moda ya que en la arquitectura contemporánea existe una tendencia hacia las formas naturales.

En paralelo a esta evolución, los gráficos en 3D generados por ordenador han abierto las puertas a proyectos más complicados, a estructuras virtuales que resultan muy convincentes en la pantalla del ordenador pero que no siempre pueden construirse. Es por esto que para todas las futuras estructuras complejas y de calidad necesitamos maestros de obra, ingenieros que sepan de arquitectura y arquitectos con una buena formación y un conocimiento profundo de cómo trabajan las estructuras. Entonces podremos tener grandes esperanzas.

## 2.3 Las ventajas de la construcción de estructuras ligeras

Pese a las dificultades que conllevan este tipo de estructuras, nunca han sido más necesarias que hoy en día por diversos motivos [12](#):

- **Ecológicamente:** éste tipo de edificios requiere mucho menos gasto de material, ya que lo que pretenden es aprovechar al máximo sus resistencias y no desperdiciar los recursos naturales. Además las estructuras livianas pueden desmontarse y reciclarse los elementos, lo que fomentan el desarrollo sostenible y velan por nuestro futuro.
- **Socialmente:** este tipo de estructuras requieren una mano de obra especializada, que cuide los detalles, es un trabajo casi artesano que prima la calidad a la cantidad, por lo que genera mucho más empleo .
- **Culturalmente:** este tipo de edificios pueden hacer grandes contribuciones para enriquecer el panorama arquitectónico. Son construcciones con una estructura muy expuesta que hace visible el flujo de fuerzas y que observadores más o menos cualificados pueden entender fácilmente. Tienen una actitud positiva hacia la tecnología y la innovación, lo que lleva a ingenieros y arquitectos a huir de la monotonía y puedan volver a la experimentación constante para conseguir nuevas soluciones.
- **Estéticamente:** las estructuras ligeras son transparentes y muestran el flujo de fuerzas de forma natural. En general a la personas nos gusta lo que comprendemos. También preferimos la ligereza, ya que la asociamos a la elegancia , además de que este tipo de estructuras no tapan por completo nuestra visión y nos sentimos menos amenazados



Fig. 23 y 24 . Cubierta del palacio de Comunicaciones de Madrid ( 2009)

## 2.4 Jörg Schlaich

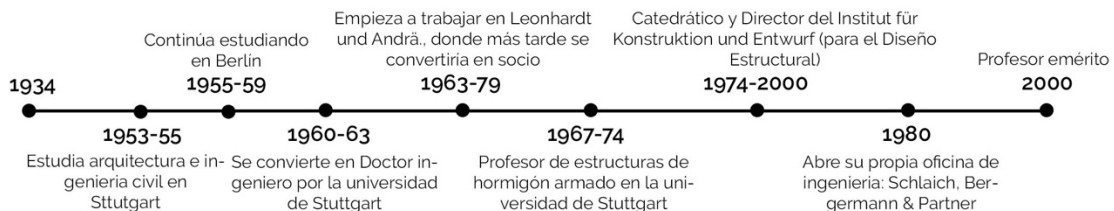


# JÖRG SCHLAICH

octubre de 1934 - actualidad  
Kernen y Rempsal (Alemania)

Jörg Schlaich es un ingeniero estructural alemán y es conocido internacionalmente por su trabajo pionero en el diseño creativo de puentes, techos de gran luz y otras estructuras complejas.

### TRAYECTORIA PROFESIONAL [13](#)



### METODOLOGÍA

La manera de enseñar y trabajar de Jörg Schlaich no era la tradicional, para él el diseño y el proceso de diseño son los elementos más importantes. Por ello, a la hora de empezar un proyecto comienza con la comprensión de la estructura. No se trata simplemente de un marco para transferir cargas de una manera u otra, sino que la estructura es un material unido que debe cumplir una serie de funciones y que contribuye sustancialmente a la expresión formal del todo. Como la estructura y la forma representan lados diferentes del mismo sujeto, deben complementarse entre sí. Esto no era algo habitual en los ingenieros, ya que para ellos forma y función no iban de la mano.

De esta manera, la estructura se explica y se evalúa en todos sus aspectos obvios: carga, comportamiento y diseño, funcionalidad, construcción de naturaleza económica, es decir, se entiende como parte de una unidad global.

### OBRA

En su obra en España, caben destacar obras significativas como el monumento homenaje a las víctimas del atentado terrorista del 11-M en Madrid, la cubierta del Estadio Olímpico de Sevilla, la cubierta móvil de la plaza de toros de Zaragoza, la cubierta de la plaza de toros de Vista Alegre, la cubierta del Palacio de Comunicaciones de Madrid o la cubierta y la fachada de cristal del complejo Príncipe Pío en Madrid.

A nivel internacional destacan, entre otras grandes obras de Schlaich, la gran cubierta de los Juegos Olímpicos de Múnich, la cubierta retráctil del Estadio Olímpico de Montreal, las cubiertas del Museo de la Tolerancia de Jerusalén, la estación de tren Spandau en Berlín, el puente Ting Kau en Hong Kong y el puente Dubai Creek Crossing, en Dubai.

## 2.5 Los principios de las estructuras ligeras por Jörg Schlaich <sup>14</sup>

Tras años de experimentación y de investigación en el ámbito de las estructuras ligeras Jörg Schlaich llega a una serie de reglas que según él debe seguir cualquier estructura para poder considerarla ligera:

### 1- La escala

Para los ingenieros y arquitectos, conseguir grandes luces sin apoyos siempre ha sido una de sus grandes metas, sin embargo es importante saber que cuanto mayor es la luz que nuestra estructura debe cubrir, también mayor será su grosor y por tanto su peso propio ( uno de los enemigos de las estructuras ligeras).

“ Una viga sometida a flexión, no aumenta proporcionalmente a la luz, sino que lo hace respecto al cuadrado de la luz, es decir, una viga que tenga que cubrir una luz de 10 metros necesitará, por ejemplo, tener un grosor de 0.2 m, en cambio si la misma viga tuviera que cubrir una luz de 100 m necesitaría un grosor de  $0,2^2$  m, lo que también haría aumentar mucho más su peso.

La razón de esto es que el peso propio de la estructura aumenta más rápido , al ser un volumen ( una potencia de 3 ) , que la capacidad de carga que es un área ( una potencia de 2) “ <sup>15</sup>

La importancia de la escala no es un descubrimiento reciente, Galileo Galilei ya era consciente de éste fenómeno y lo ilustró comparando los huesos de un dinosaurio y un pájaro.

“Ahora podemos ver que ni el arte ni la naturaleza pueden agrandar sus trabajos infinitamente, por lo que parece imposible construir enormes barcos, palacios o templos, así como la naturaleza, por otro lado, no permite que existan árboles sobredimensionados, ya que sus ramitas se rompería por su propio peso ( ... ) a modo de explicación, he esbozado un hueso para ti que es tres veces la longitud normal y cuya masa ha sido espesada, para que sea tan útil para los animales correspondientemente grandes como el hueso pequeño para los animales más pequeños. Verás la incongruencia del hueso grande. Entonces, si quisieras mantener las mismas proporciones para un gigante, tendrías que encontrar materiales más fuertes, o tendría que renunciar a su solidez, y hacer que el gigante sea más débil que los humanos de tamaño normal, si se sobredimensionara sería aplastado por su peso propio y caería.” <sup>16</sup>

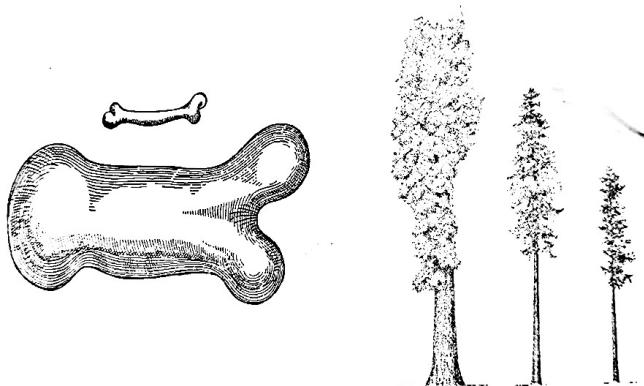


Fig. 25 Comparación entre el hueso de un pájaro y un dinosaurio según Galileo. (Izquierda)

Fig. 26. La secoya pino de Douglas y el pino dorado muestran hoy el diámetro de las conicidades del tronco con una altura creciente ( derecha)

Podemos concluir que cuanto mayor es una estructura también será mas pesada, por lo que a la hora de proyectar estructuras ligeras debemos acotar los espacios y evitar luces innecesariamente grandes, y siempre usar materiales eficientes para aprovecharlos de una manera óptima.

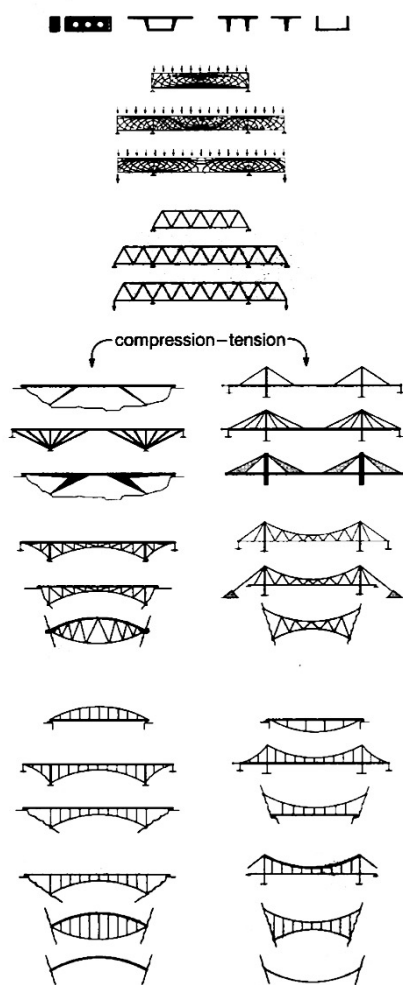


## 2- No someter los elementos a flexión

“Las leyes anteriores de la naturaleza sobre la escala pueden ser eludidas con algunos trucos, evitando los elementos estresados al doblar a favor de las barras tensionadas puramente axiales por tracción o compresión, disolviendo la viga. Básicamente, esto siempre es posible, con celosías. Con puntales y ataduras, toda la sección transversal se aprovecha de manera uniforme sin que nada sea superfluo. El doblado solo estresa las fibras del borde, mientras que en los centros se debe arrastrar el bulto muerto.

Aquí los lazos en tracción actúan aparentemente más favorablemente que los puntales en compresión porque solo se rompen si el material falla, mientras que los puntales delgados fallan debido al pandeo, un movimiento evasivo lateral repentino. Esto puede probarse fácilmente con una vara larga de bambú. No podemos romperlo con nuestras propias manos, pero si lo presionamos, se dobla rápidamente” [17](#).

Esto quiere decir que debemos disolver las vigas, y esto puede hacerse gracias a las celosías. Con ello conseguimos utilizar tensiones axiales o de compresión, evitando la flexión. Las secciones se utilizan de forma óptima si funcionan solo en tracción y compresión, siempre que se pueda garantizar la estabilidad. Por lo tanto, las celosías son mucho más ligeras que las vigas dobladas.



Reconocemos, comenzando desde arriba, la disolución de la viga en la celosía y luego (izquierda) las estructuras del arco que llevan sus cargas principalmente por compresión y su inversión (derecha) las estructuras de suspensión que hacen uso de la especial fuerza de tracción favorable. En la parte inferior se encuentran las estructuras más marginales, el arco puro o el cable suspendido entre dos paredes rocosas. Pero estos últimos son inútiles, porque se deforman demasiado bajo carga. Pero entre las estructuras superior e inferior se encuentran las soluciones más diversas: arcos y cables suspendidos reforzados por vigas secundarias en flexión y todo tipo de cierres, arcos rígidos en la plataforma, marcos pavimentados (izquierda), así como puentes de cable y puentes colgantes, etc. (derecho). Cuanto más avanzamos hacia abajo en la Fig.27, más ligero se vuelve, pero también más crítico con respecto a las vibraciones inducidas por el viento, y esto representa el desafío y la atracción de la ingeniería de puentes.

Fig. 27. Evolución de los puentes

### 3- Eficiencia de los materiales

“Tales elementos estructurales favorables sujetos a tracción o compresión se vuelven tanto más eficaces cuanto mayor es su resistencia a la tracción ( $\beta_z$ ) o su resistencia a la compresión ( $\beta_D$ ) y cuanto menor es su densidad aparente ( $\gamma$ ).

La longitud de corte ( $B = \beta_z / \gamma$ ) se refiere a la longitud que puede alcanzar un hilo antes de que se rompa bajo su propia carga. La altura máxima ( $H = \beta_D / \gamma$ ) se refiere a la altura de un prisma que acaba de ser aplastado en su huella.

Mientras que la longitud de ruptura R de un cable y la altura máxima H de una columna son independientes del tamaño de su área de sección transversal constante, en la combinación de dos materiales, la escala y la eficiencia también entran en juego” <sup>18</sup>.

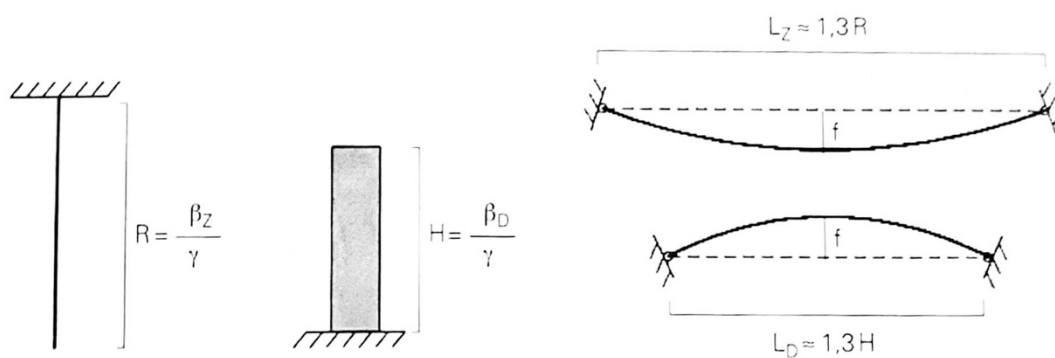


Fig. 28 Longitud de rotura (R), altura máxima (H), luz última (L)

	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\beta$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta/\gamma$ [km]	$\beta/\gamma$ 1,3 [km]
Naturstein-Mauerwerk   Natural stone masonry	25	- 50	H ≈ 2,0	L <sub>D</sub> ≈ 2,6
Mauerziegel   Brick	15	- 20	H ≈ 1,3	L <sub>D</sub> ≈ 1,7
Normalbeton   Regular concrete	23	- 40	H ≈ 1,7	L <sub>D</sub> ≈ 2,3
Hochfester Beton   High strength concrete	23	- 120	H ≈ 5,2	L <sub>D</sub> ≈ 6,8
Baustahl   Structural steel	78	- 500	H ≈ 6,4	L <sub>D</sub> ≈ 8,3
Stahldraht   Steel wire	78	+ 2200	R ≈ 28	L <sub>Z</sub> ≈ 37
Kiefernholz   Pine wood	5	- 60	H ≈ 12	L <sub>D</sub> ≈ 16
Glasfaser   Glass fibre	25	+ 2400	R ≈ 96	L <sub>Z</sub> ≈ 125
Aramidfaser   Aramid fibre	14	+ 2700	R ≈ 193	L <sub>Z</sub> ≈ 250

- Druck + Zug  
- compression + tension

Fig. 29 Variación de diferentes magnitudes según el material

“En realidad, el diámetro de una torre, o en el caso de un cuerpo hueco, el grosor de la pared, se estrecha hacia arriba en línea con la reducción del esfuerzo de compresión. Si se permite que el área transversal de arriba a abajo crezca de acuerdo con la función tan típica de los fenómenos naturales de logaritmos naturales o funcionamientos electrónicos, entonces las tensiones verticales en cada sección transversal permanecen constantes. De esta forma, cualquier material puede usarse para construir tan alto como quieras” <sup>18</sup>

“El factor  $\gamma / \beta$  sería el único que determine los contornos de la torre, cuanto más pequeña sea, más se pondrá en cuclillas. Si uno (arbitrariamente) establece esa altura como la altura máxima  $H$ , en cuyo diámetro  $D$  llega a ser tan grande, se aplica lo siguiente: para hormigón normal  $H = 37$  km, para hormigón de alta resistencia  $H = 122$  km, para acero estructural  $H = 153$  km y para madera  $H = 303$  KM”

[18](#)

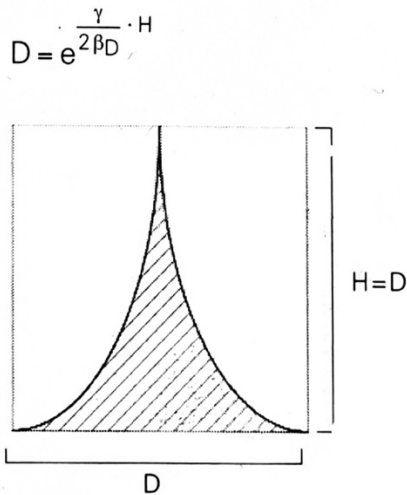


Fig. 30. Relación entre la altura máxima y el diámetro de una torre.

