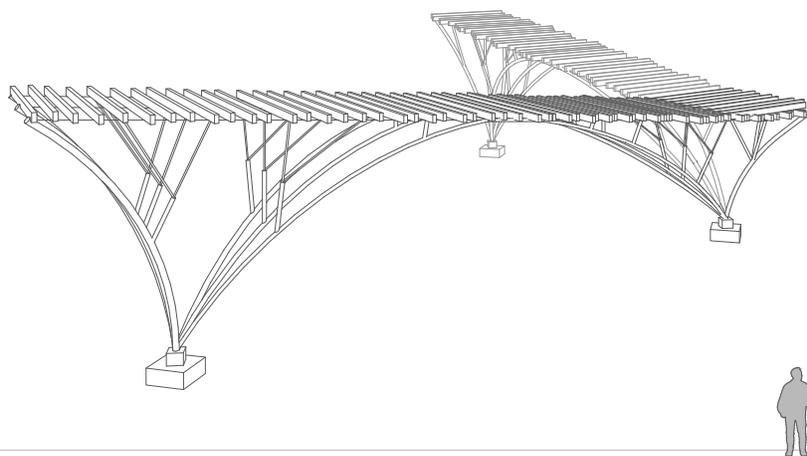




**arquitectura**

Escuela Técnica Superior  
Universidad de Sevilla



# *Estructuras Ramificadas*

## **Propuesta Urbana.**

**Carlos Morcillo González \_ 09207529P**

Curso 2014/2015

Plan 2012

**TFG-1.**

Construcciones Arq./ Ingeniería del Terreno/ Estructuras de la Edificación



# Tabla de Contenidos

---

Justificación y Objetivo .....	1
Naturaleza y Arquitectura .....	1
Alternativas Arquitectónicas a Construcciones Convencionales .....	2
Estado de la Cuestión. Estado del Arte .....	4
Estructuras Ligeras de Ramificación. Tipo árbol.....	4
Estructuras Ligeras.....	4
Estructura Tipo Árbol.....	7
Factores Determinantes. Aplicaciones en la Arquitectura .....	9
El sistema Umbela.....	13
Estudio y Análisis de Casos.....	15
Precedentes en la Historia.....	16
Proyectos Actuales.....	18
Conclusiones .....	31
Líneas de Aplicación Existentes .....	32
Propuesta .....	34
Justificación y Proyecto .....	34
Definición del modelo .....	40
Líneas Futuras de Investigación .....	41
Grasshopper .....	41
Material de cubrición .....	42
Detalles Constructivos de Uniones.....	42
Cimentación .....	44
Bibliografía .....	45
Anexos .....	47
Modelo de cálculo. Materiales .....	47

Modelo de cálculo. Perfiles .....	48
Modelo de cálculo. Acciones .....	49
Modelo de cálculo. Combinaciones.....	49
Modelo de cálculo. Estudio de Deformaciones.....	50
Modelo de cálculo. Reacción en los Apoyos .....	52
Modelo de cálculo Aprovechamiento de los perfiles.....	53
Documento Digital .....	54

# Justificación y Objetivo

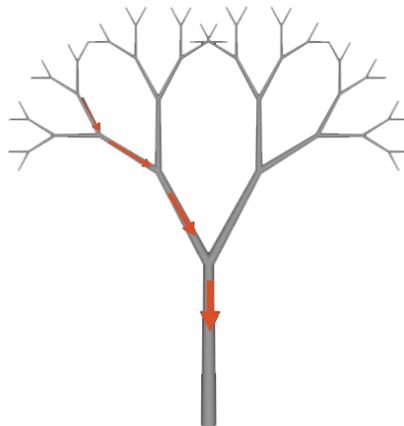
---

## Naturaleza y Arquitectura. Justificación.

Dentro del campo de la arquitectura, la naturaleza ha sido desde siempre una fuente de inspiración y estudio para el diseño, tanto proyectual como estructural. En los sistemas naturales, como por ejemplo los árboles que encontramos en nuestro día a día en un parque o caminando por la calle, encontramos como el follaje sirve de cubrición, mientras las ramas y el tronco actúan de soporte. Es una manera de aprender observando el entorno que nos rodea.



Los árboles y sus hojas son un claro ejemplo de estructura de ramificación natural basado en barras (ramas) y nudos (bifurcaciones) con una clara transmisión de cargas de elemento a elemento como podemos ver en el siguiente esquema.



En sentido arquitectónico, éste es un campo de estudio peculiar debido a que sugiere la búsqueda y diseño de nuevas construcciones no convencionales, y además por su similitud formal con la naturaleza se puede asociar fácilmente al parámetro “verde” de sostenibilidad, de tal forma que los conceptos forma y función quedan más unidos.

## Alternativas Arquitectónicas a Construcciones Convencionales. Objetivo.

Las estructuras de ramificación se basan en sistemas geométricos que se expanden a través de bifurcaciones sin formar circuitos cerrados. En este sentido, las estructuras de ramificación se asemejan a las estructuras naturales de los árboles, ramificándose éstas continuamente hacia el exterior.

Estos tipos de diseño basados en la naturaleza permiten dar soluciones no convencionales a la arquitectura del momento en sus distintos campos como por ejemplo:

- Mobiliario urbano. Un árbol solar diseñado por Ross Lovegrove y fabricado por Artemide iluminando la plaza de San Juan en Londres.



- Cubierta espacio público. Orquideorama de Medellín.



- Sistema estructural. Obra de arquitectura sostenible de Roald Gundersen en 2012



Este trabajo aborda el estudio de las estructuras de ramificación, en concreto las que poseen una forma de árbol. Este estudio se basa en dos puntos: la teoría existente sobre éste tipo de estructuras, donde Frei Otto fue el primer arquitecto en teorizar dicho funcionamiento estructural; y una base de datos sobre las estructuras existentes tanto precedentes como proyectos actuales, donde podemos encontrar distinta materialidad, forma y uso.

El objetivo de este trabajo es el de realizar un estudio sobre este tipo concreto de estructuras y comprobarlo en los distintos proyectos existentes, con el fin de definir los parámetros comunes que comparten, y una estrategia que permita una posterior propuesta de diseño no convencional en cualquiera de los campos que posee la arquitectura. En mi caso, éste proyecto se trata en una pérgola localizada en la ciudad de Mérida, junto al río Guadiana y el puente Lusitania, como veremos en el apartado "Propuesta".