“Un cable colgante fabricado con alambre de acero de alta calidad (o de fibras de aramida) podría sostenerse hasta un máximo de 37 km. Si requerimos un factor de seguridad de 2.0 y suponemos que además de su peso muerto, el cable debe soportar al menos el mismo peso nuevamente (por ejemplo, la viga de rigidización de un puente colgante), pero puede, por otro lado, ignorar la carga tradicional. Luego, utilizando los materiales disponibles en la actualidad (alambre de acero), la amplitud máxima calculada para estructuras suspendidas es  $L_{\text{máx}} = 9$  km para arcos  $L_{\text{máx}} = 2$  km es mucho más de lo necesario, razonable y asequible.

Con respecto a la minimización del peso del cable o del arco, la relación de elevación a escala  $f / L = 0.35$  basada en  $L_z = 1.3 R$  es óptima. En el caso de los puentes colgantes, sin embargo, con respecto a la deformación y la carga de tráfico lateral y un peso del cable aún aceptable,  $f / L = 1/8 - 1/10$  ha resultado favorable

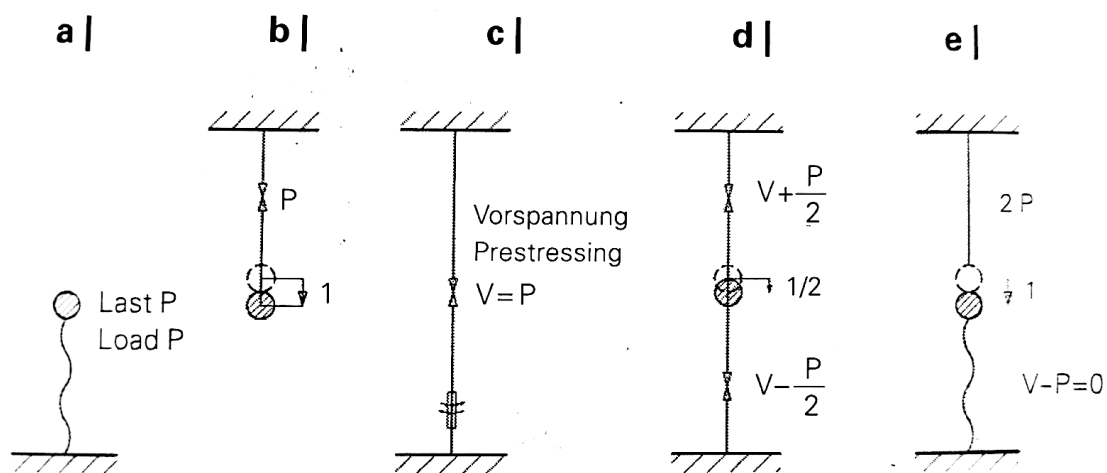
En  $f / L = 1/8$  para un peso del cable  $A_y$  Con  $S = AB$ , la distancia máxima práctica para estructuras suspendidas para cables de acero con una longitud de ruptura  $R = 28$  km es menor, es decir (límite de práctica  $L = 0,89 \cdot 28 \cdot 1 / 4 = 6.2$  km, en lugar de  $1,3 R$  es aún más de lo necesario. Si las fibras de aramida utilizables se pueden producir con éxito para la construcción, entonces  $L_{\text{límite}} = 43$  k” [18](#)

Por tanto los elementos de estrés tensionado eficientes se vuelven , incluso más eficiente con el aumento de la resistencia a la tracción y la disminución de la densidad del material, es decir, con el aumento de la longitud de ruptura / colgando hacia abajo hasta que se rompa bajo su carga muerta. La madera es más eficiente que el acero y las fibras naturales y artificiales lo son aún mejor.

Una forma muy eficiente de lograr ligereza es utilizar materiales de alta resistencia y bajo peso. En este sentido, un material de construcción muy prometedor son las fibras de carbono.

## 4- El pretensado

El pretensado es una forma particularmente ingeniosa de lograr la ligereza, ya que permite que la tensión de compresión indeseable se convierta en tensión de tracción y viceversa. En el caso de un cable que discurre entre el techo y el suelo, que, gracias al pretensado, transfiere la carga como tracción al techo y al mismo tiempo al suelo como compresión, el pretensado permite todos los elementos de construcción formen parte del juego, es decir, incluso los cables sujetos a compresión no se aflojan. Además, la deformación recuerda el pretensado incluso cuando la sección inferior del cable se ha aflojado. De esta forma, se pueden construir vigas de cables y redes de cable muy ligeras y eficientes, que tienen el comportamiento de soporte de carga ideal de las membranas de estructuras de puntales y ataduras o de conchas

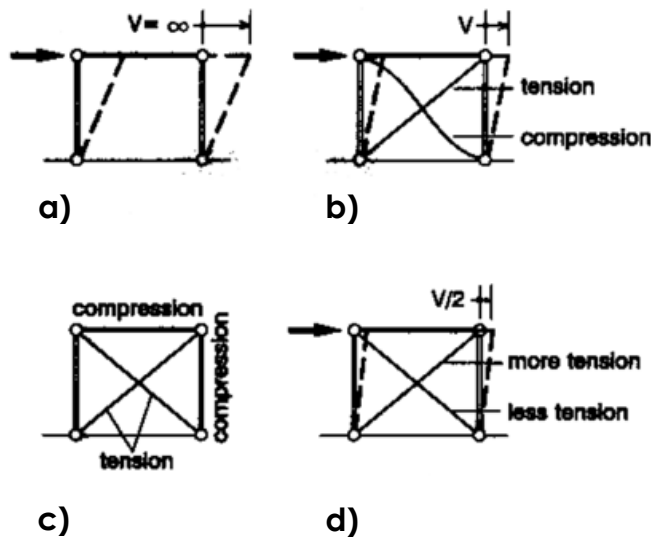


### PRINCIPIO DEL PRETENSADO <sup>19</sup>

- Un cable flojo no puede proporcionar soporte
- Un cable suspendido puede sostener una carga
- El cable, sujeto en el suelo y en el techo pero todavía no bajo carga, se tensa hasta alcanzar la fuerza  $V$  mediante un tensor
- La carga, suspendida a mitad del cable pretensado, esta sujeta mitad del techo y mitad del suelo.
- Si la carga es doble, la compresión consume el pretensado del cable inferior y se vuelve flojo. Por lo tanto la carga se sostiene solo del cable superior.



En el ejemplo del cuadrado de varillas con cables cruzados, el cable diagonal sujeto a la tensión de compresión ayuda a soportar la carga porque está sometido a esfuerzos. Inicialmente se sometió a esfuerzos de tracción, de modo que cuando se comprime no detecta presión, sino una reducción de la tensión, que es la misma en términos de carga.



- a) Si no hay cruz, no hay estabilidad
- b) Los cables no pretensados en diagonal, con la compresión se vuelven flojos y solo la diagonal pretensada funciona
- c) Cables diagonales pretensados sin carga
- d) Diagonales con cables pretensados bajo carga: el desplazamiento es  $V/2$  en comparación con  $V$  sin pretensar

Las redes de cable serían inutilizables sin pretensado: un conjunto de cables caídos se tensa contra un conjunto de cables curvos opuestos de tal manera que las fuerzas inversas mantienen un estado de equilibrio. Bajo carga externa, las fuerzas de tracción en el conjunto "superior" de cables aumentan y en la disminución "inferior", hasta que este último se afloja.

Gracias al pretensado, incluso un cable recto apenas tensado (y correspondientemente una red / membrana pretensadas planas) puede soportar cargas transversales con deformaciones, que se controlan por la cantidad de pretensado. Más allá de la aplicación del pretensado en redes de cable y membranas ilustradas aquí, y tan importante en la construcción de peso ligero, hay otra amplia gama de posibilidades para aplicar este principio, desde pernos pretensados y anclajes de suelo hasta hormigón pretensado.

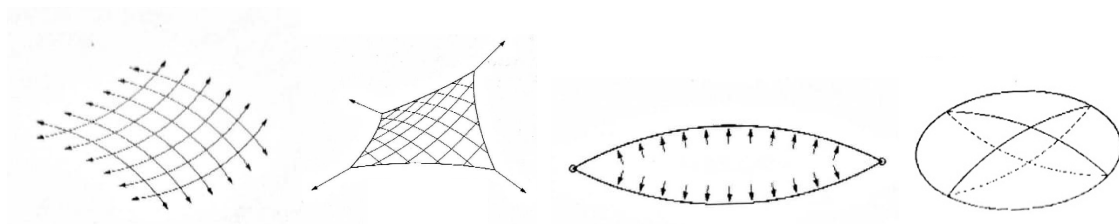


Fig. 31 Estructuras pretensadas: curvatura anticlástica, red de cables, pretensado neumático ( curvatura sinclástica) y membrana ( De izq. a dcha.)

## 5- Doble curvatura

Los principios de las estructuras ligeras desarrollados en la construcción de puentes, se pueden aplicar a la construcción de edificios el techo de grandes salones deportivos, feriales e industriales. Esto le da a los edificios su propio carácter y dimensiones humanas.

Estas estructuras no solo son extremadamente ligeras, sino que también abren un mundo completamente nuevo para la arquitectura, proporcionando una variedad de diseño inigualable que de ninguna manera se ha agotado. Al igual que los puentes, también transfieren sus cargas a través de la compresión (las cáscaras o cúpulas de la red) o a través de la tracción (las redes de cable y las estructuras de la membrana). Entre estos están las estructuras planas, losas y celosías tridimensionales.

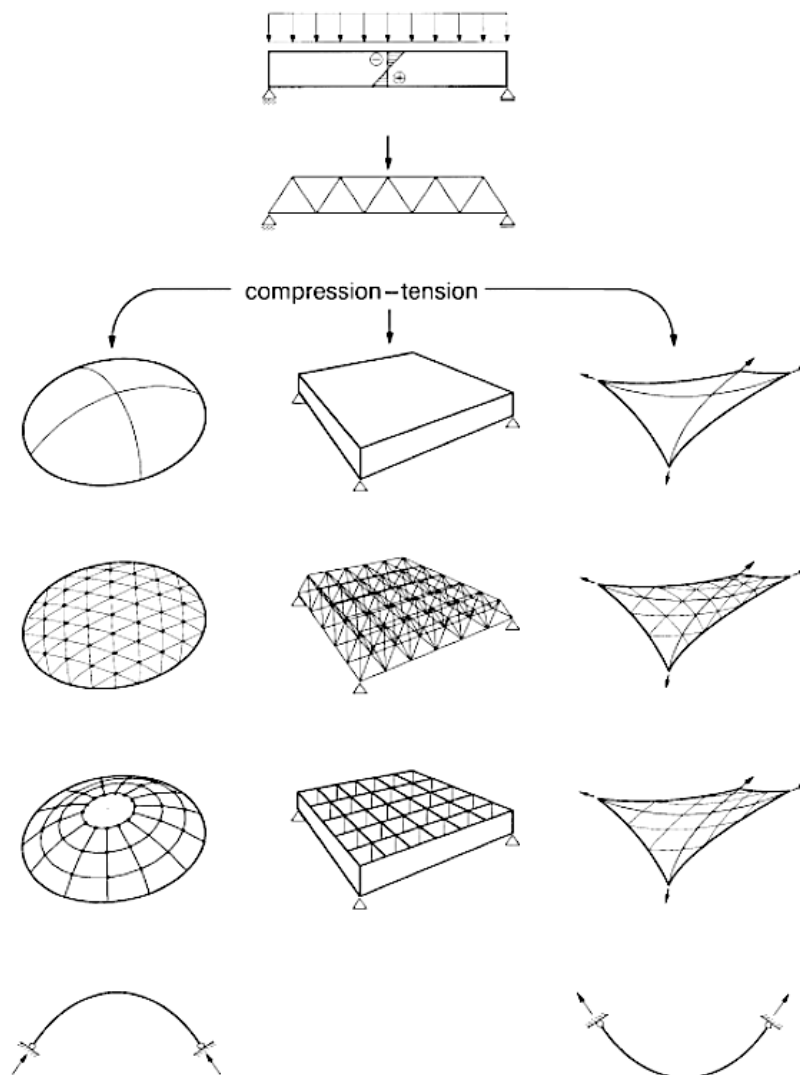


Fig. 32 Desarrollo de las estructuras de membrana

A pesar de la extremada resistencia de la pared de las conchas y las cúpulas de rejilla, su forma curva logra estabilizarlos contra el temido pandeo y, de la misma manera, proteger las redes de cable y las membranas extremadamente ligeras de la vibración inducida por el viento mediante pretensado. Para esto, las dos direcciones principales de las redes y las membranas (una vez más utilizando el principio de pretensado) se tensan una contra la otra, por lo que adoptan la forma de silla de montar típica, con curvatura anticlástica. Si se pretensan neumáticamente, adoptan una forma de cúpula con curvatura sinclástica.

Estas estructuras livianas de membrana de doble curvatura son mucho más propensas a estirarse hasta sus límites por razones de tecnología de fabricación y, en consecuencia, costos. Estas superficies curvas son difíciles de fabricar y requieren un costoso encofrado y una complicada prefabricación. Los detalles en las redes de cable y las membranas requieren mucha mano de obra y demandan una precisión extremadamente alta en su producción.

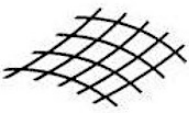
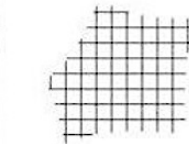
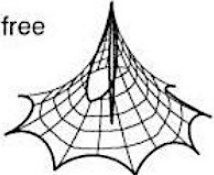
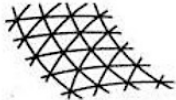
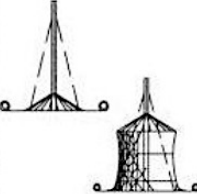
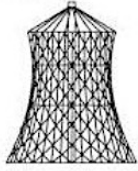
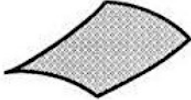
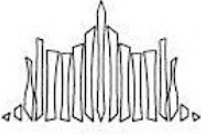
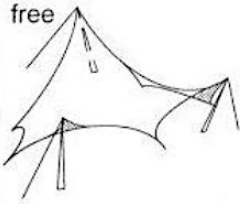

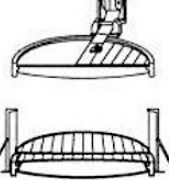

STRUCTURE	MANUFACTURE	GEOMETRY
 SQUARE NET		free 
 TRIANGULAR NET		restricted 
 TEXTILE MEMBRANE		free 
 THIN METAL SHEET MEMBRANE		restricted 

Fig. 33 Manufactura y geometría de las estructuras de membrana tensionadas

Este tipo de estructuras son algo completamente nuevo en arquitectura, y abren una variedad inigualable de formas que aún no se ha explorado completamente.

## CONCLUSIONES

Lograr la ligereza no es una tarea sencilla, ya que se trata de desafiar las teorías de la estática y la dinámica. La aparición de nuevos materiales requiere de nuevos procesos de fabricación que difícilmente funcionan al primer intento, necesitan un largo proceso de ensayos de prueba y error para conseguir soluciones válidas. Las estructuras ligeras son un gran potencial para los ingenieros, ya que siempre pueden investigar y poner en práctica sus conocimientos y experiencia, y si llegan a soluciones estructurales novedosas y eficientes pueden abrir las puertas a arquitectos e ingenieros de diseñar y ofrecer nuevas expresiones visuales a los proyectos, y así contribuir a la construcción de cultura.

Con el paso de los años, muchos ingenieros trataron de aplicar los principios de las estructuras ligeras de Schlaich a todos los tipos de estructuras, incluidos puentes, torres, cubiertas de hormigón, redes de cables, membranas y cubiertas de vidrio.

En el proceso de búsqueda de nuevos y mejores tipos de estructuras, conceptos estructurales simples como la rueda de bicicleta, la raqueta de tenis, el tamiz o simplemente un anillo han servido para conseguir numerosas variaciones.

Por lo que podemos concluir que las estructuras ligeras son un campo muy amplio en el que las posibilidades son infinitas lo que mantiene a los ingenieros siempre en la búsqueda.

## 3. APLICACIONES PRÁCTICAS

### 3.1 Redes de cables

Las redes de cable con mallas cuadrangulares permiten una amplia variedad de formas que ninguna otra estructura llega a igualar, a pesar de que, y precisamente porque, su formación obedece las leyes físicas de la estructura.

“Si, como suele ser el caso, están pretensadas desde el borde rígido o mediante cables de borde flexible desde los puntos de anclaje, entonces su superficie curva siempre es anticlástica. Si están pretensados neumáticamente, por ejemplo, como refuerzo para un colchón de aire, también pueden formar superficies curvas sinclásticas, siempre con la superficie del plano como transición. Solo en el caso de superficies en forma de silla sencillas entre bordes rígidos se puede considerar el pretensado de los cables de red individuales desde los bordes. Si, por el contrario, uno desea agotar el rango de formas posibles que ofrece este tipo de estructura y enmarca la red con cables de borde, entonces estos deben cortarse a medida. La red de cable prefabricada de mallas iguales, contraída en línea con el tamaño de su expansión bajo pretensado programado, está dispuesta en el suelo. Todavía está flojo, se fija a los cables de borde, que a su vez terminan en los cables de soporte trasero en los cimientos. Mientras se iza desde el mástil, la rotación de los ángulos de la malla crea la doble curvatura, y al tensar los bordes asume su forma final "por sí misma". Ya que estas mallas, que inicialmente eran cuadradas, ahora son ligeramente rómbicas y se pueden mover cuando se someten a cargas, una red como esta no puede tener una cubierta rígida, sino que requiere una piel flexible. Por lo tanto, el precio pagado por la variedad formal y la fabricación ideal y los métodos de montaje de una red rectangular es un comportamiento estructural y de deformación desfavorable “ [20](#) .

Esto es bastante diferente de una red de cable con mallas triangulares, que desde el punto de vista de la construcción solo permite formas giratorias hiperbólicas, pero en condiciones de pretensado tiene el comportamiento estructurado de una membrana de revestimiento ideal.

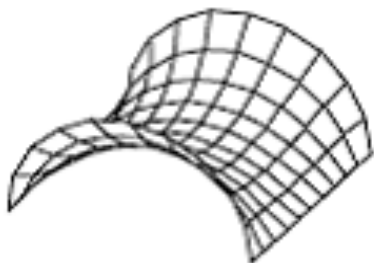


Fig. 34 Superficie anticlástica

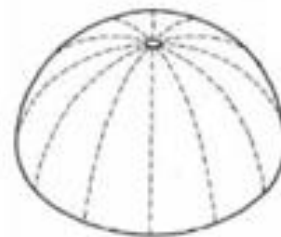


Fig. 35 Superficie sinclástica

## LA CUBIERTA DEL ESTADIO OLÍMPICO DE MÚNICH

Los XX juegos olímpicos tuvieron lugar en Múnich ( Alemania ) en el año 1972. Para ello se construyeron varios espacios deportivos, como el Estadio Olímpico, la Arena Olímpica y la Piscina Olímpica, todos ellos unidos bajo una cubierta de un total de 74.800 metros cuadrados.



<b>Localización:</b>	Múnich , Olimpiapark, Spiridon-Louis-Ring
<b>Cliente:</b>	Olympia Baugesellschaft Múnich
<b>Concurso:</b>	1967
<b>Construcción:</b>	1969-1972
<b>Características:</b>	Estructura de red de cable pretensada, cubierta de 74000 m2
<b>Cooperación:</b>	Behnisch+Partner (arquitectos de Stuttgart) y Frei Otto ( arquitecto de Warmbronn)
<b>Diseño conceptual, diseño de los detalles y supervisión de la obra :</b>	J. Schlaich and R. Bergermann at Leonhardt und AndrÄ

### LA IDEA

Ésta cubierta se asemeja a una gran tienda de campaña de redes de cables, suspendida sobre mástiles. Los técnicos dudaban desde el inicio de la construcción de si se podría lograr cubrir una superficie tan grande.

Al contrario que muchos otros estadios, el Estadio Olímpico de Múnich se integra armoniosamente en el paisaje de colinas del Parque Olímpico que lo rodea gracias a su carpa oscilante. Para ello, el techo no solamente cubre la tribuna principal del propio Estadio Olímpico, sino también el pabellón Olímpico, la Piscina Olímpica así como los caminos intermedios del Parque Olímpico.

Los arquitectos se dejaron guiar por estructuras naturales, como las telas de araña o las algas diatomeas.

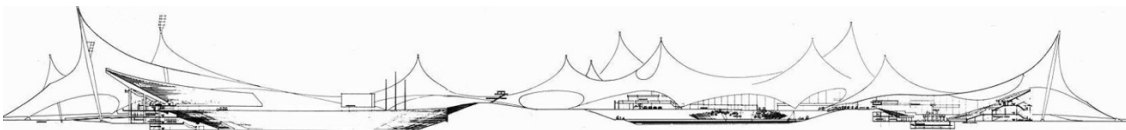


Fig. 36 Boceto de la silueta de la cubierta completa



## EL CONCURSO <sup>21</sup>

Cuando en 1966 se confirmó que Múnich sería la sede de los Juegos Olímpicos de Verano de 1972, una cosa quedó muy clara: hacía falta un nuevo estadio. Esto se debía a que el mayor estadio de la ciudad hasta la fecha, el "Grünwalder", solo contaba con 45.000 localidades, era sin duda demasiado pequeño para el volumen de espectadores que se esperaba. Incluso para los partidos de fútbol de los dos mayores equipos de la ciudad, FC Bayern Múnich y TSV 1860 Múnich, el estadio empezaba a ser insuficiente por aquella época. A menudo la demanda de entradas superaba la capacidad del estadio. Por ese motivo, la ciudad de Múnich anunció un concurso de arquitectura para la planificación de un nuevo edificio. El requisito era que el techo fuera translúcido en cualquier caso. A fin de cuentas, los organizadores deseaban retransmitir los Juegos Olímpicos a través de la televisión en color, que acababa de hacer su aparición, y para ello necesitaban mucha luz. Por lo tanto, una construcción del techo de madera u hormigón no entraba siquiera en consideración <sup>23</sup>.



Fig. 37 Estado del lugar antes de la construcción

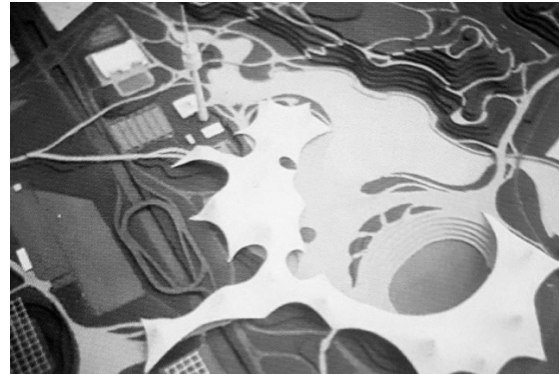


Fig. 38 Maqueta de tul con la que ganaron el concurso los arquitectos Behnisch + parner y Jürgen Joedicke

Junto con el ingeniero suizo Heinz Isler, los arquitectos Behnisch + parner y Jürgen Joedicke ganaron el concurso en 1967 con su idea de un transparente, inusual e innovador techo de carpa, aunque la estructura todavía tenía que ser probada ya que resultaba demasiado temeraria .

Lo que estaba claro es dónde se habían inspirado , en el pabellón alemán de Frei Otto para Expo ' 67 en Montreal, donde él ya había concebido una carpa de poliéster con revestimiento de PVC.



Fig. 39 Pabellón alemán en la Expo '67 de Frei Otto

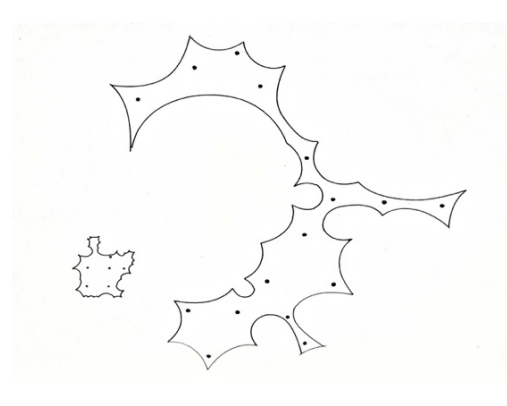


Fig. 40 Comparación de tamaño entre la cubierta olímpica de Múnich y la del pabellón alemán de la Expo '67 en Montreal

En términos de tecnología e ingeniería eran necesarios grandes avances para que esta primera estructura permanente de redes de cable, que también iba a ser varias

veces más grande y se debía realizar en el espacio relativamente corto de tiempo, estuviera disponible para su desarrollo.

Finalmente y tras un largo proceso de selección, se les adjudicó la obra al estudio de arquitectura Behnisch & Partner de Stuttgart, gracias a su magnífica maqueta (Fig. 32) y al diseño paisajístico de los alrededores. El jurado recomendó la cooperación con los ganadores del 3er Premio — los arquitectos Heinle, Wischer y socio, junto con Jörg Schlaich de Leonhardt und Andrä, cuyo diseño parecía más realista.

## PROCESO DE DISEÑO <sup>21</sup>

Behnisch + Partner recurrieron a los servicios de Frei Otto como consultor, que tuvo una gran influencia en el proceso de diseño, pero fue en contra de los avances estructurales posteriores que requirió

Las ideas respecto al diseño estaban claras, pero no tanto la solución estructural. Empezó entonces un dialogo creativo entre arquitectos e ingenieros que se basaba en la confianza profesional y la aceptación mutua. Así es como el estudio Schlaich and Bergermann fue capaz de diseñar y construir la cubierta en un tiempo tan limitado pese a la controversia de cómo iba a ser posible construir un techo de dichas dimensiones.



Fig. 41 Heinz Isler, Fritz Auer, Frei Otto, Jörg Schlaich, Fritz Leonhardt, Rudolf Bergemann y Knut Gabriel ( de izq. a dcha.)

El proceso de diseño se inició usando modelos de tul antes de pasar a modelos de alambre refinado en una escala de 1: 75. Debido a la falta de otras posibilidades, las últimas se midieron fotogramétricamente para determinar el patrón de corte exacto.

Sin embargo, este método no era lo suficientemente preciso ni se ajustaba a la práctica contemporánea. Por esta razón, los métodos de cálculo asistido por computadora tuvieron que desarrollarse y se aplicaron por primera vez en el cálculo del patrón de corte de la arena deportiva. Dadas las limitaciones de tiempo, la fabricación de los otros techos debía determinarse usando modelos de medición (por última vez), lo cual era solo justificable gracias al método geodésico del último ajuste del profesor Klaus Linkwitz.



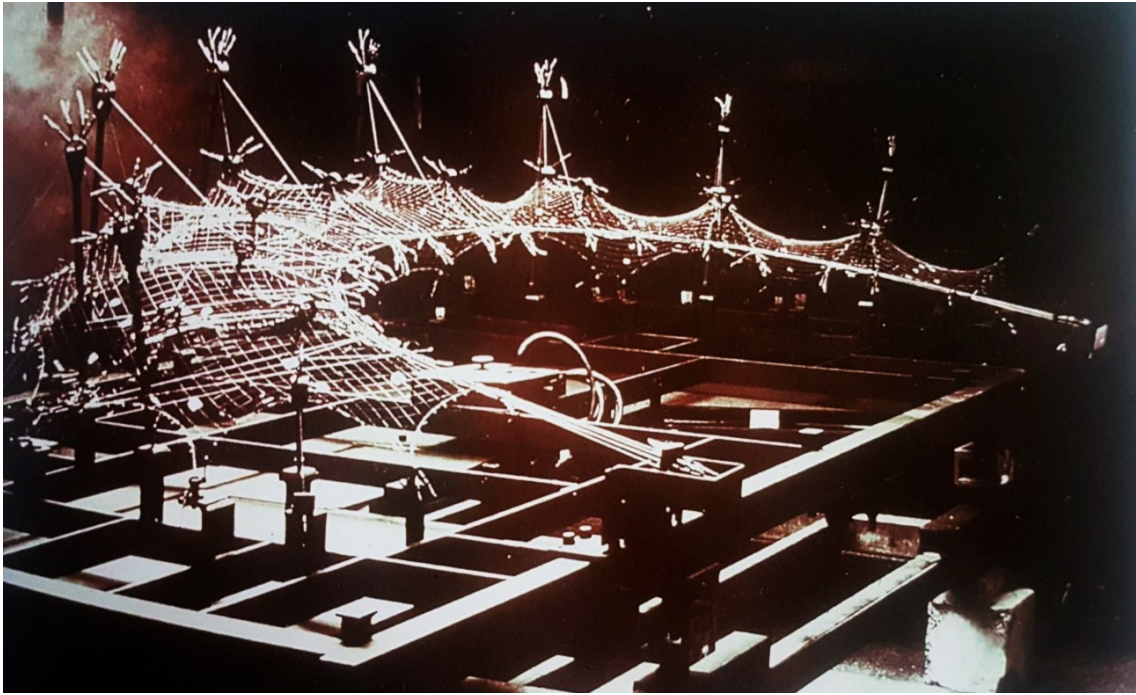


Fig. 42 Modelo de alambre a escala 1:75

### EL DISEÑO DEFINITIVO<sup>21</sup>

Se optó por un diseño modular, para cumplir el deseo de claridad del proyecto y dar una sensación de calma y tranquilidad a través del orden estructural, así como la racionalización mediante la producción en serie, lo que aseguró que el edificio estuviera listo a tiempo.

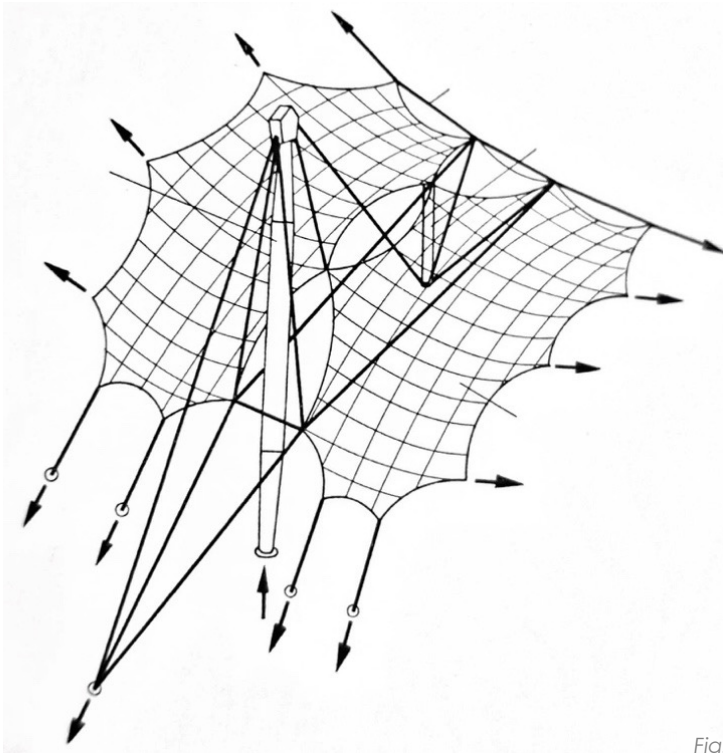


Fig. 43 Dos módulos de la cubierta unidos

Diseñado como la primera construcción de red de cable permanente, tendencias mínimas de corrosión, mínima sensibilidad a las fuerzas transversales en las abrazaderas y puntos de desvío o curvas durante el montaje, así como la expansión controlada fueron factores decisivos en la elección de cables hechos de 19 soportes de alambre grueso. Se llevaron a cabo extensas pruebas de fatiga a largo plazo en los cables, junto con sus puntos de anclaje, no solo con respecto a la fatiga de la oscilación inducida por el viento sino también porque era una buena forma de detectar todas las formas posibles de fallas ocultas

Se eligió un ancho de malla de 75x75 cm de la red de cable de doble capa (variable crucial) ya que debía ser lo más grande posible para minimizar el número de abrazaderas y nodos, pero lo suficientemente pequeño como para acceder directamente a la red y su cubierta, y por tanto pudiera ser levantado sin andamios.

Los cables de las redes (borde, cresta y valle) están formados por un mismo cable de bobina cerrada de 80 mm de diámetro, lo que significa que pueden conectarse uno tras otro y, además, las abrazaderas, ranuras y los anclajes se podían estandarizar.

También se sustituyeron los nodos rígidos originales por nodos giratorios, ya que con el alto grado de variedad de ángulos que podían existir en la malla se creaban muchos problemas. Así se usaron pues abrazaderas giratorias donde en la etapa de fábrica se les creaba un orificio centrado con ultra precisión lo que garantizaba que no se necesitaran mediciones adicionales en el proceso de montaje, lo que se convirtió en una decisión clave para que fuera factible la construcción de la cubierta olímpica.

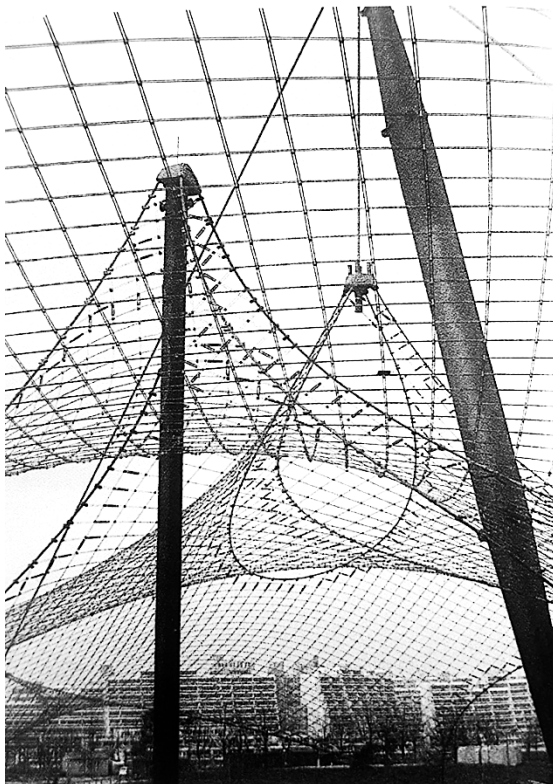


Fig. 44 Red de cable sin la cubierta (Izq.)