# Estado de la Cuestión. Estado del Arte

---

## Estructuras Ligeras de Ramificación. Tipo Árbol.

### **ESTRUCTURAS LIGERAS. INTRODUCCIÓN.**

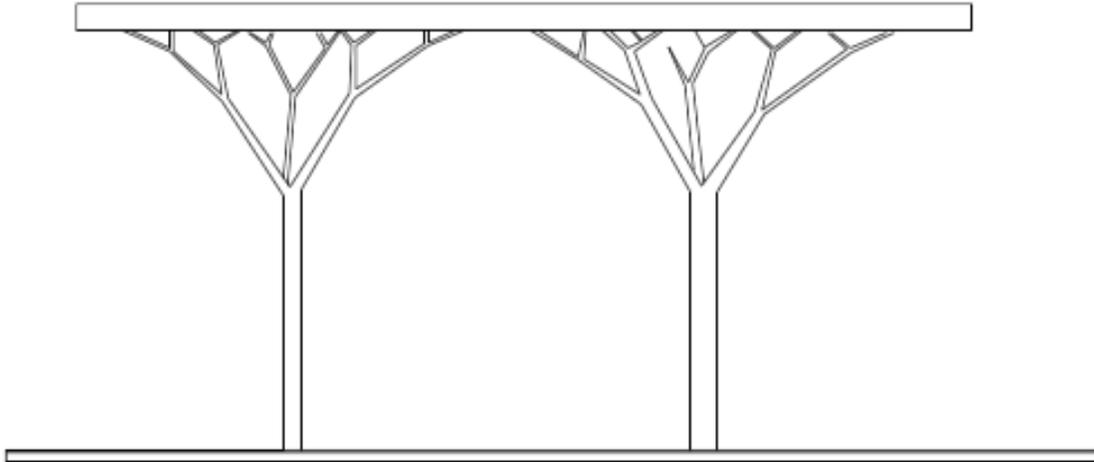
Existen numerosas formas para crear arquitectura: algunas de ellas se basan en crear una envolvente o un volumen para conseguir la imagen deseada, mientras que otras se centran en crear un sistema estructural donde la estructura es vital para el diseño del edificio. Éste segundo enfoque frente al diseño arquitectónico es el que guía mi trabajo, sin mantener al margen el tema de la envolvente, pero siendo la clave del proyecto la estructura.

Estas construcciones basadas en la estructuras y realizando la envolvente con materiales ligeros han sido realizadas desde el principio de los tiempos, consideradas y clasificadas como una tipología de arquitectura vernácula en ciertas ocasiones. Las culturas nómadas, por ejemplo, eran conscientes de los beneficios que poseía realizar una vivienda con materiales ligeros al ser fácilmente construible/montable y lo más importante, transportable. Sin embargo, con el paso del tiempo y la historia éstos métodos quedaron obsoletos al buscar unas construcciones más duraderas al paso del tiempo, y trabajar por tanto con nuevos materiales de construcción como son la mampostería, la arcilla, etc.

Desde las últimas décadas, estas construcciones ligeras se han vuelto a recuperar como un gesto de modernidad, pero adaptadas a los medios de nuestros días: a los materiales, a las herramientas y a las formas de trabajo de las que disponemos en la actualidad.

Frei Otto(1925-2015), arquitecto y científico, dedicó toda su vida al estudio de los procesos de formularios de investigación de la naturaleza, y fue el primero en teorizar el funcionamiento de las estructuras ligeras de ramificación. Utilizó

estos estudios y procesos para desarrollar y construir numerosas estructuras (Winfried Nerdinger, 2005).



*Bocetos sobre el diseño de estructuras ligeras ramificadas, Frei Otto (Schultz et al, 2000)*

"Los elementos que soportan y transmiten cargas mientras que ellos mismos poseen relativamente poca masa se denominan elementos ligeros". En general y técnicamente hablando nos referimos a "construcciones ligeras" (Frei Otto, 1979, IL 23. Kraftwerk. Tra ONU Bic).

Las primeras teorías sobre la construcción ligera aparecieron durante el siglo XIX, cuando el físico británico James Clark Maxwell(1831-1879) y AG Michel se hicieron famosos por sus optimizaciones estructurales, por lo que pueden ser considerados como los fundadores de dicha disciplina(Winfried Nerdinger, 2005). Vladimir Shújov(1863-1939), Richard Buckminster Fuller(1895-1983), Konrad Wachsmann(1901-1980) y Max Mengerinhausen (1903-1999) fueron también de los pioneros de este campo utilizando el lema "La construcción ligera, una exigencia de nuestro tiempo", y a su vez colaboraron con Frei Otto en proyectos como el pabellón de Montreal de 1967.

Dentro del campo del diseño de edificios, si lo concebimos desde el inicio con estructura ligera partimos desde la perspectiva de que requiere menos material y por lo tanto hay que realizar un aprovechamiento máximo y racional de los mismos. Aquí es donde entra en juego la utilización y diseño de una geometría óptima de perfiles capaz de soportar la carga solicitada, de ofrecer suficiente rigidez, y en consecuencia de utilizar el menor material posible.

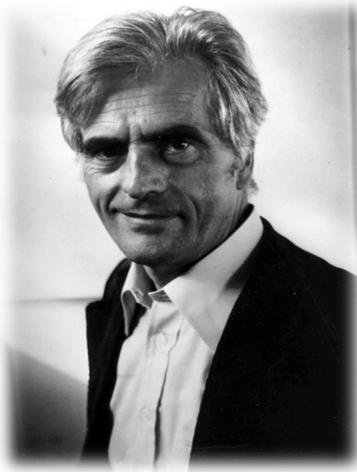
Por ello, las construcciones con estructuras ligeras son un tipo de arquitectura de mayor complejidad y requiere un esfuerzo intelectual mayor en lugar de la aplicación de las características físicas de los materiales. Las reglas básicas de las estructuras ligeras son (*Windfried Nerdinger, 2005*):

- Evitar esfuerzos de flexión.
- Transmitir las cargas del plano de cubrición mediante esfuerzos de compresión/tracción en distancias cortas y regulares para evitar problemas de estabilidad y masa extra innecesaria en los puntos de apoyo.
- Los esfuerzos de compresión/tracción deben darse a través de elementos estructurales longitudinales dentro de un conjunto.
- Dar componentes planas en la compresión de forma apropiada para asegurarlas contra el fallo de estabilidad.
- La transmisión de cargas se dará de forma unidireccional
- La esbeltez de cada elementos dependerá de la carga a transmitir de su punto inicial a su punto final.

"Las formas de construcción ligera rara vez son una coincidencia. Por lo general, son el resultado de los procesos de desarrollo y optimización de que, por cualquier razón, siguen el principio de la reducción de la masa. Llamamos a este principio, el principio de construcción ligera " (*Frei Otto. Obras Completas sobre Construcción Ligera. Diseño Natural*).

## ESTRUCTURAS TIPO ÁRBOL.

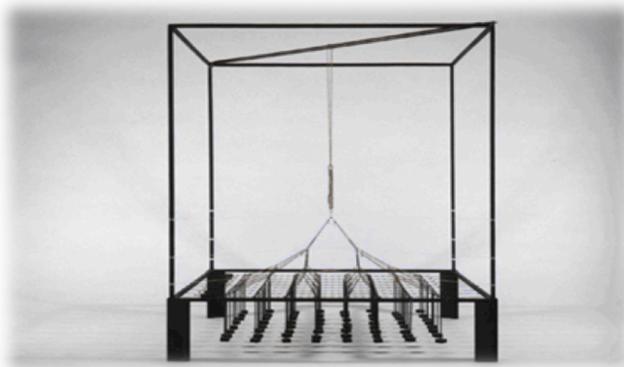
Los árboles y las formaciones naturales han sido una base clara en el ámbito del diseño de formas estructurales y su funcionamiento.