Fig. 45 Rótula para posicionar los mástiles inclinados, hechas de hormiÓN (Abajo)



## EL PROCESO CONSTRUCTIVO [22](#)

La excelente planificación que exigió el sistema de montaje permitió que no hubiera problemas durante la construcción, ya que todos los cables fueron suministrados en obra, ya cortados con sus dimensiones definitivas y marcados para fijar su posición definitiva. La construcción se llevó a cabo en tres etapas:

### 1ª – Mástiles y elementos de anclaje correspondientes

Se comenzó con la instalación de los once mástiles de hasta 80 m de altura, sobre soportes de la red. Se trata de tubos de acero apuntados en sus extremos en forma de cono.



Fig. 46 Momento de colocación de la parte inferior de un mástil

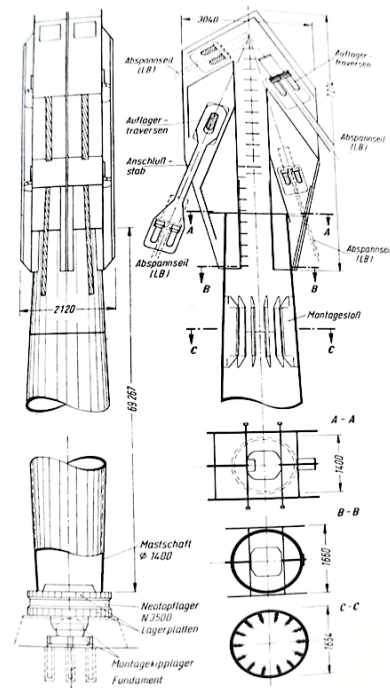


Fig. 47 Sección transversal, cuerpo y base del mástil

El mayor de los mástiles tiene que soportar una carga de 3200 Mpa.

Los cabezales están compuestos por chapas soldadas de 40mm de espesor ( e incluso más gruesas en las zonas de más carga)

En el borde de los cabezales encontramos unas poleas que son las que sujetan los cables. Sobre las poleas pasa una barra maciza de 150 mm de diámetro en la que se introducen los cables, estas barras ya vienen soldadas y preparadas para su colocación desde el taller.

La parte central del mástil tiene un diámetro de 1,9 m en los menores y 2,8 m en los mayores, con 20 y 37 mm de espesor de pared respectivamente. Se decidieron fabricar en dos mitades para que no se produjeran solapes verticales.

Para el montaje de las dos partes del mástil se usaron tornillos de alta resistencia además de soldaduras de las piezas rígidas del interior.

El apoyo de los mástiles se hizo sobre juntas de neopreno de 1,77 m de diámetro, que les permitían una inclinación de 2,5 °. Pero como el movimiento de los mástiles durante el montaje y el tensado de la red es mayor, se puso el neopreno sobre cojinetes de bolas.

Todas las piezas se limpiaron en obra una vez colocadas con chorro de arena y se les colocó una pintura de imprimación de color zinc.



Finalmente una vez montado, se arriostraron desde bloques auxiliares de montaje.

## 2ª – Red de cables con sus elementos de unión

La segunda parte del montaje consistía en colocar la red de acero, para ello en primer lugar se extendió en el suelo y se fue levantando y colocando por etapas. Primero se levantó la red del recinto deportivo, de 21750 m<sup>2</sup>, sobre los mástiles de apoyo y se tensó, lo que conllevó a que cerca de una tercera parte de la cubierta consiguiera su resultado definitivo.

Para todo el conjunto hicieron falta cerca de 410 km de cable y unos 137000 nudos.

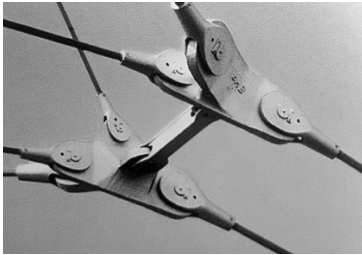


Fig.48 Juntas de acero fundido en su posición final

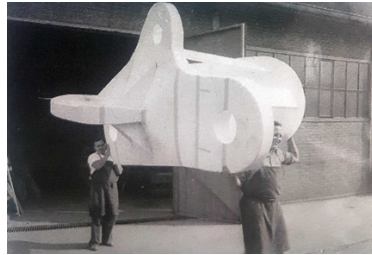


Fig. 49 Modelo de junta de poliestireno



Fig. 50 Acabado de la superficie de las juntas de acero en taller

El borde de la cubierta se trata de un cable marginal de 457 m de longitud que se eleva hasta 40 m sobre el estadio, sin molestar a la visión de los espectadores. Va anclado a los contrafuertes de ambos lados longitudinales del estadio.

Dicho cable está formado de dos haces, cada uno de ellos con 5, de los cuales 5 iban enrollados y en un sentido y los otros 5 en el contrario, para evitar torsiones. Cada cordón era de 15,75mm<sup>2</sup> de diámetro y contaban con 7 cables de acero de resistencia 150 kp/mm<sup>2</sup> y una carga de rotura de 22,5 Mp.

En las uniones de las redes se disponen abrazaderas de acero fundido de alta calidad (de unas 12 toneladas cada una) que constan de un cuerpo en el que se le han soldado las conexiones de los cables de arriostramiento y dos tapas superior e inferior.

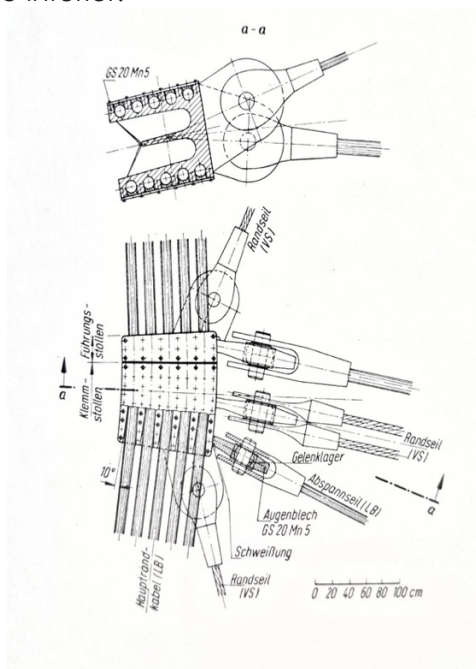
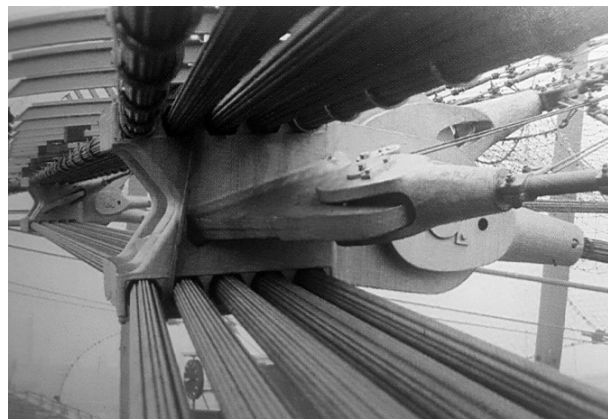


Fig. 51 Sección de la abrazadera de la red de cable (Izq.)

Fig. 52 Cable del borde con la abrazadera (Abajo)



El anclaje de los tirantes de los diferentes cables se efectuó con 3 tipos de cimientos diferentes: cimientos de gravedad para anclajes de tracción; bloques de anclaje para el arriostamiento de mástiles y bloques de anclaje para arriostamiento de elementos secundarios.



Fig. 53 Red de cables sin cubrición

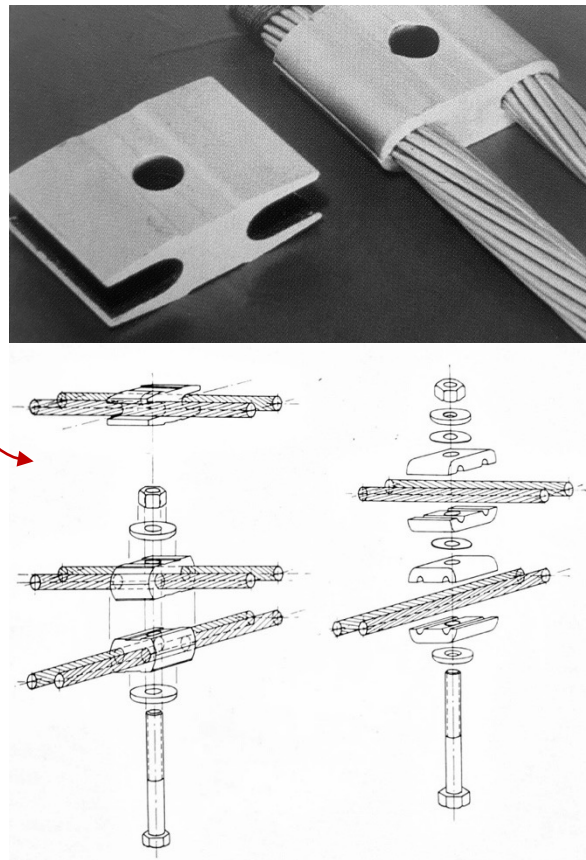


Fig. 54 y 55 Detalles de piezas de unión de los cables



Fig. 56 Momento en el que se iba colocando y tensando la red



### 3ª - Montaje final [23](#)

Una vez colocada toda la red de cables se cubrió con una capa transparente. Para determinar de qué material debía estar compuesta la cubierta del techo, la empresa Olympia Baugesellschaft, encargada de la obra, realizó pruebas exhaustivas: la resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio quedó descartada por su desfavorable reacción al fuego. Las lonas de poliéster con revestimiento de PVC, como las empleadas en la Exposición Universal de Montreal, tampoco consiguieron convencer a la constructora. Si bien estas hubiesen resultado más económicas, sin embargo su translucidez no resultaba satisfactoria, y la colocación sobre la red de cables de acero habría requerido un diseño demasiado complejo. Finalmente, las planchas transparentes de "plexiglass" de cuatro milímetros de espesor convencieron a la empresa. El cristal acrílico ganó puntos gracias a su translucidez incomparable y a su clase de reacción al fuego "B1: difícilmente inflamable".

La perforación del vidrio para su fijación, así como las uniones, se efectuaron mediante procedimientos térmicos. Hubo que desarrollar un sistema especial que garantizara la calidad del corte y resultase de fácil manejo ya que en ocasiones se usaba en pendientes de 80°. Para el anclaje de cada una de las placas se usaron perfiles en forma de T.

Para brindar una mayor protección contra el sol, el cristal se tiñó parcialmente con un ligero tono de gris.



Fig. 57 Obreros colocando los paneles de plexiglás sobre la red de cables

Las planchas de vidrio plexiglás están colocadas sobre la estructura de cables con una holgura de movimiento para poder plegarse ante el viento o la nieve.

Al contrario de otros muchos estadios deportivos, el Estadio Olímpico de Múnich no presenta un aspecto ostentoso ni pesado. La combinación de vidrio y acero le da una apariencia ligera y distendida



## RESULTADO FINAL

A pesar de haber sido construido en el verano de 1972, a día de hoy sigue siendo uno de los grandes emblemas de la ciudad y sin duda toda un referente en el panorama arquitectónico.



Fig. 58 Cubierta acabada



Fig. 59 Interior del estadio durante los Juegos Olímpicos del 72

## 3.2 Cáscara de celosía

“La ligereza, en ambos sentidos de la palabra, es el rasgo característico de las cáscaras de celosía: su superficie de doble curva y el comportamiento estructural de cáscara eficiente resultante significa que son altamente económicos en el uso del material. Disueltos en listones de tal manera que surgen mallas de vidrio, su transparencia disuelve el límite entre el interior y el exterior. Aquí la estructura se convierte en la esencia de la arquitectura.

Para permitir que las estructuras disueltas parezcan livianas, deben poder transferir su carga a través de las fuerzas de la membrana con una flexión mínima, lo que significa que deben tener mallas triangulares. -cuando la producción de CNC(control numérico computarizado) no existía- era deseable, desde el punto de vista de la producción, tener estructuras de rejilla con listones de la misma longitud y juntas giratorias o articulaciones del mismo ángulo. Incluso las tapas esféricas regulares, sin embargo, solo pueden soportar triángulos que son geoméricamente idénticos en capas, por no hablar de formas libres. No hay una solución clara para este problema. Nombres como Konrad Wachsmann, Richard Buckminster Fuller, Max Mengeringhausen y Frei Otto buscaban el mejor compromiso posible”<sup>24</sup>.

“En la búsqueda de estructuras regulares de celosías rígidas para armazones de red completamente libres que, si es posible, delicadamente vidriados, las rejillas que Frei Otto había fabricado con listones de madera para la Exposición de Montreal 67 (1967) y para el Festival Nacional de Jardines en Mannheim (1975) se presentaron como un comentario inicial para Schlaich. Tomando el principio de un tamiz, la red cuadrada que consiste en lamas dispuestas planas y hechas de listones de acero sólidos rectangulares igualmente largos y articulaciones giratorias se puede formar para adaptarse a cualquier geometría de superficie. Cada malla se rigidiza utilizando cables diagonales pretensados que se extienden de borde a borde a través de todas las juntas y no necesitan cortarse a la medida. El prototipo de esta estructura es la cúpula de AQUAtoll en Neckarsulm (1989), que no muestra densidad de cuadrícula en el cenit para toda la geometría esférica. De esta forma, el comportamiento favorable de carga de las mallas triangulares se combina con las mallas cuadrangulares. que son favorables para el acristalamiento. Los paneles de vidrio se colocan directamente sobre los listones de carga y, sin perforar a través de ellos, se sujetan en cuatro esquinas, evitando las tiras de cubierta que atrapan la suciedad. Si las mallas están deformadas, es posible que se necesiten paneles costosos de doble curvatura” <sup>24</sup>



Fig. 60 Cubierta para el Festival Nacional de Jardines en Mannheim, 1975 (Izq.)

Fig. 61 Cubierta del Aquatoll en Neckarsulm, 1989 (Abajo)





Este problema se puede resolver de forma elegante optimizando las superficies como superficies trasnacionales y superficies trans-escala. A diferencia de las mallas triangulares, esto no permite la creación de formas arbitrarias, pero Hans Schober, socio de Schlaich Bergermann und Partner, ha explorado la gran variedad de formas de superficie posibles. El objetivo detrás de la creación de superficies geométricas con superficies trasnacionales y superficies trans-escala es producir mallas en las que las cuatro uniones estén en un mismo nivel para garantizar que puedan cubrirse económicamente con paneles planos (vidrio).

Este método se basa en el principio matemático de que dos vectores paralelos en el espacio siempre definen una superficie plana. Además, si estos dos vectores tienen la misma longitud y una curva, como la generatriz, se desplaza a lo largo de estos vectores como la directriz, entonces las superficies de traslación se forman con estas superficies, dos lados opuestos son siempre de la misma longitud (y son paralelos); un caso especial es una red de superficie con listones de igual longitud. Si los vectores son de diferentes longitudes, con al menos dos de ellos paralelos, se puede crear casi cualquier superficie con mallas planas. Para lograr la regularidad geométrica, la generatriz se expande y se desplaza de forma paralela.

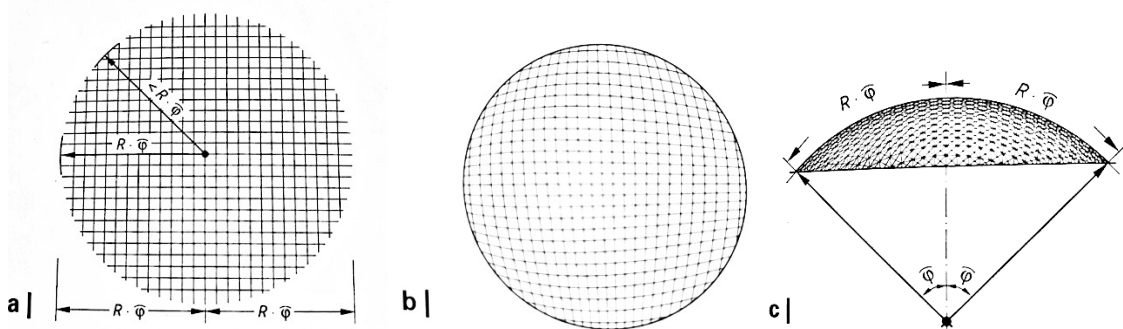


Fig. 62 El desarrollo de una malla cuadrangular de malla de ancho igual y juntas giratorias

- a) Cortar patrón de corte de la cuadrícula b) Vista en 3D ( sin diagonales) c) Vista ( con cables diagonales)

A pesar de que la prefabricación de estas rejillas es hoy en día altamente precisa gracias a CNC, el archienemigo de todos los ingenieros y sus estructuras naturalmente todavía están a la espera: inestabilidad y pandeo causados por imperfecciones casi inevitables que dependen en la habilidad, experiencia, cuidado y sentido de responsabilidad de las empresas de construcción involucradas. Schlaich Bergermann and Partner no se libró de esta amarga experiencia cuando, a pesar de sus objeciones, una empresa sin experiencia, el mejor postor, recibió el encargo de construir lo que en realidad era una cúpula plana en el distrito Halstenbek de Hamburgo, con el resultado de que la cúpula se derrumbó dos veces.

## LA CUBIERTA TRAGALUZ DEL BANCO DZ DE BERLIN

Situado en el Pariser Platz en Berlín, está el nuevo edificio de DZ Bank (antiguo DG Bank), diseñado por el arquitecto estadounidense Frank O. Gehry. Desde el exterior el edificio parece normal pero es en el interior donde los famosos poderes escultóricos de Gehry entran en juego.

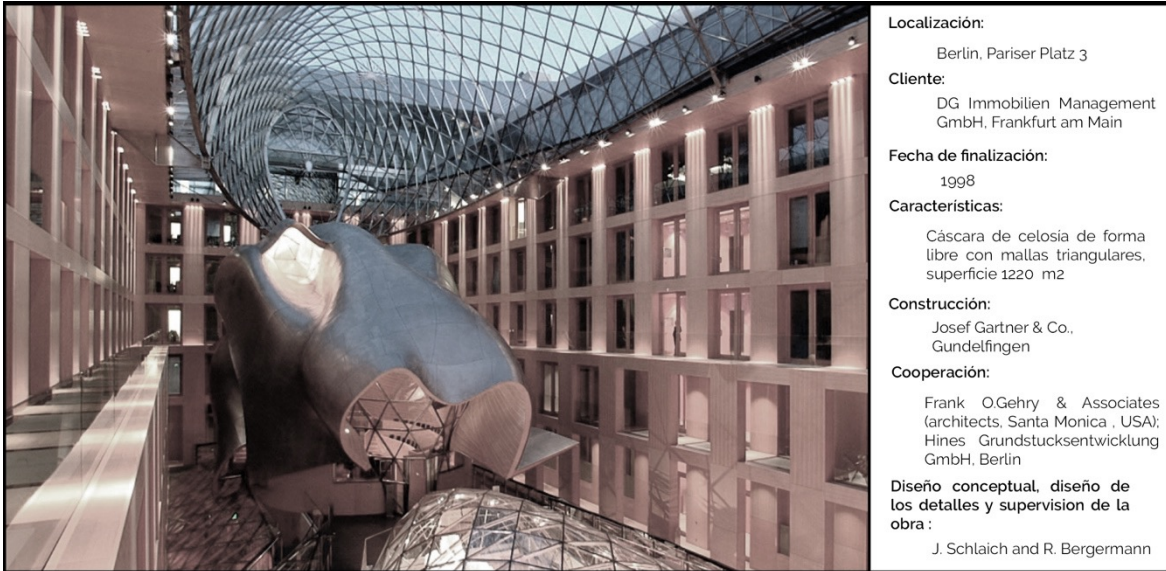


Fig. X Vista del patio interior

### LA IDEA <sup>25</sup>

La normativa urbanística de este emplazamiento imponía desde el inicio una organización de fachada sobre la base de ventanas en vertical con un ritmo específico, unas condiciones de composición clásica muy estrictas, obligando a huecos de ritmo vertical y repetitivo, inspirados en la ciudad tradicional.

Aquí la aportación de Gehry es de una sutileza y astucia máximas: consiguió integrarse a la normativa desarrollando toda su energía orgánica en el interior y proyectando una elegante y discreta volumetría de proporciones cúbicas de cinco plantas hacia la plaza representativa. Un pequeño truco de medidas y de geometría le permite llevar la forma del rectángulo hasta el límite en el que el ojo humano lo perciba como un cuadrado.

Los espacios interiores cambian su dinámica organizándose alrededor de un patio interior cubierto que se convierte en la sala de conferencias del edificio.



Fig. 63 Frank O. Gehry con una maqueta de emplazamiento empezando a proyectar las primeras ideas del edificio.

## PROCESO DE DISEÑO <sup>25</sup>

El proceso de diseño del edificio suponía todo un reto para el arquitecto: había que crear un proyecto que albergaría varios usos muy diferentes en su interior (viviendas, banco, sala de conferencias..), que a su vez se ubicara en uno de los lugares más emblemáticos de Europa y por ello sujeto a unas normas urbanísticas muy estrictas.



Fig. 64 Vista panorámica de la Pariser Platz

El diseño de este edificio Gehry lo compara con un teatro, ya que se encuentra en Berlín, la ciudad-teatro por excelencia.

La fachada principal la compara con una gran cortina de terciopelo, la cual genera llenos y vacíos, luces y sombras con los pliegues, sin embargo, detrás de ese gran telón el espacio se convierte en algo totalmente impredecible, a diferencia del resto de edificios de la ciudad.

La parte trasera del edificio se eleva, creando un bloque de apartamentos de 9 pisos con vistas al Behrentrasse, pero con un carácter totalmente distinto y una fachada trasera menos seria e imponente.

El complejo se abre en el centro creando un gran patio, lo que sería la escena del teatro, donde encontramos la sala de conferencias, con forma de cabeza de caballo, que rompe con toda la armonía y perspectiva que parecía tener el proyecto.

Así el patio central se encuentra compuesto por tres elementos, los cuales se desarrollan simultáneamente, lo que la modificación de uno de ellos significaría la de los otros dos también. Estos elementos son: la sala de conferencias, el techo vidriado que cubre todo el patio, y el suelo que también es acristalado.

En el espacio que se crea entre las dos membranas de vidrio, aparece la forma escultural de la "cabeza de caballo" que culmina la "puesta en escena" que construye el arquitecto, director de un asombroso "espectáculo teatral".

A la cabeza cortada del caballo le podemos atribuir varias connotaciones. Por un lado de manera simbólica Gehry quería crear un "monstruo" (del latín "monstrum", maravilla) que evocara los múltiples monstruos de los que la ciudad de Berlín trata de liberarse. Por otro lado el arquitecto pretendía romper con el orden del edificio, creando un elemento que puede parecer un intruso, pero sin el cuál el edificio no sería el mismo. Pero sobre todo quiere hablar del lugar que ocupa el objeto arquitectónico dentro de la ciudad, hacer dudar de cuál es "la colocación correcta de las cosas" y de desarrollar un diálogo diferente entre la arquitectura y la ciudad contemporánea.

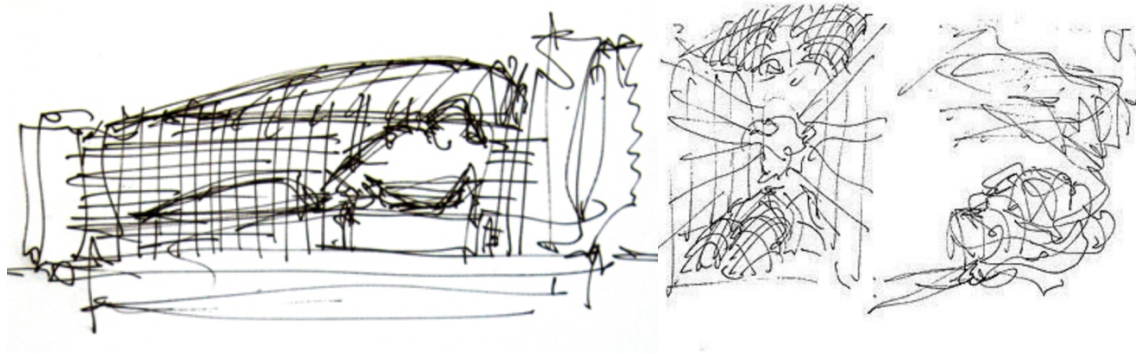


Fig. 65 Primeros bocetos del arquitecto

### **EL DISEÑO DEFINITIVO <sup>26</sup>**

Un total de nueve tragaluces, fachadas y suelos de vidrio se agrupan alrededor del atrio del edificio, todos construidos según el mismo principio, con mallas triangulares acristaladas hechas de perfiles de acero inoxidable.

El tragaluz más grande sobre el atrio de 61x 20 metros sufrió varias etapas de planificación y fue una fuente de cooperación estimulante y emocionante con el arquitecto. El objetivo común era unir los puntos de vista de diseño y estructurales sin problemas. En la entrada, el tragaluz del atrio que finalmente se seleccionó es una bóveda muy plana que luego se dobla hacia arriba, y cada vez más se desplaza por los bordes, mientras que al mismo tiempo penetra desde el exterior hacia el interior antes de fijarse finalmente en un solo punto al final del atrio. El tragaluz se fija en puntos individuales a una distancia de 16.5 metros, ya sea en consolas o suspendido por cables. En estos puntos, la forma también se mantiene y se tensa mediante ruedas con radios.



Fig.66 Maqueta en sección longitudinal del proyecto

Entre el lucernario, la rectilínea fachada interior revestida de paneles de madera y las formas curvas del organismo interior se crean riquísimos espacios de circulación y de encuentro. Esta especie de monstruo interior es un elemento recuperado por el arquitecto de un anterior proyecto no realizado: el vestíbulo en forma de cabeza de caballo que hay en la casa Lewis (1989-1995).



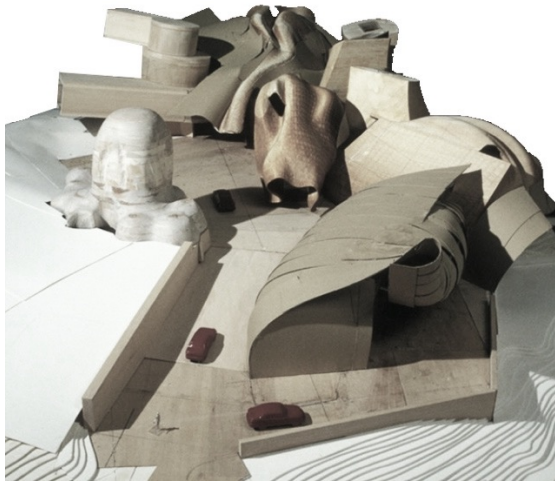


Fig. 67 Modelo 3D de la sala de conferencias con forma de cabeza de caballo. (Arriba)

Fig. 68 Maqueta del proyecto de la Casa Lewis, que nunca se llegó a construir. (Izq.)

### EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LAS ESTRUCTURAS VIDRIADAS [27](#)

El edificio está formado por varias superficies vidriadas que son de las que se encargó de proyectar el estudio Schlaich and Bergemann.

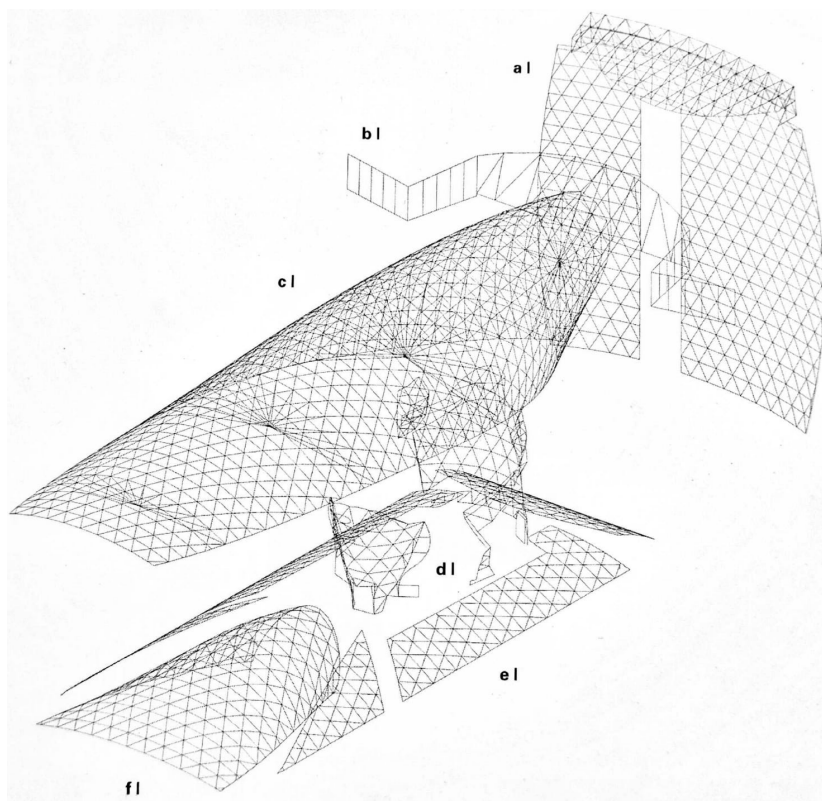


Fig. 69 Elementos vidriados

- a) Tragaluz y fachada de la vivienda
- b) Vidrio del piso 6
- c) Tragaluz vidriado del atrio
- d) Vidriado de la sala de conferencias
- e) Suelo de vidrio
- f) Cáscara norte de vidrio

El tragaluz del atrio se trata de una superficie de doble curvatura de forma libre, de un solo eje y simétrica. Ningún intento de describir esta superficie usando el principio de las superficies de traslación fue satisfactorio ni desde un punto de vista estructural ni con respecto al flujo de las líneas de la estructura de la rejilla. Por esta razón, la superficie se cubrió con mallas triangulares, que en comparación con las variantes

rectangulares tienen la desventaja de recortes de vidrio más grandes dado que este tipo de superficie de doble curvatura de forma libre solo se puede cubrir con triángulos de listones de diferentes longitudes y las articulaciones permanentemente ajustables y, además, que los ángulos agudos son altamente inadecuados para el acristalamiento, la atención se centró en lograr ángulos triangulares lo más cerca posible del ángulo de  $60^\circ$  con una iteración óptima. Por lo tanto, surgió una rejilla que comprendía listones diagonales de igual longitud, cada uno de 1,55 metros de largo, pero con listones de arco de longitudes que variaban entre 1,52 y 1,95 metros. Esto significaba que se requerían un total de 2.490 listones de longitud variable y 826 juntas de estrella diferentes, cada una con seis puntos de conexión y 14.940 ángulos de conexión diferentes.

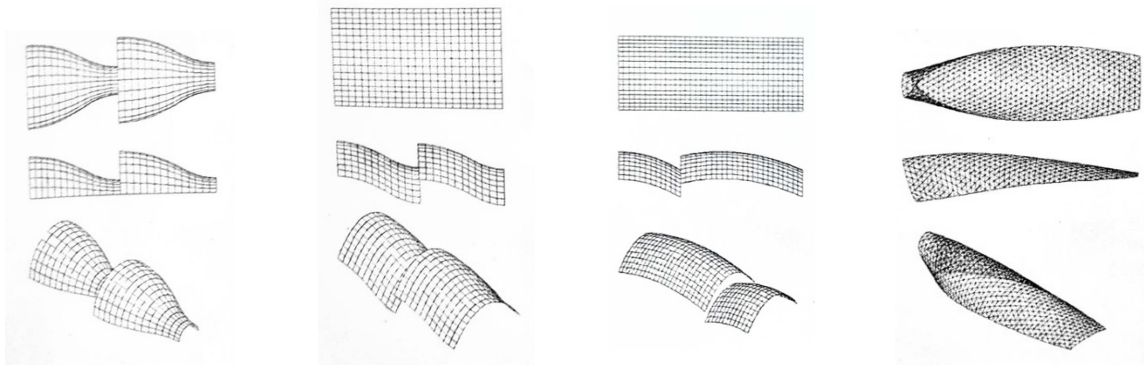
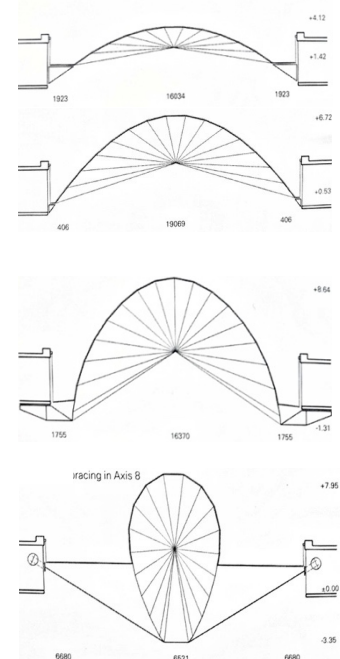


Fig. 70 Etapas de diseño del tragaluz principal del atrio

Nadie quería que el diseño de la estructura cuidadosamente oculto desapareciera bajo la protección contra la corrosión. Por esta razón, todo el techo estaba hecho de acero inoxidable: las lamas con sus secciones transversales estándar de 60 x 40 milímetros, los cables de las ruedas con radios con diámetros de 14 y 20 milímetros; así como los juntas. Utilizando chorros de agua a alta presión, estos se cortaron en forma de estrella a partir de láminas de hasta 70 milímetros de grosor y se cortaron a la medida en dos etapas utilizando máquinas de corte de cinco ejes fabricadas por CNC.



Fig. 71 Diferentes formas de rigidizadores de ruedas pretensadas





La representación, el cálculo y la producción del techo solo fueron posibles gracias al cálculo por ordenador. Aquí, Schlaich se enfrentó a la inevitable preocupación de que en una época en la que todo era posible y la tecnología de producción ya no estaba sujeta a ninguna forma de disciplina (como fue el caso en épocas anteriores con ladrillos y tatamis), el diseño y el proceso de construcción invariablemente involucraría el caos. Que esos temores no se conviertan en realidad se evidencia en el trabajo de los tragaluzes de DZ Bank, que se desarrollaron junto con un arquitecto que no necesariamente se consideraba como un constructor. Según Schlaich, los tragaluzes fluyen armoniosamente, de hecho, son hermosos "a pesar" de esto, o tal vez por esta misma razón.