*Frei Otto*

El arquitecto alemán Frei Otto es la persona más relevante en este campo de estudio; llevó a cabo una investigación sistemática de la construcción ligera y adaptable a edificios con carácter de "Construcción Natural". Además de ellos, publicó varios trabajos sobre los aspectos fundamentales de la relación que existe entre la arquitectura y la naturaleza. Entre sus obras más notables se incluyen: construcciones suspendidas, cúpulas malladas, superficies de entramados, columnas con forma de árbol y modelos de estructuras de ramificación.

Frei Otto desarrolló diferentes sistemas estructurales de ramificación en su estudio. Utilizó modelos colgantes como método para moldear y diseñar soportes estructurales de puentes peatonales, salas de conferencias y para las grandes cúpulas de malla hexagonal. Finalmente, también desarrolló sistemas de columnas ramificadas, las cuales convirtió en una estructura armónica como las que encontramos en la naturaleza, expuestas en 1972 en MOMA como "Estudios Experimentales" (Windfried Nerdinger, 2005).



*Modelos Colgantes Ramificados*

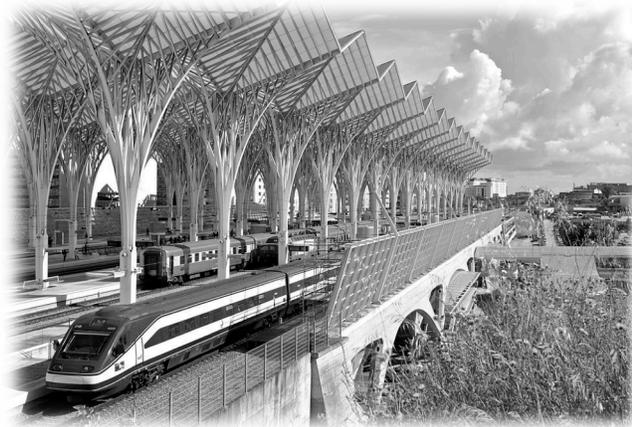


*Estructura Armónica de Ramificación*

Las estructuras de ramificación se refieren generalmente a estructuras con forma de árbol, basadas en un soporte que se va abriendo salvando a cada momento una mayor luz. Sin embargo, su funcionamiento no se puede comparar con la de un árbol natural, ya que mientras que las ramas de un árbol actúan también bajo esfuerzos de flexión, estos esfuerzos se evitan sistemáticamente en dichas estructuras técnicamente construidas trabajando éstas únicamente mediante esfuerzos axiales (Windfried Nerdinger, 2005).

Éstas estructuras tipo árbol exhiben una estrecha relación entre su funcionamiento mediante la transmisión de las cargas y su forma, tanto en su aspecto general como en la naturaleza de la propia estructura. Es una combinación funcional entre la cubierta y los soportes. La ventaja que poseen estos sistemas de bifurcación en forma de árbol, lo que produce esta gran relación, es tener distancias cortas entre los puntos de carga a los apoyos y dirigir éstas según nos interese.

Algunas de las obras maestras en el campo de las estructuras ligeras de ramificación tipo árbol son, por ejemplo, la estación de Oriente en Lisboa, Portugal por Santiago Calatrava (Andrew W. Charlson, 2005), o el interior del aeropuerto de Stuttgart (Andrew W. Charlson, 2005), como veremos en la base de datos.



*Estación de Oriente, Lisboa.*

*Santiago Calatrava*



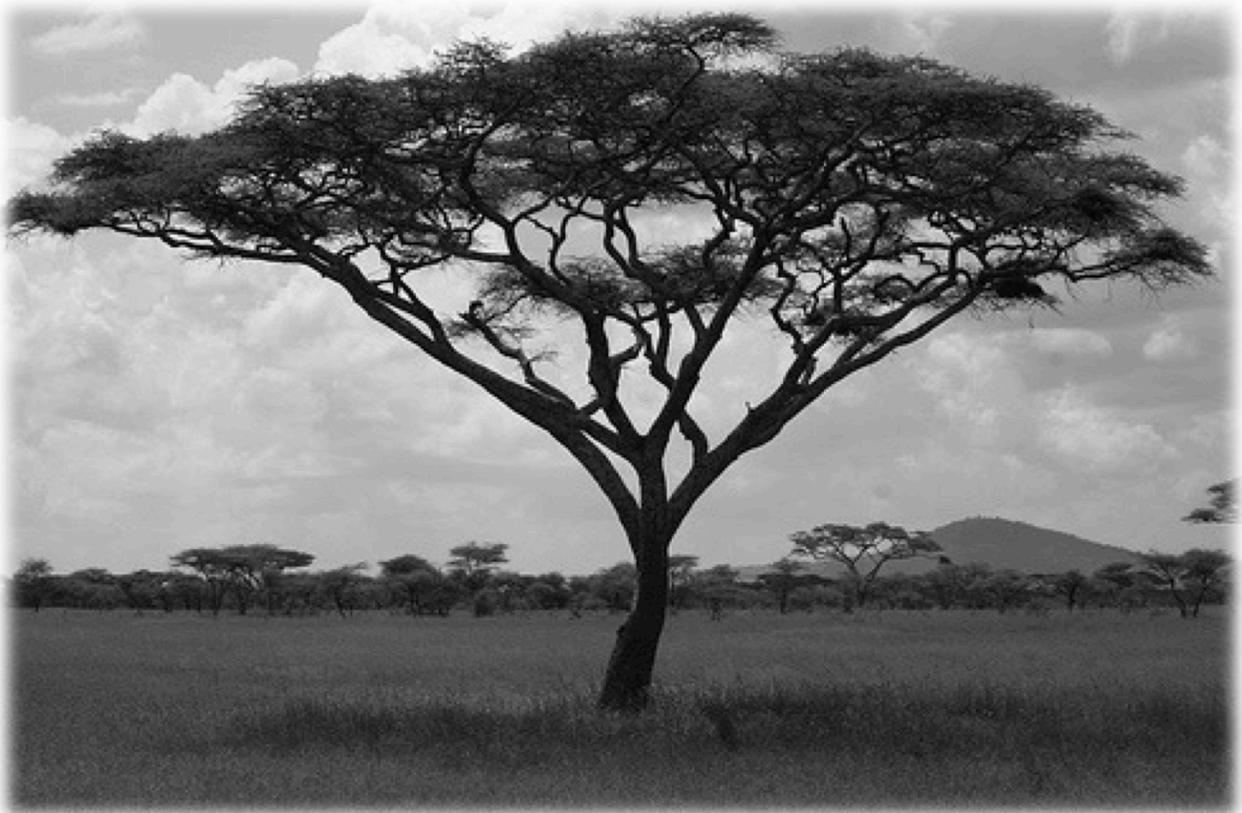
*Aeropuerto de Stuttgart.*

*GMP (Von Gerkmann / Marg & Partners)*

En los últimos 30 años ha habido una gran mejora en el diseño de estructuras ligeras, consecuencia de buscar un nuevo enfoque de diseño ante estructuras móviles y no convencionales con fin de mejorar sus características. Con esta mejora y las nuevas investigaciones, las estructuras de ramificación tipo árbol encuentran una aplicación muy efectiva en el diseño para abarcar y sostener grandes luces, así como puede ser el caso del proyectar puentes o edificios públicos como aeropuertos, estadios deportivos, estaciones de ferrocarril, centros comerciales, etc.