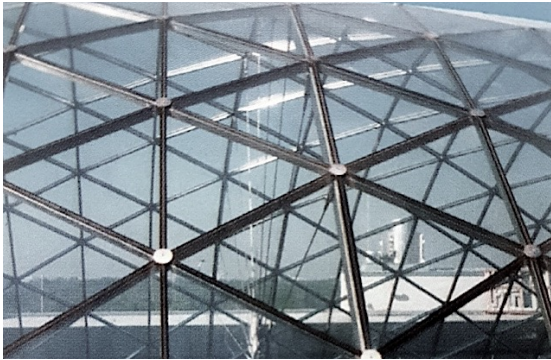


Fig. 72 Vista de la cubierta



Fig. 73 Detalle junta

### PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA SALA DE CONFERENCIAS [25](#)

La forma de la sala de conferencias, de 29 metros de largo, 12 de ancho y 10 de alto, se derivó de un modelo físico que luego se escaneó en un modelo de superficies tridimensionales con el software CATIA. Su estructura está formada por una secuencia de vigas de hierro conformadas según las secciones del volumen, dispuestas a intervalos regulares de 80 cm y conectadas por travesaños tubulares de 10 cm. Las imágenes de sus fases de construcción realzan el carácter y recuerdan los grandes esqueletos osteológicos de animales antiguos.

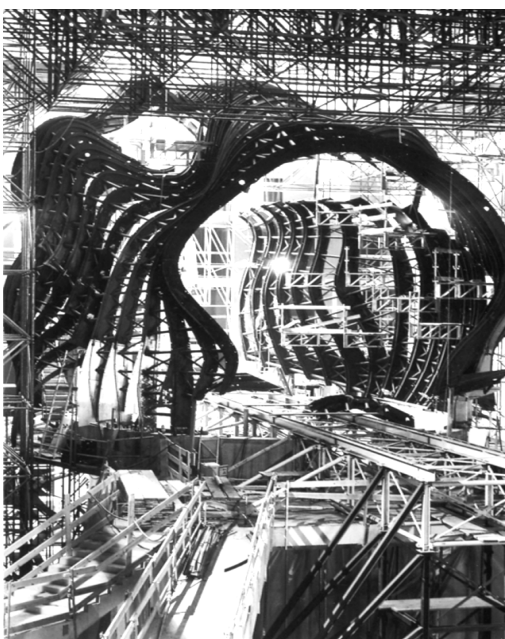


Fig. 74 Construcción del esqueleto de madera



Fig. 75 Colocación de los paneles de acero inoxidable

Por encima de los "huesos", la "carne" está formada por gruesos paneles aislantes, recubiertos con más de 100 placas curvas tridimensionales de acero inoxidable de aproximadamente 150x250 cm. Es un tejido nervioso en movimiento, atravesado por una tensión que culmina en la cavidad del ojo, como una herida infligida en el lado derecho de la cabeza, causada por la sustracción de una lámina del recubrimiento.

Pasando nuestra atención del objeto al espacio arquitectónico de la corte en la que se inserta, se puede ver como Gehry utiliza la técnica de composición que una forma compleja, cuando se coloca en un contenedor simple, aumenta su poder expresivo. Es difícil, de hecho, imaginar este edificio sin la "cabeza de caballo" dentro. Aunque desde el punto de vista funcional no cambiaría mucho, las formas de los otros elementos arquitectónicos, que dependen de él, no tendrían ningún sentido: no cubrirían ni el piso, cuyas líneas no encontrarían ninguna justificación.

## RESULTADO FINAL

*"Si tratas de entender mis edificios de acuerdo con el punto de vista de la perspectiva, la coherencia estructural o las definiciones formales, sin duda estarás decepcionado".*

*(Frank O. Gehry)*



Fig. 76 Vista interior del edificio



Fig. 77 Vista exterior del edificio con la puerta de Brandemburgo



Fig. 78 Construcción del esqueleto de madera



Fig. 79 Colocación de los paneles de acero inoxidable



### 3.3 Tensoestructuras cable-membrana

Las estructuras de cables pretensados abarcan un amplio número de materiales con los que se pueden construir, el problema de éstas es que necesitan ser ancladas por grandes cimientos y utilizar gran número de cables finos, que requiere mucha cantidad de abrazaderas, además de un posterior recubrimiento, lo que eleva el presupuesto de este tipo de construcciones.

Luego existen las cubiertas de membrana, que son ideales para áreas medianas pero su uso está restringido ya que su resistencia a tracción es limitada y su resistencia a rotura es prácticamente nula.

“Es por esto por lo que las tensoestructuras cable-membrana combinan las mejores características de los dos anteriores sistemas: consisten en una estructura primaria de malla hecha con anillos sellados, auto-anclados, de compresión y tracción reforzados con cables y una estructura de membrana pretensada”<sup>28</sup>.

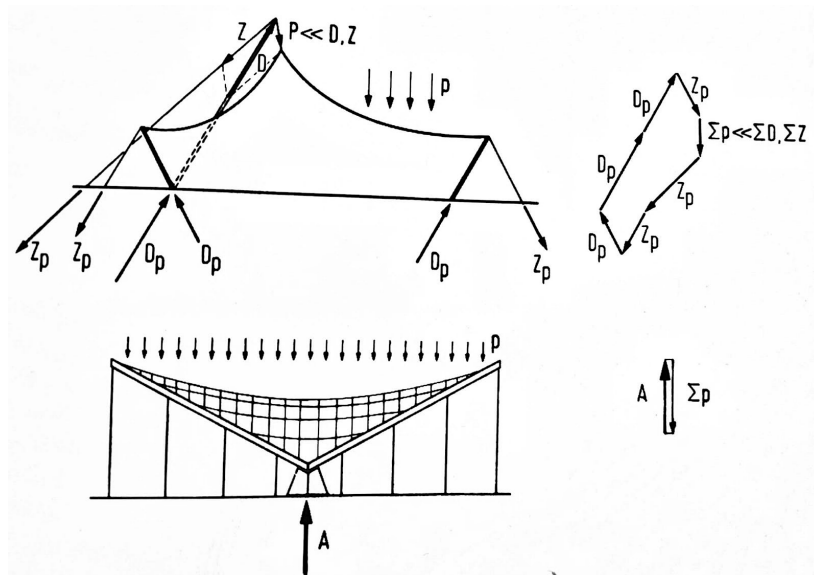


Fig. 80 En las estructuras ancladas en la parte trasera las fuerzas de anclaje superan con creces las cargas

Fig. 81 En las estructuras auto-ancladas las fuerzas de soporte son iguales a las cargas

“Ésta solución resulta idónea para proyectos de cubrición de estadios, ya que su ligereza los hace ser mejores frente a cualquier estructura de celosía, sobre todo en estadios de tamaño entre 250 y 300 metros de ancho y con una profundidad del perímetro al centro del campo de hasta 70 metros”<sup>28</sup>

Utilizando los principios del autoanclaje nos permite ahorrar en cimentaciones muy costosas y pesadas, sin embargo, limita la variedad de formas disponibles, para poder soportar las altas fuerzas de compresión del autoanclaje.

Un requisito indispensable para este tipo de estructuras es que los anillos de los que están formadas tienen que estar totalmente sellados, de esta forma serán capaces de soportar su propio peso y las cargas de nieve y viento.

Para poder construirlas necesitamos dos anillos de compresión con puntales de acoplamiento junto con un anillo de tracción pretensado en el interior, o por el contrario un solo anillo de compresión en el exterior y dos anillos de tracción pretensados en el interior, separados por puntales. Los anillos de tracción y compresión se unirán por medio de “ radios “ que equilibran las fuerzas desviadas.

Cómo estos radios también deben estar pretensados, sus cuerdas inferiores y superiores pueden ser cables, además el espacio entre estos cables no debe ser muy grande para poder ser cubiertos por una estructura de membrana pura (Estadio de la Cartuja, Sevilla) o una estructura de membrana soportada por un arco (Stuttgart).

El pretensado sirve para limitar la deformación y la oscilación del techo, además de movimientos en los anillos causados por cargas externas. Los cables que forman los radios, no solo transfieren las cargas a la compresión de los anillos, sino que al igual que en la rueda de una bici, también estabilizan la estructura frente a un posible colapso, hacen que el sistema se mantenga rígido.

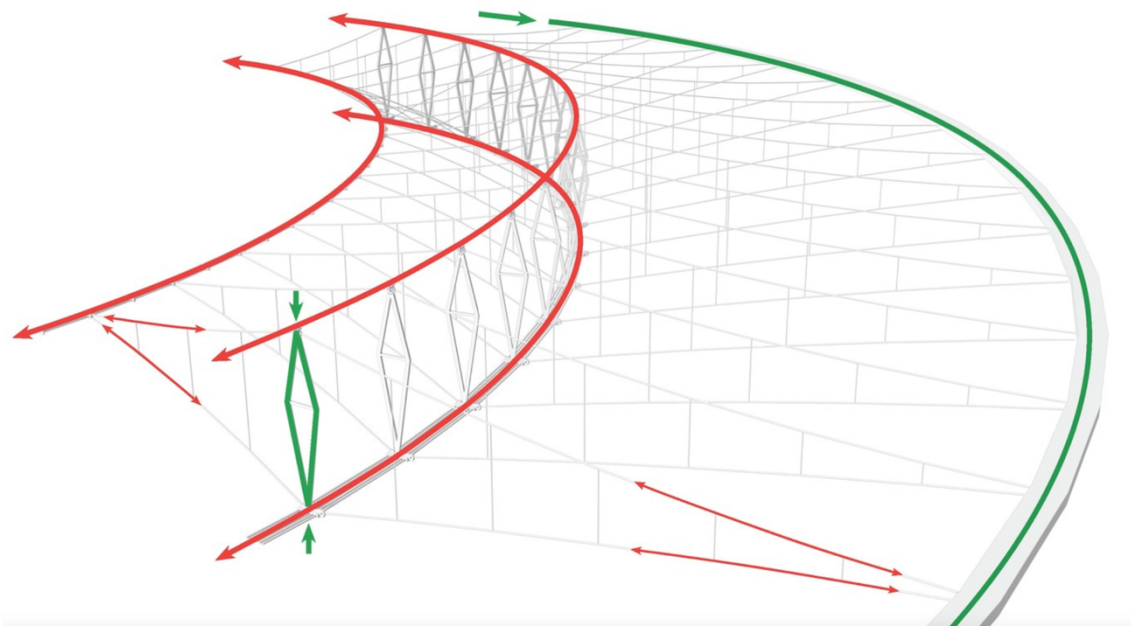


Fig. 82 Funcionamiento del principio de "la rueda de bicicleta"



Fig. 83 y 84 Imágenes de la cubierta del Estadio Olímpico de la Cartuja



## LA CUBIERTA DEL ESTADIO GOTTLIEB DAIMLER EN STUTTGART (ACTUAL MERCEDES BENZ ARENA)

El Neckar Stadium, construido en 1933 por Paul Bonatz en el distrito de Bad Cannstatt de Stuttgart, y más tarde rebautizado como Gottlieb Daimler Stadium, es también el estadio de la Bundesliga alemana (primera división) del equipo soccer VfB Stuttgart. El estadio fue renovado para los Campeonatos Mundiales de Atletismo de la IAAF de 1993. Esto incluyó techar sobre las gradas alrededor del estadio para 55,000 espectadores.



### HISTORIA <sup>29</sup>

Inaugurado en 1933 es un estadio que poco a poco se ha ido remodelando hasta alcanzar un aspecto moderno, sin que acuse los años que lleva en pie. Ya en sus primeros años, sus dimensiones le colocaban entre los grandes estadios europeos.

Como muchos otros edificios alemanes, sus orígenes estuvieron fuertemente vinculados con el nazismo, de hecho originalmente el campo se llamaba Estadio Adolf Hitler. Tras la segunda Guerra Mundial, el recinto cambió varias veces de nombre, primero en 1945 se llamó Century Stadium, posteriormente en 1949 Neckarstadion ( en honor al río Neckar que cruza la ciudad), desde 1993 se llamó Daimler- Stadion ( homenajeando al célebre ingeniero alemán ) hasta que actualmente recibe el nombre de una firma comercial, Mercedes Benz Arena.

El estadio ha vivido importantes episodios deportivos de relevancia socio-política. Aquí se disputó el primer partido tras la Segunda Guerra Mundial y también fue donde jugó la selección alemana su primer partido tras la caída del Muro de Berlín y ser una Alemania reunificada. También ha sido sede en los Mundiales de 1974 y 2006.



Fig. 85,86 y 87 Evolución del estadio , años 1933-1950-1974 ( de izquierda a derecha )

Tras el mundial de 2006 se decidió eliminar la pista de atletismo con la que contaba, lo que conllevó la remodelación de los dos fondos del estadio ya que tenían la curvatura característica de este tipo de infraestructura.

### CUBIERTA DEL ESTADIO 30

En 1993 , con motivo de los Campeonatos Mundiales de Atletismo, el estadio se sometió a un proceso de renovación el cuál incluyó cubrir las gradas , lo que daría cobijo a más de 55000 espectadores.

La cubierta resultante fue una estructura flotante, ligera, con una curvatura característica , de grandes dimensiones (34000 m<sup>2</sup>) y altura; lo que conllevó a que se convirtiera en un punto de atracción desde cualquier punto de la ciudad.

#### Elementos

La cubierta está formada por varios elementos: la estructura de cable y la membrana

- La estructura de cable

Fue el primer estadio en usar este tipo de cubrición y desde entonces se ha copiado y mejorado en múltiples ocasiones.

La techumbre tiene un peso medio de solo 13 kg/m<sup>2</sup> , algo esencial y necesario teniendo en cuenta las condiciones dadas.

El terreno disponible fuera del estadio era muy limitado, apenas unos pocos metros en algunos lugares, por lo que un anclaje trasero ( como el que existe en la cubierta del Estadio Olímpico de Múnich ) no podría llevarse a cabo. Así se decidió prescindir de esas grandes, pesadas y costosas cimentaciones y tuvo un efecto muy positivo sobre el proyecto , disminuyó el presupuesto y además rebajó el tiempo de construcción, ya que en tan solo 18 meses estuvieron listos para el diseño y la construcción.

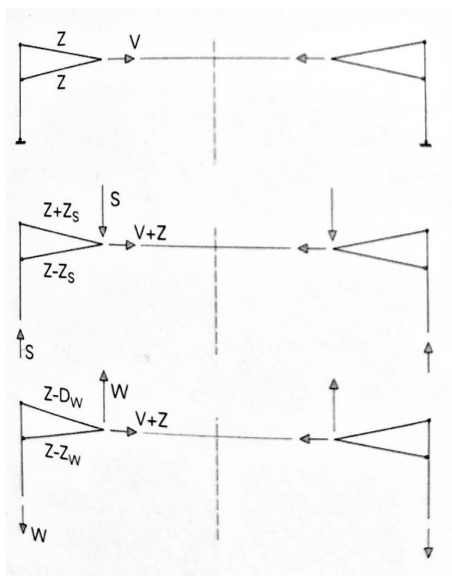
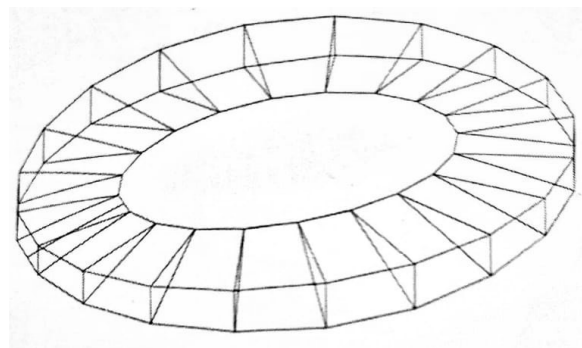


Fig. 88 Sistema de carga ( Izq.)

Fig. 89 Esquema del sistema de anillos (abajo)



La estructura de cable estaba compuesta por dos anillos de compresión y uno de tracción, de 280 y 200 metros respectivamente, que siguen la forma ovalada del estadio existente y descansan sobre 40 columnas equidistantes

El anillo de tracción interna de 8 cables ( cada uno de 79 milímetros de diámetro) , y los dos anillos de compresión están conectados por 40 vigas de cable presentadas radiales, cuyos cables inferiores llevan la lámina del techo.

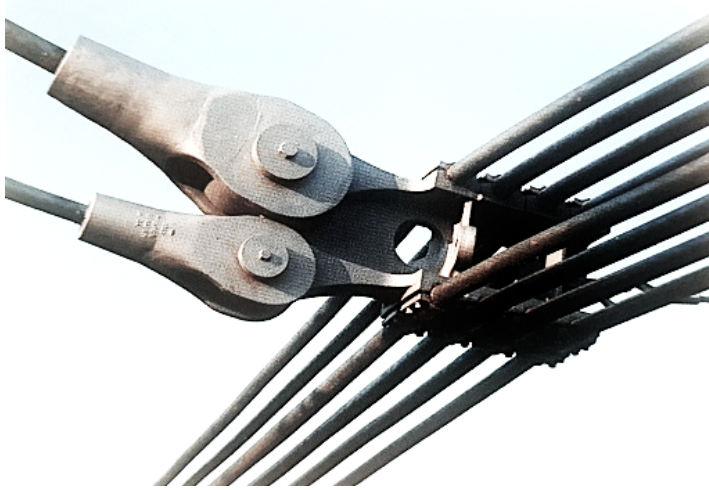


Fig. 90 Unión entre una viga de cable y el anillo

La membrana está soportada por 7 arcos paralelos que tienen siguen la forma circunferencial. Éstos arcos transfieren su carga al cable más bajo, al punto donde éste último está conectado al cable de alimentación. Estos arcos no solo sostienen la membrana sino que también están estabilizados contra el pandeo de ella, por lo que 200 milímetros de diámetro son suficientes pese a tener una luz de 20 metros.