### **FACTORES DETERMINANTES EN LAS ESTRUCTURAS TIPO ÁRBOL. APLICACIONES EN LA ARQUITECTURA.**

Los árboles son un paradigma intrigante en cuanto a su crecimiento y desarrollo, característico por su funcionamiento estructural en armonía entre todos sus elementos. Representan mucho más que un conjunto de ramas unidas a un eje común.



Durante su vida, los árboles están constantemente sometidos a tensiones, como a la compresión y tensión debida al crecimiento del sistema de ramificación, el aumento de la masa total o los efectos de flexión y balanceo producido por los efectos del viento y su peso propio. El calentamiento y el enfriamiento diferencial de varias partes del árbol también induce tensiones térmicas, tales como la expansión y contracción de los tejidos.

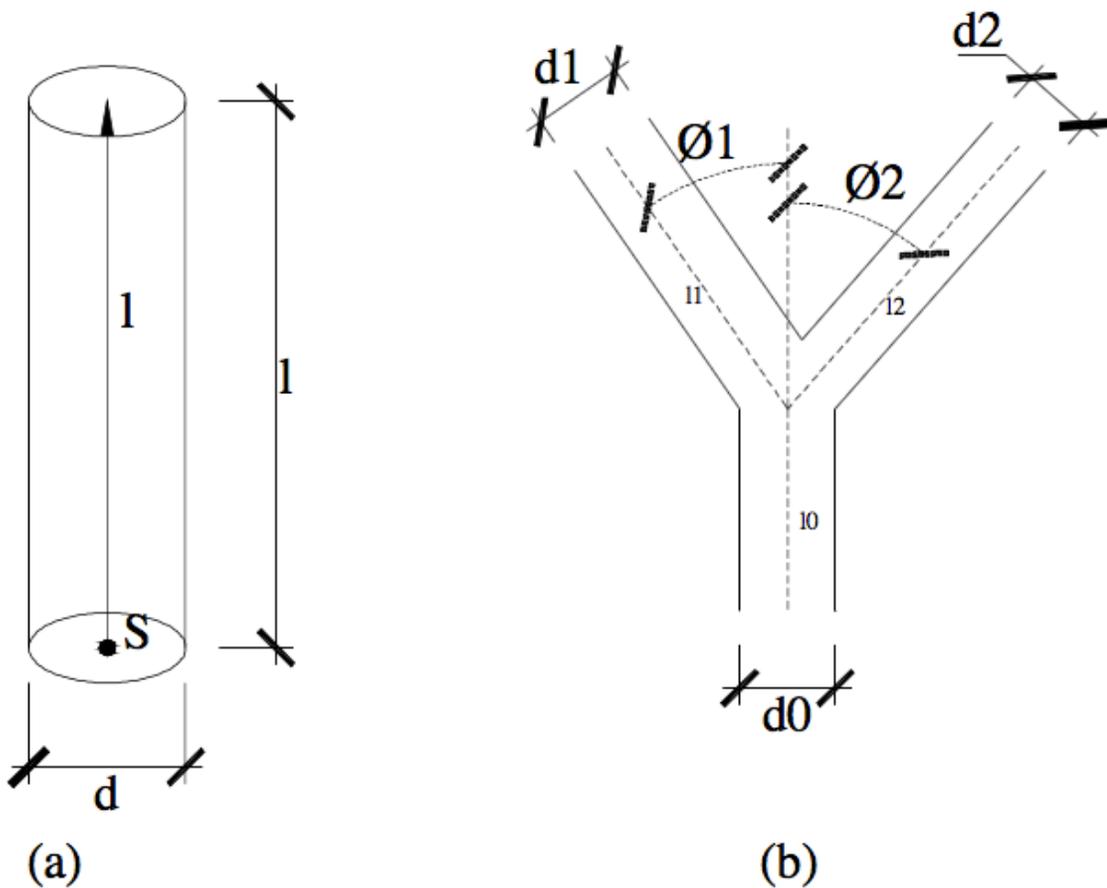
Uno de los principales determinantes en la forma de los árboles es la gravedad, ya que es un proceso continuo y uniforme de fuerza aplicada en todos sus elementos. Las ramas no crecen al azar en todas las direcciones, sino que éstas están reguladas por los efectos de la gravedad y la búsqueda de la luz. La forma de la copa del árbol es entonces dependiente del patrón de ramificación interno de cada elemento, que permiten el uso óptimo del espacio y la luz, determinando así el tamaño y la forma de cada rama de un árbol.

En la arquitectura, la luz y el espacio son predeterminados, es decir, la forma y dimensiones de los árboles como soporte estructural se definen bajo dos parámetros: la carga que se espera soportar y el diseño buscado. Una vez definidos éstos durante la fase proyectual, a diferencia de los árboles en la naturaleza, dicha estructura no tiene posibilidad de crecer más.

El funcionamiento de las estructuras tipo árbol se caracteriza por ser único dentro del marco de la industria de la construcción. Esto es debido a que los elementos longitudinales que componen el conjunto están conectados mediante articulaciones rígidas, de tal forma que evitan los esfuerzos a flexión incluso teniendo cargas alternas; trabajando así únicamente con esfuerzos axiales y una transmisión directa de ellos.

Éste tipo de estructuras son particularmente adecuadas para el esquema de una carga principal, para el que se optimizaran sus perfiles y se dirigirá al lugar deseado.

Los modelos teóricos de éstas estructuras de ramificación se basan en elementos longitudinales (barras) y nudos (bifurcaciones). Las barras se definen físicamente por su longitud ( $l$ ), diámetro ( $d$ ), punto ( $s$ ) y dirección ( $l$ ); mientras que las bifurcaciones se caracterizan por los ángulos  $\varnothing_1$  y  $\varnothing_2$  y por las relaciones de longitud  $l_i/l_0$  y diámetro  $d_i/d_0$ , entre la rama principal y las ramas derivadas de ésta. En el momento en que una de las ramas secundarias se bifurca de nuevo, normalmente no será parte del mismo plan ya que poseen diferente orientación, definida por una divergencia o ángulo de torsión  $\theta_i$  (la orientación de una rama es una función de la orientación,  $\varnothing_i$ , el ángulo de bifurcación de la rama principal y el ángulo de divergencia,  $\theta_i$ ).



Esquema Funcional. Barras (a) / Bifurcaciones (b)

Un sistema de ramificación exhibe una organización jerárquica repetitiva, en el que el conjunto de sus partes se basa en una geometría similar en su totalidad. Esta propiedad de auto-similitud es un rasgo distintivo de los fractales.

Tras el diseño y siempre teniéndolo en cuenta, las estructuras tipo árbol se simulan y calculan como elementos estáticos, a diferencia de los árboles reales, vistos como elementos dinámicos de la naturaleza (Linsen, L, 2005; Hart, JC 2003; Prusinkiewicz, P. 1998)

Las estructuras de ramificación se pueden presentar de dos maneras según su enfoque, pero siendo su comportamiento estructural el mismo. Se pueden presentar como las estructuras que normalmente encontramos en la naturaleza, como en los árboles por ejemplo, formadas por un conjunto de barras de carácter ascendente que van aumentando de esbeltez cada vez que se bifurca; o como una estructura de carácter descendente realizada a partir de un elemento tensional lineal, como podríamos considerar una catenaria, al que al añadirle cargas en distintos puntos va tomando diferente forma pero siempre en armonía.