De acuerdo con los principios de autoanclaje, las fuerzas de los anillos de compresión deben ser constantes e iguales a las del anillo de tracción.

A través de la variación de los anillos de compresión ( varían de 104 metros en las secciones curvas a 248 metros en las rectas), las fuerzas de desviación también varían, como consecuencia el pretensado que de las vigas de cable en las secciones curvas debe ser mayor que el de las rectas.

Es por ello que el anillo de compresión tuvo que dividirse en dos con diagonales entre ellos para formar una celosía y proporcionar suficiente resistencia a flexión.

Al diseñar el techo, se tomaron en cuenta la adición posterior, ahora compilada de un segundo nivel de asientos sobre el soporte principal y una extensión del soporte opuesto (ahora en los paneles de rastreo). Por esta razón, la altura a la que se encuentran los anillos de compresión varía, y, como corresponde, se reduce, también la del anillo de tracción. El anillo de compresión superior reacciona a sus puntos más altos 47 metros por encima del nivel de juego sobre el soporte principal y 39 metros por encima del campo de juego sobre la recta posterior. Los puntos más bajos se encuentran a una altura de 28 metros por encima de los dos picos de las curvas. La distancia entre los anillos de compresión, y por lo tanto la altura estructural de los vigas de cable, varía entre 12 metros en las secciones curvas y 18 metros en la recta secciones De esta manera, el borde superior atractivamente ondulado tiene un efecto secundario benéfico.

Todo el techo está estabilizado por curvatura anticlástica, y los conductores de cable de mayor altura significan menos esfuerzo del cable con cargas iguales. La tensión estructural del cable se reduce en gran medida, especialmente en lugares donde la curvatura baja permite acomodar cargas menores en otras palabras, en las rectas. Al mismo tiempo, esta forma de techo tiene la ventaja de que el agua dulce se filtra en el drenaje a lo largo del cable interior por sí mismo.



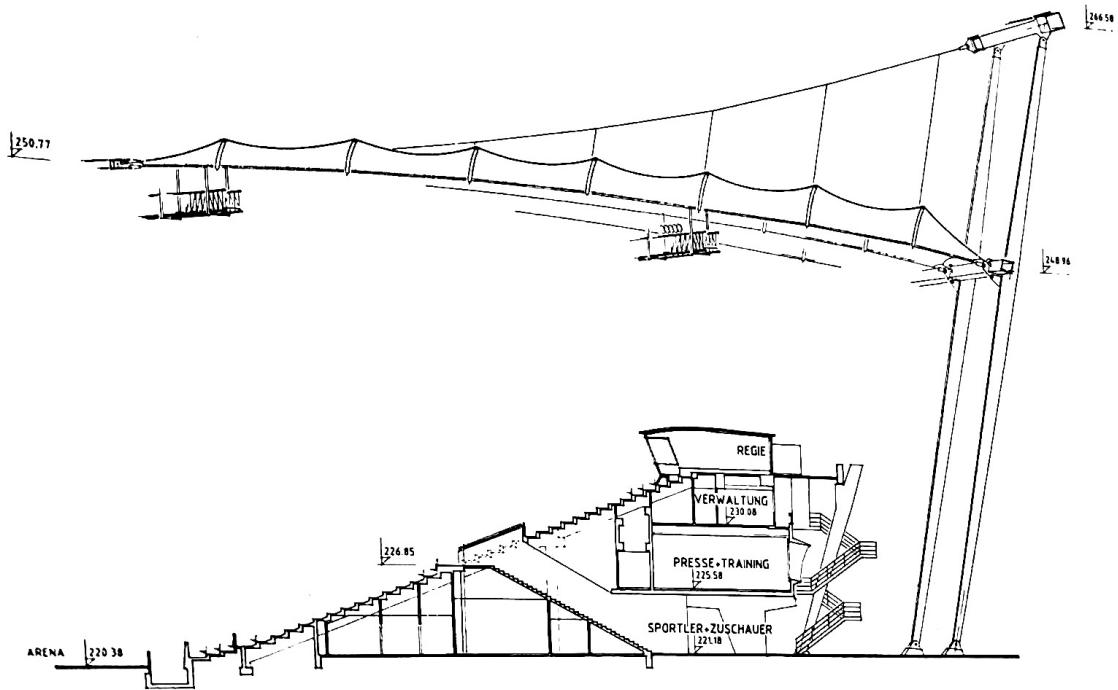


Fig. 91 Sección transversal

- La membrana

Las cosas casi se vuelven muy diferentes. Por razones financieras, las autoridades municipales de Stuttgart antes planearon un techo de chapa corrugada, que habría sido de 1 a 2 millones de euros más barato, en lugar de la cubierta de la membrana. En una reunión memorable, Schlaich acaba de vincular los costos adicionales de la membrana con los ahorros en la protección policial "... porque los alrededores ligeros y brillantes son ideales para reducir la agresión y evitar disturbios". Convencidas, las autoridades acordaron el techo de la membrana.

La membrana permeable a la luz de fibra de poliéster recubierta de PVC filtra la luz del sol, creando un interior luminoso y brillante a pesar de la profundidad del techo de hasta 58 metros.

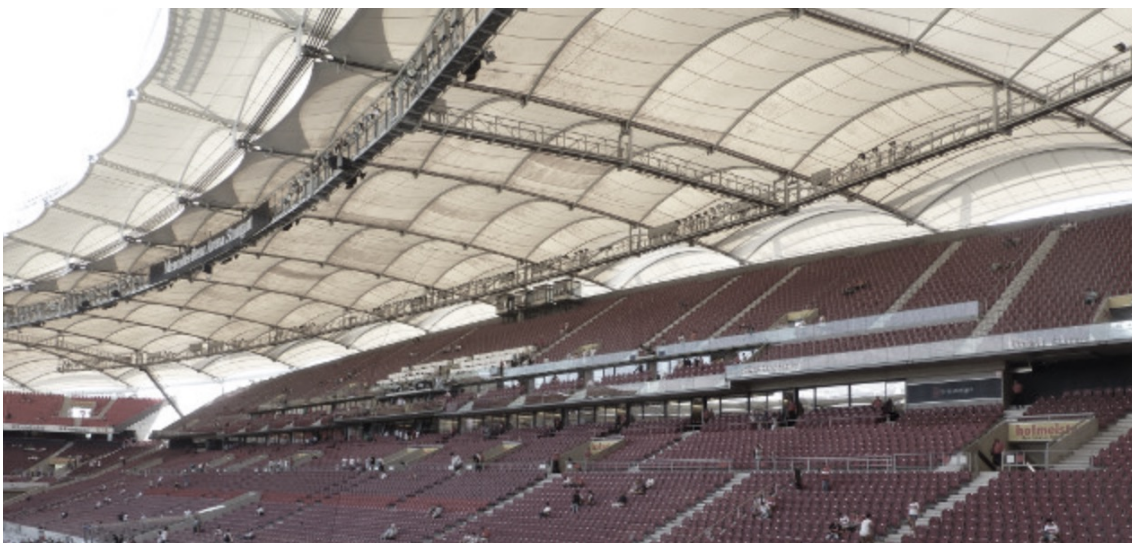


Fig. 92 Imagen de las membranas colocadas en su posición final

## EL PROCESO CONSTRUCTIVO [30](#)

La estructura entera no solo debía completarse en un espacio de tiempo muy corto, sino también con cualquier interrupción a los juegos jugados en la liga alemana de fútbol. Lo que nadie se había preocupado de hacer con el gran cable de anillo sobre el Estadio Olímpico de Múnich se puso en práctica ahora metódicamente: el cable del anillo interior se colocó en la pista de atletismo del estadio y se unió a las vigas de cable. Estos habían sido suspendidos de los anillos de compresión utilizando cables de erección y, por último, estaban sobre los soportes. Utilizando 40 gatos hidráulicos en la posterior viga de cableado, anclas de poleas, toda la estructura se hizo rodar uniformemente y se fijó firmemente en posición después de solo tres semanas.



Fig. 93 El anillo dispuesto sobre la pista de atletismo

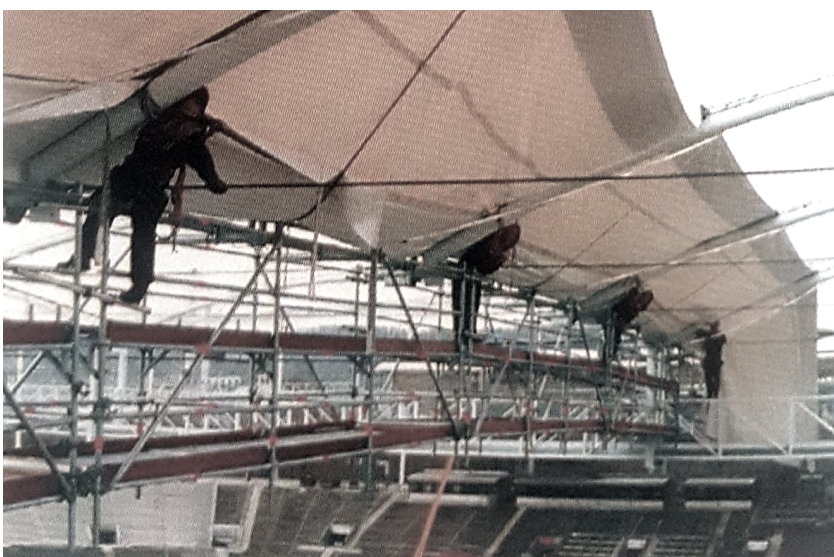


Fig. 94 Instalación de la membrana



## EI RESULTADO FINAL

Este tipo de cubierta ha sido pionera y un ejemplo para posteriores estadios en todo el mundo. Actualmente sigue estando en perfectas condiciones y el Mercedes Arena de Stuttgart continúa siendo uno de los estadios más importantes del país.



Fig. 95 Imagen del ambiente durante el Campeonato del Mundo de Atletismo de 1993



Fig. 96 Imagen del estado del estadio en la actualidad

## 4. DIÁLOGO INGENIERO-ARQUITECTO

Frank Lloyd Wright <sup>31</sup> en una entrevista habló de la ausencia de conflicto entre la ingeniería y la arquitectura. Explicó que no entendía a aquellos que se aferraban a un único estilo arquitectónico cuando no había ninguna razón para hacerlo y que las nuevas formas y avances que se producían en el campo de la arquitectura eran a consecuencia de nuevas técnicas en la ingeniería.

Las grandes obras de la arquitectura, incluidas muchas de las que aparecen en éste trabajo, son conocidas por su arquitecto, autor de la idea y director del proyecto, pero para poder hacer realidad sus ideas en muchas ocasiones cuentan con la ayuda de ingenieros, que aplicando sus conocimientos consiguen hacer de lo imposible posible, sin ellos muchas de las obras maestras que conocemos no existirían y sin embargo su trabajo está muy infravalorado.

La idea que se tiene de los ingenieros dentro de un proyecto arquitectónico es como el que está en un segundo plano, que se encargan de la parte "menos bonita" del proceso de creación. Sin embargo el papel de los ingenieros requiere de mucha responsabilidad ya que de ellos depende la seguridad pública y por lo tanto sus decisiones tienen un gran peso.

Éste apartado del trabajo tiene como finalidad hablar del trabajo interdisciplinar, no querer poner por encima a ninguno de los integrantes de un proyecto arquitectónico, sino de darnos cuenta de que cuando muchas personas trabajan con una misma finalidad, el trabajo suma, se hace más rico ya que los conocimientos de cada uno se complementan con las carencias de los otros y se llegan a resultados mucho mejores.

Arquitectos e ingenieros no son tan diferentes, el diseño y el pensamiento lógico son las bases de ambas disciplinas. En países como Japón, los estudiantes de arquitectura e ingeniería comienzan estudiando juntos, y no es hasta una etapa muy avanzada de los estudios cuando deciden por qué rama continuar.

Los ingenieros a veces parecen estar dentro de una aburrida estética minimalista, ignorando las múltiples posibilidades visuales que pueden ofrecerse, así como los arquitectos continúan construyendo de manera más dura sin abrirse a las nuevas posibilidades en los materiales y técnicas constructivas.

Es así como los arquitectos no solo necesitan a los ingenieros para los cálculos estructurales, sino también para la estética de sus edificios. Edificios como el Cristal Palace del siglo XIX, las estructuras de membrana, las láminas delgadas de hormigón, las estructuras híbridas... han sido obras de ingenieros que posteriormente le abrieron un mundo de posibilidades a los arquitectos, son la vanguardia oculta dentro del diseño arquitectónico.

Un proyecto arquitectónico es algo muy complejo que una persona sola es imposible que pueda llevar a cabo, es por ello que requiere mucho diálogo entre clientes, arquitectos, ingenieros, paisajistas, constructores.. y poniendo en común las ideas y conocimientos de todas las partes es cuando realmente podremos llegar a los mejores resultados.

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto es el de ofrecer un estudio detallado sobre las estructuras ligeras, sus características y aplicaciones en la arquitectura actual.

En primer lugar, se ha explicado qué son, presentando el concepto y exponiendo sus características más distintivas así como sus aplicaciones.

Tras ello se ha trazado un recorrido histórico, lo que ha permitido observar la evolución de estas estructuras a lo largo de la historia. Figuras como el arquitecto alemán Frei Otto o Félix Candela han sido determinantes en la evolución y desarrollo de las estructuras ligeras tal y como la conocemos hoy en día.

Posteriormente hemos explicado las ventajas de la utilización de estas estructuras y lo beneficiosas que resultan para la sociedad.

Tras ello, hemos procedido a una breve presentación del hombre protagonista de este trabajo, Jörg Schlaich, haciendo un breve repaso por su trayectoria profesional, analizando su metodología de trabajo y nombrando algunas de sus obras más destacadas.

Y por fin llegamos al cuerpo principal, el apartado que le da nombre a este escrito, las propiedades de las estructuras ligeras por Jörg Schlaich, analizándolas una a una y explicándolas detalladamente.

Por último, se desarrollan tres tipos diferentes de estructuras ligeras ( Redes de cables, membranas de celosía y tenso estructuras cable-membrana) y junto a cada una de ellas se explica un proyecto en el que se encuentren. En cada proyecto se explica algo de su historia, su proceso de diseño, el proceso constructivo y todos los aspectos que son necesarios para comprenderlos.

Así pues, tras observar y analizar el proyecto en su totalidad, podemos concluir que:

- Las estructuras ligeras, son sin lugar a duda, uno de los mayores avances que se ha realizado en el ámbito de la ingeniería en los últimos años.
- Éstas estructuras cuentan con ilimitadas posibilidades y se están convirtiendo en una opción de presente y de futuro debido a sus sobresalientes características técnicas, económicas y ecológicas.
- Las estructuras ligeras pueden adaptarse sin dificultad a edificios ya existentes, mejorando sus virtudes o añadiendo nuevas funciones a los mismos. Además, gracias a su estética y diseño orgánico mejoran la calidad del entorno urbano.
- El diálogo entre ingenieros y arquitectos desde la primera fase de proyecto resulta algo fundamental ya que permiten que la estructura forme parte de la idea y no sea un añadido posterior.

- Los avances en nuevos materiales amplían enormemente las posibilidades de construcción y diseño de nuevas estructuras. Esta evolución se debe en gran medida a los avances en la fabricación de fibras de alta resistencia y al desarrollo de herramientas y programas informáticos para el diseño de estructuras no convencionales.
- Detrás de cada gran proyecto de arquitectura, suele encontrarse un ingeniero de estructuras , que permite que las ideas del arquitecto se lleven a cabo y pese a su importancia en los proyectos, muchas veces quedan en un segundo plano

En la actualidad, estamos siendo testigos de la continua evolución de las estructuras ligeras, con formas y características cada vez más innovadoras. Gracias a los avances técnicos y materiales se ha podido llevar a cabo la construcción de cubiertas que años atrás resultaban imposibles de concebir debido a las limitaciones tecnológicas.

La sociedad evoluciona y con ella sus edificios y estructuras. Los ejemplos puntuales de estructuras ligeras que día a día observamos sin prestarles demasiada atención se harán cada vez más comunes. La construcción de estructuras de cobertura ligeras es el futuro y ahora contamos con las técnicas y materiales adecuados para desarrollarlas de manera estable y segura. Sin duda, un prometedor futuro espera para las estructuras ligeras en el horizonte próximo.