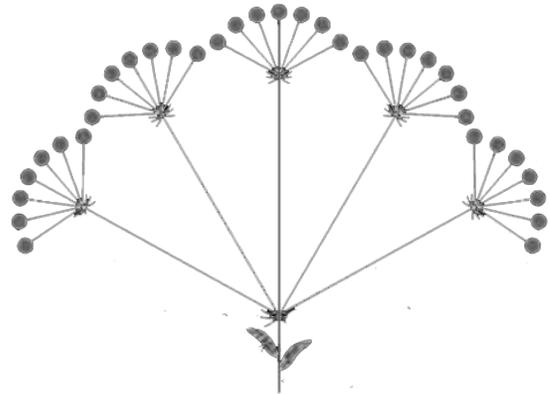
*Caixa Forum, Barcelona. Arata Isozaki*



*Aviario, Ginebra. Group8 + Gussetti & Tournier*

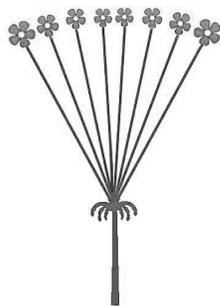
## EL SISTEMA UMBELA.

En el campo de la arquitectura, cuando nos referimos a las estructuras ligeras de ramificación solemos hacerlo como estructuras tipo árbol, sin embargo, tales estructuras se parecen más funcionalmente a los sistemas de umbela. En dichos sistemas, la carga total se distribuye a un punto y desde allí se transmite a través de un solo miembro a otro punto de apoyo donde la fuerza de reacción producida proporciona el equilibrio perfecto (Schultz et al, 2000).

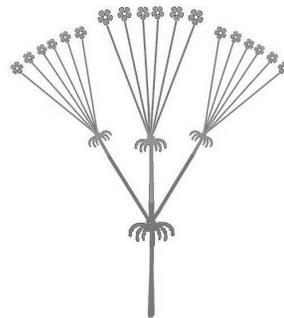


EL término "umbela" viene del latín *umbra*, que significa sombra, aplicado en algunas lenguas, como en italiano y en inglés, para paraguas, *ombrello* y *umbrella* respectivamente. Su significado se refiere a un tipo de inflorescencia abierta, racimosa en la cual el pedúnculo se ensancha en la extremidad en forma de clavo o disco y de ese punto irradian los pedicelos florales como las varillas de un paraguas. Estos pedicelos tienen todos la misma longitud.

Como sistema estructural, el sistema umbela se puede visualizar como un caso especial del sistema en forma de árbol, donde un número de tallos cortos sucursales (llamadas pedículos), que son iguales en longitud, que se distribuyen a partir de un punto en común. Éste sistema puede ser simple o compuesto:

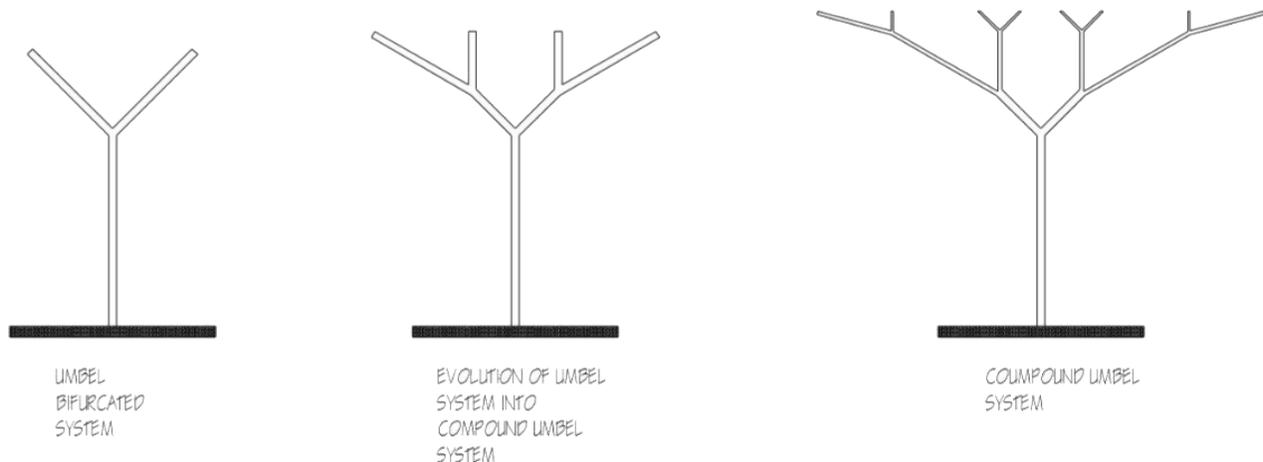


*Sistema Simple de Umbela*



*Sistema Compuesto de Umbela*

La analogía de las estructuras tipo árbol con el sistema umbela se ilustra esquemáticamente mediante una clara imagen, una vez analizados los sistemas anteriores:



Para el correcto funcionamiento de este sistema estructural todos los elementos de dicha estructura deben ser cargados exclusivamente en compresión, lo cual, como se mencionó anteriormente, sólo es posible cuando las líneas de acción de todas las fuerzas coinciden en un punto. Sin embargo, en ocasiones esto no es lo normal en las formas de los sistemas umbela, por ejemplo, como ocurre cuando apoyamos los techos de grandes luces de forjados pesados, lo que hace que sea necesaria la introducción de miembros adicionales de tracción y/o compresión para su buen funcionamiento.

Los elementos de los sistemas umbela funcionan mejor realizados en acero por su ligereza y capacidad de carga, formados mediante perfiles tubulares para los elementos barra, y los nodos de acero fundido creando así articulaciones rígidas (Schultz et al., 2000).

La geometría utilizada, o más bien la disposición de los elementos para este tipo de estructuras de ramificación, se determina utilizando modelos con la asistencia de programas gráficos informáticos, y de forma más intuitiva para su entendimiento mediante dibujos, croquis, o maquetas realizados a mano. Dicha forma de representación y estudio de las estructuras ramificadas conduce a una comprensión detallada de las relaciones entre la disposición de los elementos y fuerzas que soportan.

## Estudio y Análisis de Casos.

Las estructuras de ramificación, como hemos dicho hasta ahora, es un tipo de construcción no convencional, aunque en las últimas décadas su uso está creciendo en ciertos campos de la arquitectura.

En ésta base de datos, realizo el estudio e investigación de quince casos diferentes a lo largo del tiempo, donde éste tipo de estructuras está presente con distintos materiales y contexto arquitectónico. Dichos casos podemos clasificarlos en dos apartados:

### ➤ **PRECEDENTES EN LA HISTORIA.**

- Abadía de Bath, Inglaterra.
- Sagrada Familia de Barcelona, España.

### ➤ **PROYECTOS ACTUALES.**

- Aeropuerto de Stuttgart, Alemania.
- Aeropuerto de Londres, Inglaterra.
- Palacio de Justicia de Melun, Francia.
- Museo de las Ciencias de Valencia, España.
- Estación de Oriente de Lisboa, Portugal.
- Entrada Caixa Fórum de Barcelona.
- Aeropuerto de Madrid, España.
- Pajarera de Ginebra, Suiza.
- The Tote de Mumbai, India.
- Pabellón de Noruega en la Expo de 2010 de Shanghái, China.
- Centro de Visitantes de Melilla, España
- Capilla en el Bosque de Gumma, Japón.
- Aeropuerto Internacional Chhatrapati Shivaji – Terminal 2 / SOM de Mumbai, India.

A continuación vemos el análisis realizado mediante una ficha de cada uno de los proyectos nombrados.

## PRECEDENTES EN LA HISTORIA



## ABADÍA DE BATH

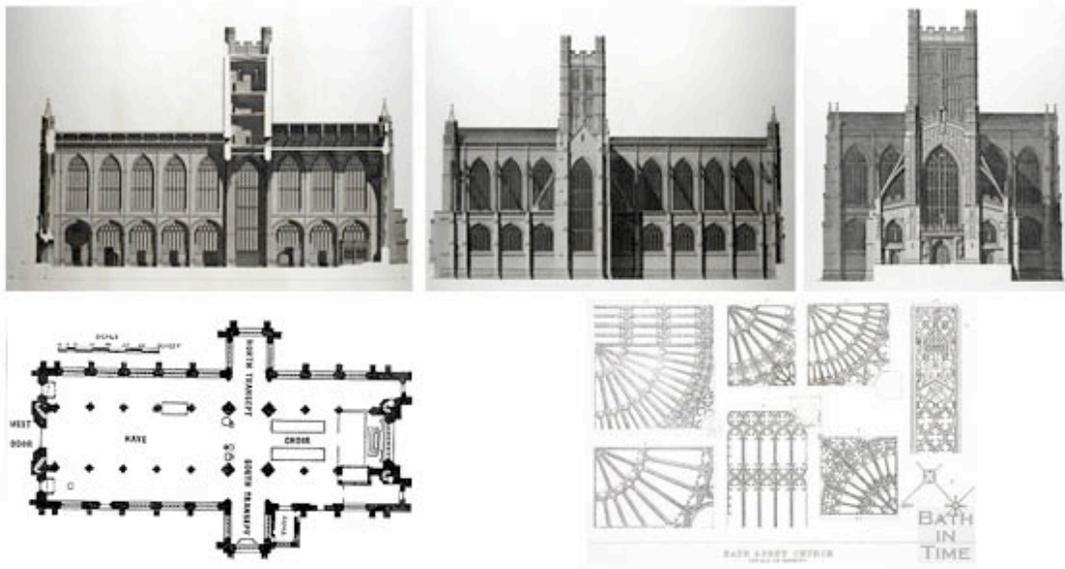
Arquitecto: George Gilbert Scott  
William Vertue  
George Phillips Manners  
Robert Vertue

Año: 1499

Localización: Bath, Inglaterra

Materialidad: Piedra

### Planimetría:



### Estructura:





## SAGRADA FAMILIA

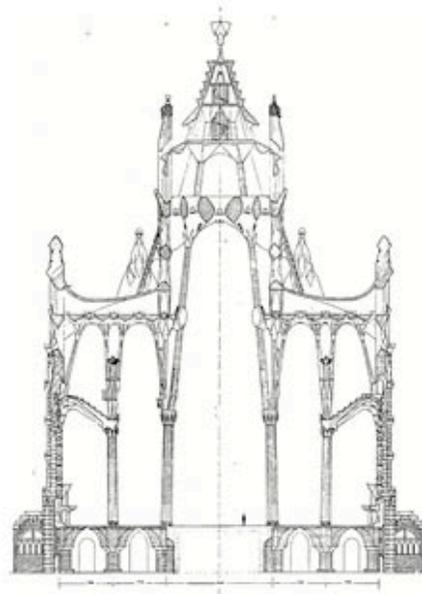
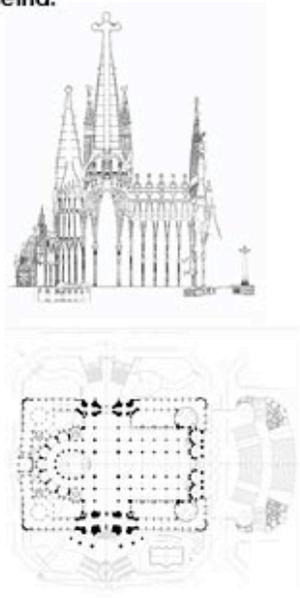
Arquitecto: Antonio Gaudí

Año: 1882

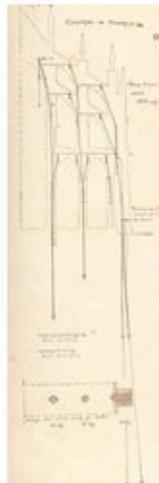
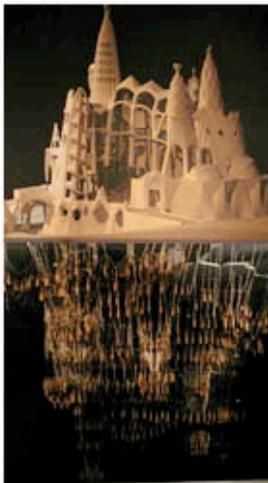
Localización: Barcelona, España

Materialidad: Piedra

Planimetría:



Estructura:





## AEROPUERTO STUTTGART

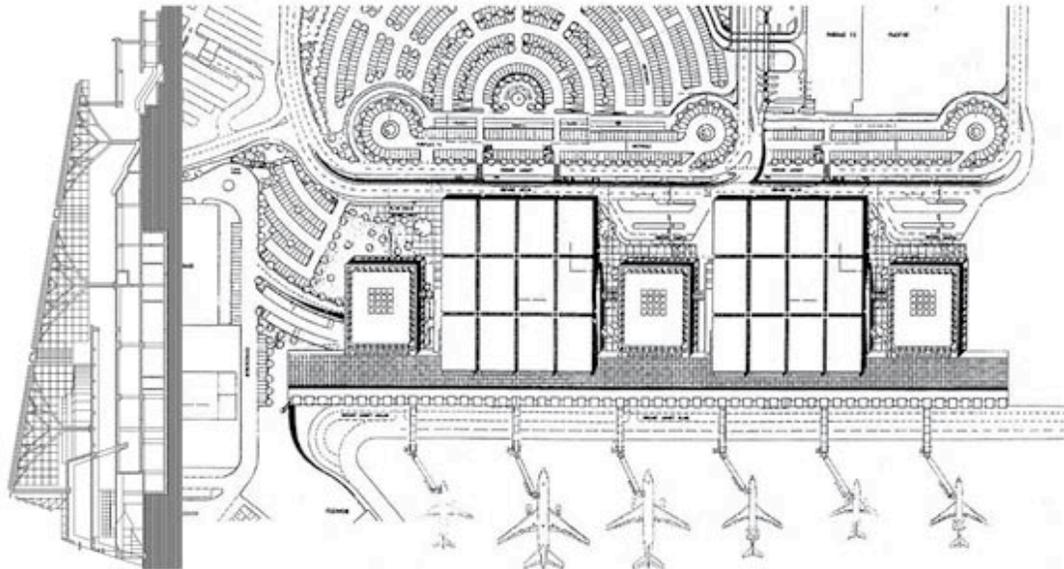
Arquitecto: **GMP (Von Gerkmann, Marg & Partners)**