## 5. CITAS

- 1- SONGEL, JM. Frei Otto, Premio Pritzker de Arquitectura 2015: Construcción ligera y estructuras naturales.  
<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4246/4914>
- 2- SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 298-310
- 3- El puente de Tacoma Narrows, que fue construido en el año 1940 , se convirtió tempranamente en uno de los más famosos de la historia, pero no precisamente por su belleza o su tamaño. Con una longitud de 1600 metros y construido con vigas de acero ancladas a grandes bloques de hormigón, era el tercer puente colgante más grande del mundo cuando se inauguró, muy cerca de la ciudad estadounidense de Seattle. El 7 de noviembre de 1940 , pasado solo unos pocos meses desde la inauguración del nadie podía esperarse lo que ocurriría. Con un viento de alrededor de 65 kilómetros por hora que soplaba de manera constante, el puente comenzó a moverse peligrosamente y a oscilar como si se tratara de una bandera, lo cual llamó poderosamente la atención de los que estaban viendo semejante espectáculo. Tras poco más de una hora en esta situación de vaivenes y sacudidas, el puente se desmoronó y cayó hecho pedazos al agua. Afortunadamente no hubo que lamentar la pérdida de ninguna vida.
- 4- SCHLAICH, J Y SCHLAICH M." Lightweight structures".  
<https://architecture.mit.edu/sites/architecture.mit.edu/files/attachments/lecture/LightweightStructures.pdf>
- 5 - ENGEL, E (2001). *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili. Pág. 60-61 y 215
- 6- Félix Candela Outeriño nació en Madrid el 27 de enero de 1910. En 1927, cinco años después de que se hubiera construido la primera estructura laminar de hormigón armado en Jena, Félix Candela inició sus estudios en la facultad de Ciencias de la Universidad Central de Madrid, como formación obligatoria previa a su ingreso en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, perteneciente a la actual Universidad Politécnica, en la cual se licenció como arquitecto en el año 1935.
- 7 y 8 - CASSINELLO, P, SCHLAICH, M Y TORROJA, J.A. (2010) "*Félix Candela. En memoria (1910-1997). Del cascarón a las estructuras ligeras del s. XXI*"
- 9 y 10 - MAS GUINDAL, A Y ADELL, J (2005) "*Eladio dieste y la cerámica estructural de Uruguay*" en *Informes de la Construcción*, Vol. 56, nº496, marzo-abril 2005.
- 11 - Frei Otto es uno de los arquitectos más renombrados del siglo XX y todavía en actividad en el XXI; es la más grande autoridad en estructuras tensadas y de membrana de bajo peso, y ha encabezado avances en matemática estructural e ingeniería civil.
- 12 - SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 298-310
- 13 - Bibliografía y currículum completo en SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 311
- 14 - SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 298-310



15 Y 16 - SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 301 Y 303

17 - SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 303

18 - SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 303-305

19 - SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 306

20 - SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 96

21 - SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 114 Y 115

22- SCHMIDT, W (1973). "Cubierta del Estadio Olímpico en Múnich" en *Informes de la Construcción*, Vol. 25, nº248.

23- [www.world-of-plexiglas.com](http://www.world-of-plexiglas.com)

<https://www.world-of-plexiglas.com/es/estadio-olimpico-munich-plexiglas-carpa/>

24 - SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel.. Pág. 14-115

25- [www.festivalarchitettura.it](http://www.festivalarchitettura.it)

[http://www.festivalarchitettura.it/festival/En/Magazine\\_Detail.asp?ID=198&pmagazine=2](http://www.festivalarchitettura.it/festival/En/Magazine_Detail.asp?ID=198&pmagazine=2)

26-[www.plataformaarquitectura.cl](http://www.plataformaarquitectura.cl)

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/888555/edificio-bancario-dz-gehry-partners>

27- SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 126-130

28- SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 152-153

29- [www.ecured.cu](http://www.ecured.cu)

[https://www.ecured.cu/Mercedes-Benz\\_Arena](https://www.ecured.cu/Mercedes-Benz_Arena)

30 - SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 156-163.

31 – Frank Lloyd Wright, maestro diseñador, estudió arquitectura e ingeniería, la cuál dejó a tan solo tres meses de graduarse.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- AJGARLAG . *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/> [consulta: 20 Agosto 2018]
- ARRANZ,F (2005).*Apuntes de arquitectura*. Buenos Aires: Nobuko
- BERGER, H (1996). *Light structures-structures of light : the art and engineering of tensile architecture*. Basel: Birkhäuser
- CAMPBELL-DOLLAGHAN, K. *9 Buildings By Frei Otto, the Architect Who Engineered the Future*  
<https://gizmodo.com/the-best-of-frei-otto-the-architect-who-engineered-the-1690783540>[consulta: 20 Agosto 2018]
- CASSINELLO, P, SCHLAICH, M Y TORROJA, J.A. (2010) "*Félix Candela. En memoria (1910-1997).Del cascarón a las estructuras ligeras del s. XXI*"
- CONDE DUQUE. *Félix candela, la conquista de la esbeltez* [https://issuu.com/wielandescobar/docs/felix\\_candela\\_la\\_conquista\\_de\\_la](https://issuu.com/wielandescobar/docs/felix_candela_la_conquista_de_la) /12 [consulta: 12 Agosto 2018]
- CORDERO TORAL, F (2014). *Arquitectura de un futuro pasado. Estudio comparativo entre diferentes sistemas constructivos de bóvedas*. Trabajo final de Máster. Valencia: Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- DETAIL (2004). Vol.4, Cubiertas. Bilbao: Reed Business Information
- ENGEL, E (2001). *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili.
- ERCO GMBH. *Proyectos-Work- DZ BANK, berlin Branch* <https://www.erco.com/projects/work/dz-bank-berlin-branch-1232/es/> [consulta: 23 Agosto 2018]
- EVONIK INDUSTRIES . *Flotante y transparente: el techo del Estadio Olímpico* <https://www.world-of-plexiglas.com/es/estadio-olimpico-munich-plexiglas-carpa/> [consulta: 20 Agosto 2018]
- FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, A (2017). *Arquitectura deportiva. Cubiertas simbólicas, experiencias memorables*. Trabajo Fin de Grado. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura

- FUNDACIÓN JOSÉ ENTRECANALES IBARRA .Premio Ingeniería Civil 2006 - Jörg Schlaich <http://www.fentrecanalesibarra.es/portfolio-items/jorg-schlaich/> [consulta: 14 Agosto 2018]
- JORDÁ, C (2016). "FORMAS , cultura técnica y expresión arquitectónica" en revista de expresión gráfica arquitectónica . Vol 21, nº 28 , pág. 100-113.
- MARÍN, A Y BARLUENGA, G (2015) " Eladio Dieste y la cerámica armada: La forma de lo resistente" en Arquitecturas del Sur. Vol. 32, Nº 45, Pág. 90-103.
- MAS GUINDAL, A Y ADELL, J (2005) " Eladio dieste y la cerámica estructural de Uruguay" en Informes de la Construcción, Vol. 56, nº496, marzo-abril 2005.
- NAVAS, A. El Bayern, y la hermosa teoría matemática que inspiró el Olímpico de Múnich <http://www.elmostrador.cl/cultura/2016/04/26/el-bayern-y-la-hermosa-teoria-matematica-que-inspiro-el-olimpico-de-munich> /[consulta: 21 Agosto 2018]
- ROBBIN, T (1996). *Engineering a New Architecture*. Leominster, Massachusetts: Quebecor – Eusey Press
- ROLAND,C (1973). *Frei Otto. Estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili.
- SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel.
- SCHLAICH BERGERMANN UND PARTNER et al. (2011). *Estructuras ligeras: Schlaich Bergermann und Partner : Madrid 2011*. Madrid: Mairea
- SCHLAICH, M (2016) "Homage - source of inspiration" <https://www.sbp.de/en/themes/elegance/> [consulta: 11 Agosto 2018]
- SCHMIDT, W (1973). "Cubierta del Estadio Olímpico en Múnich" en Informes de la Construcción, Vol. 25, nº248.
- SONGEL, JM (2008). *Frei Otto. Conversación con Juan María Songel*. Barcelona: Gustavo Gili.
- ROJAS, S. *Caso Estudio Estadio Olímpico de Munich / Frei Otto - Proyecto Stuttgart 21 - Sagrada Familia /A.Gaudi - Casiopea* [https://wiki.ead.pucv.cl/Caso\\_Estudio\\_Estadio\\_Olimpico\\_de\\_Munich\\_/Frei\\_Otto\\_-\\_Proyecto\\_Stuttgart\\_21\\_-\\_Sagrada\\_Familia\\_/A.Gaudi](https://wiki.ead.pucv.cl/Caso_Estudio_Estadio_Olimpico_de_Munich_/Frei_Otto_-_Proyecto_Stuttgart_21_-_Sagrada_Familia_/A.Gaudi) [consulta: 20 Agosto 2018]

## IMÁGENES

### 1.INTRODUCCIÓN

### 2.PRINCIPIOS TEÓRICOS

Figura 1. FUENTE: ENGEL, E (2001). *Sistemas de estructuras*. Pág. 112

Figura 2. FUENTE: ENGEL, E (2001). *Sistemas de estructuras*. Pág. 112

Figura 3. FUENTE: ENGEL, E (2001). *Sistemas de estructuras*. Pág. 112

Figura 4. FUENTE: SCHLAICH, J Y SCHLAICH M." Lightweight structures".

<https://architecture.mit.edu/sites/architecture.mit.edu/files/attachments/lecture/LightweightStructures.pdf>

Figura 5. FUENTE: CASSINELLO, P, SCHLAICH, M Y TORROJA, J.A. (2010) "*Félix Candela. En memoria (1910-1997).Del cascarón a las estructuras ligeras del s. XXI*" Pág. 6

Figura 6.FUENTE: CASSINELLO, P, SCHLAICH, M Y TORROJA, J.A. (2010) "*Félix Candela. En memoria (1910-1997).Del cascarón a las estructuras ligeras del s. XXI*" Pág. 8

Figura 7. FUENTE: www. Arquiscopio.com

<http://arquiscopio.com/archivo/2013/02/02/hangares-para-dirigibles-de-orly/>

Figura 8. FUENTE: www.minube.com

<https://www.minube.com/fotos/rincon/1637>

Figura 9. FUENTE: www.explorations-architecturales.com

[http://www.explorations-architecturales.com/data/new/ficheSimple\\_89.htm](http://www.explorations-architecturales.com/data/new/ficheSimple_89.htm)

Figura 10. FUENTE: CASSINELLO, P, SCHLAICH, M Y TORROJA, J.A. (2010) "*Félix Candela. En memoria (1910-1997).Del cascarón a las estructuras ligeras del s. XXI*" Pág. 9

Figura 11. FUENTE: CASSINELLO, P, SCHLAICH, M Y TORROJA, J.A. (2010) "*Félix Candela. En memoria (1910-1997).Del cascarón a las estructuras ligeras del s. XXI*" Pág. 9

Figura 12. FUENTE: CASSINELLO, P, SCHLAICH, M Y TORROJA, J.A. (2010) "*Félix Candela. En memoria (1910-1997).Del cascarón a las estructuras ligeras del s. XXI*" Pág. 9

Figura 13. FUENTE: CASSINELLO, P, SCHLAICH, M Y TORROJA, J.A. (2010) "*Félix Candela. En memoria (1910-1997).Del cascarón a las estructuras ligeras del s. XXI*" Pág. 13

Figura 14. FUENTE: www.45gradosmtly.wordpress.com

<https://45gradosmtly.wordpress.com/2015/10/06/arquitectura-regiomontana-san-jose-obrero/>

Figura 15. FUENTE: MAS GUINDAL, A Y ADELL, J (2005) "*Eladio dieste y la cerámica estructural de Uruguay*" en *Informes de la Construcción*, Vol. 56, nº496, marzo-abril 2005. Pág. 16

Figura 16. FUENTE: MAS GUINDAL, A Y ADELL, J (2005) "*Eladio dieste y la cerámica estructural de Uruguay*" en *Informes de la Construcción*, Vol. 56, nº496, marzo-abril 2005. Pág. 17

Figura 17. FUENTE: MAS GUINDAL, A Y ADELL, J (2005) "*Eladio dieste y la cerámica estructural de Uruguay*" en *Informes de la Construcción*, Vol. 56, nº496, marzo-abril 2005. Pág. 17

Figura 18. FUENTE: MAS GUINDAL, A Y ADELL, J (2005) "*Eladio dieste y la cerámica estructural de Uruguay*" en *Informes de la Construcción*, Vol. 56, nº496, marzo-abril 2005. Pág. 18

Figura 19. FUENTE: www.fadu.edu.uy

<http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/iglesia-atlantida/>



Figura 20. FUENTE: MAS GUINDAL, A Y ADELL, J (2005) " *Eladio dieste y la cerámica estructural de Uruguay*" en *Informes de la Construcción*, Vol. 56, nº496, marzo-abril 2005. Pág. 14

Figura 21 y 22. FUENTE: [www.metalocus.es](http://www.metalocus.es)

<https://www.metalocus.es/es/noticias/frei-otto-pabellon-aleman-expo-1967>

Figura 23 y 24 FUENTE: [www.pasionpormadrid.blogspot.com](http://www.pasionpormadrid.blogspot.com)

<https://pasionpormadrid.blogspot.com/2011/04/en-el-palacio-de-cibeles.html>

Figura 25 y 26 . FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 300

Figura 27. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 304

Figura 28 y 29 . FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 301

Figura 30. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 303

Figura 31. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 307

Figura 32 y 33. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). " Light structures – Why and How" en *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 310

### 3.APLICACIONES PRÁCTICAS

Figura 34 y 35. FUENTE: BASSET, L (2010) " *Estructuras laminares*" publicación de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia

Figura 36. FUENTE: [www.wikiarquitectura.com](http://www.wikiarquitectura.com)

<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/estadio-olimpico-de-munich/>

Figura 37 y 38. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 98

Figura 39. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 96

Figura 40. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 98

Figura 41. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 98

Figura 42 y 43. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 99

Figura 44 y 45 . FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 102 -103

Figura 46. FUENTE: SCHMIDT, W (1973). " *Cubierta del Estadio Olímpico en Múnich*" en *Informes de la Construcción*, Vol. 25, nº248.

Figura 47. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 103

Figura 48,49 y 50. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 100

Figura 51 y 52 . FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 101

Figura 53, 54 y 55. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 100-101

Figura 56. FUENTE: SCHMIDT, W (1973). " *Cubierta del Estadio Olímpico en Múnich*" en *Informes de la Construcción*, Vol. 25, nº248.

Figura 57. FUENTE: EVONIK INDUSTRIES . *Flotante y transparente: el techo del Estadio Olímpico*

<https://www.world-of-plexiglas.com/es/estadio-olimpico-munich-plexiglas-carpa/>

Figura 58 y 59. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 102

Figura 60 y 61. FUENTE: [http://oa.upm.es/42929/7/EDWIN\\_GONZALEZ\\_MEZA\\_02.pdf](http://oa.upm.es/42929/7/EDWIN_GONZALEZ_MEZA_02.pdf)

Figura 62. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich: Prestel. Pág. 115

Figura 63. FUENTE: [www.wikiarquitectura.com](http://www.wikiarquitectura.com)

<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/banco-dz/>

Figura 64. FUENTE: [www.disfrutaberlin.com](http://www.disfrutaberlin.com)

<https://www.disfrutaberlin.com/pariser-platz>

Figura 65,66, 67 y 68. FUENTE: [www.intranet.pogmacva.com](http://www.intranet.pogmacva.com)

<http://intranet.pogmacva.com/es/obras/58537>

Figura 69 y 70. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*.

Múnich: Prestel. Pág. 127

Figura 71. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich:

Prestel. Pág. 128

Figura 72 y 73. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*.

Múnich: Prestel. Pág. 129

Figura 74 ,75 FUENTE: [www.festivalarchitettura.it](http://www.festivalarchitettura.it)

[http://www.festivalarchitettura.it/festival/En/Magazine\\_Detail.asp?ID=198&pmagazine=2](http://www.festivalarchitettura.it/festival/En/Magazine_Detail.asp?ID=198&pmagazine=2)

Figuras 76,77,78 y 79. FUENTE: [www.plataformaarquitectura.cl](http://www.plataformaarquitectura.cl)

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/888555/edificio-bancario-dz-gehry-partners>

Figura 80 y 81. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*.

Múnich: Prestel. Pág. 153

Figura 82. FUENTE: [www.plataformaarquitectura.cl](http://www.plataformaarquitectura.cl)

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-369505/estructura-de-cubierta-del-estadio-maracana-schlaich-bergemann-und-partner>

Figura 83 y 84. FUENTE: [www.sbp.de](http://www.sbp.de)

<https://www.sbp.de/en/project/olympic-stadium-seville/>

Figura 85,86,87. FUENTE: [www.ecured.cu](http://www.ecured.cu)

[https://www.ecured.cu/Mercedes-Benz\\_Arena](https://www.ecured.cu/Mercedes-Benz_Arena)

Figura 88 y 89. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*.

Múnich: Prestel. Pág. 157

Figura 90. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich:

Prestel. Pág. 158

Figura 91. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich:

Prestel. Pág. 157

Figura 92,93 y 94. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*.

Múnich: Prestel. Pág. 158

Figura 95. FUENTE: SCHLAICH, J y BERGERMANN, R (2003). *Light Structures / Estructuras Ligeras*. Múnich:

Prestel. Pág. 159

Figura 96. FUENTE: [www.ecured.cu](http://www.ecured.cu)

[https://www.ecured.cu/Mercedes-Benz\\_Arena](https://www.ecured.cu/Mercedes-Benz_Arena)

#### 4. DIÁLOGO INGENIERO-ARQUITECTO

#### 5. CONCLUSIONES

# ESTRUCTURAS LIGERAS **PRINCIPIOS BÁSICOS EN LA OBRA DE JÖRG SCHLAICH**

TRABAJO FIN DE GRADO

Octubre 2018

Autora: Isabel Navarro Carreto