Año: **1991**

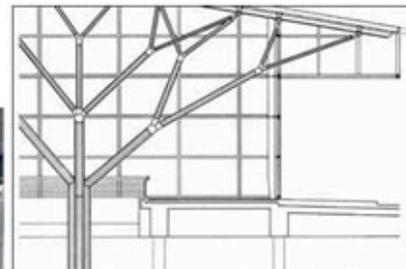
Localización: **Stuttgart, Alemania**

Materialidad: **Acero**

Planimetría:



Estructura:





## AEROPUERTO LONDRES STANSTED

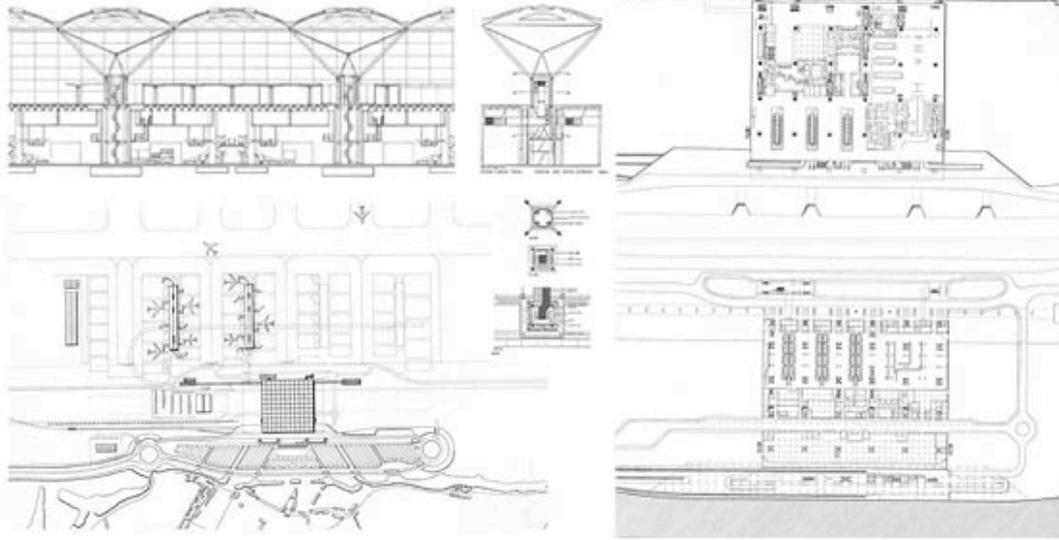
Arquitecto: Norman Foster

Año: 1991

Localización: Londres, Inglaterra

Materialidad: Acero

### Planimetría:



### Estructura:





## PALACIO DE LA JUSTICIA

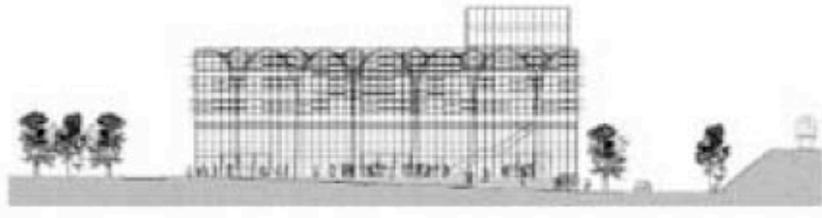
Arquitecto: Jourda Perraudin

Año: 1998

Localización: Melun, Francia

Materialidad: Acero

Planimetría:



Estructura:





## MUSEO DE LAS CIENCIAS

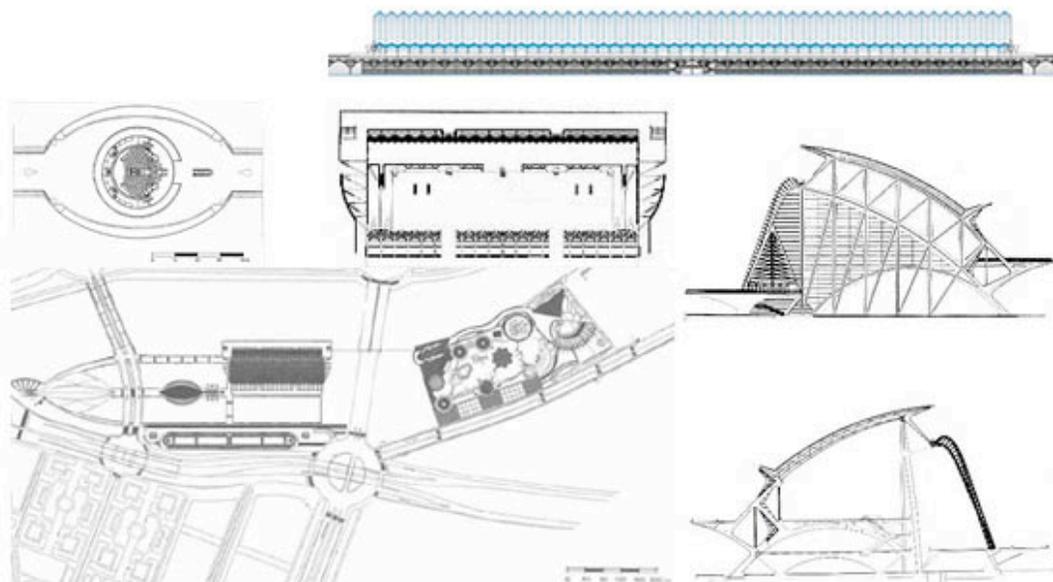
Arquitecto: Santiago Calatrava

Año: 1998

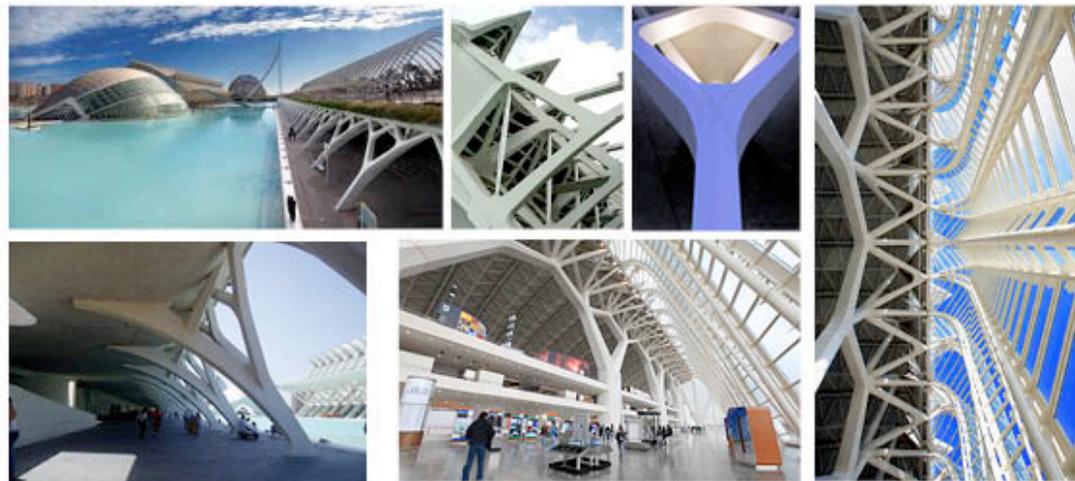
Localización: Valencia, España

Materialidad: Hormigón Armado

### Planimetría:



### Estructura:



## ESTACIÓN DE ORIENTE



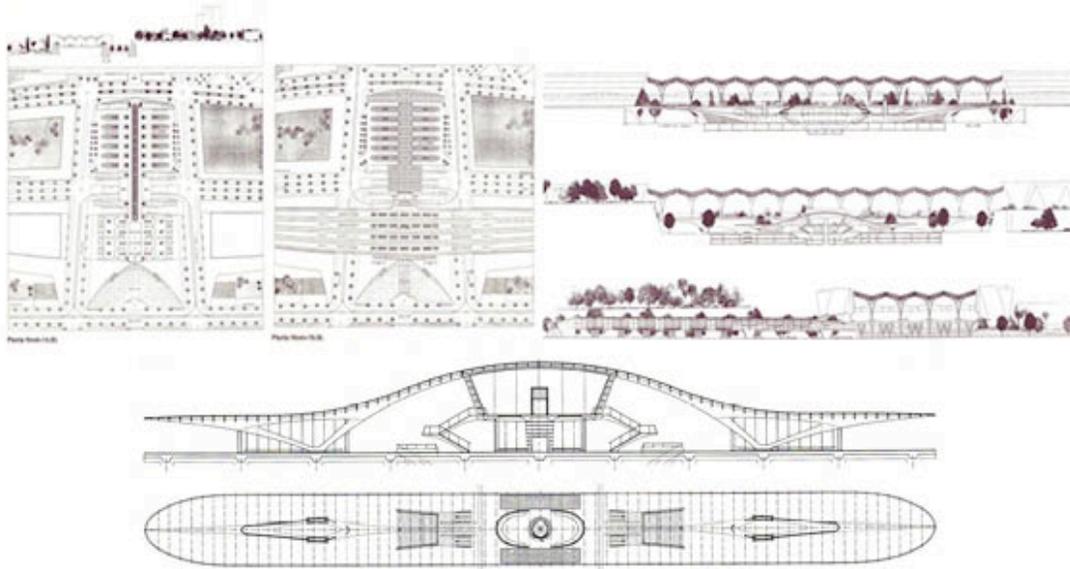
Arquitecto: Santiago Calatrava

Año: 1998

Localización: Lisboa, Portugal

Materialidad: Acero

Planimetría:



Estructura:



## ENTRADA CAIXA FÓRUM



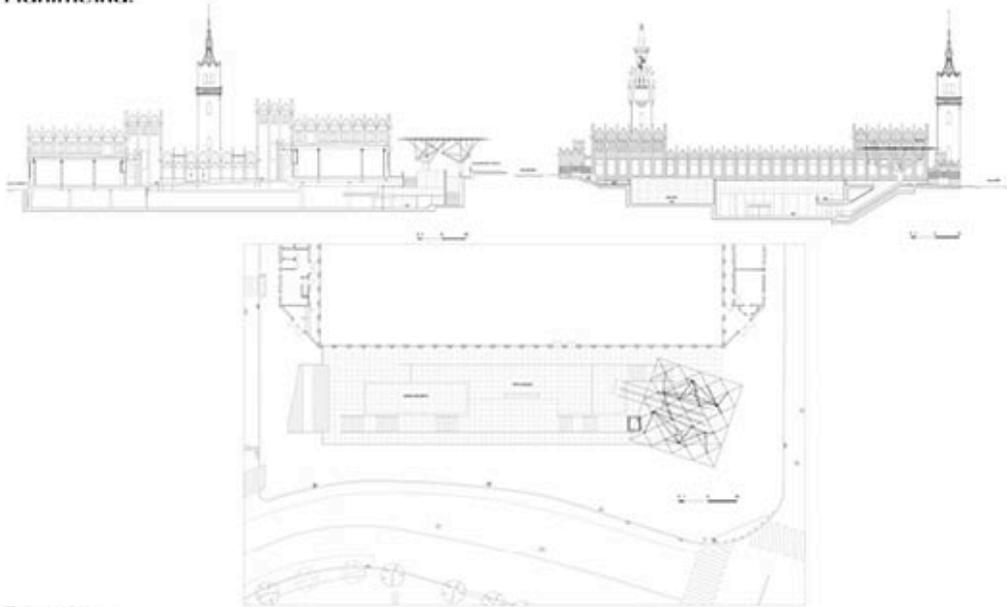
Arquitecto: Arata Isozaki

Año: 2002

Localización: Barcelona, España

Materialidad: Acero

Planimetría:



Estructura:



## AEROPUERTO MADRID T4



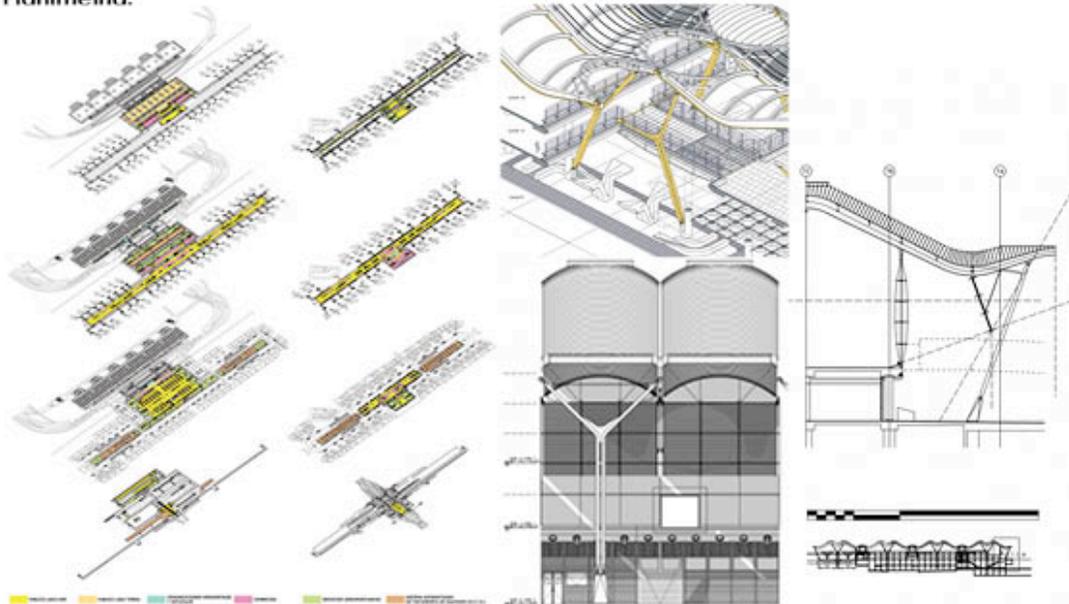
Arquitecto: Richard Rogers  
Anthony Hunt Associates,  
TPS con OTEP, HCA

Año: 2006

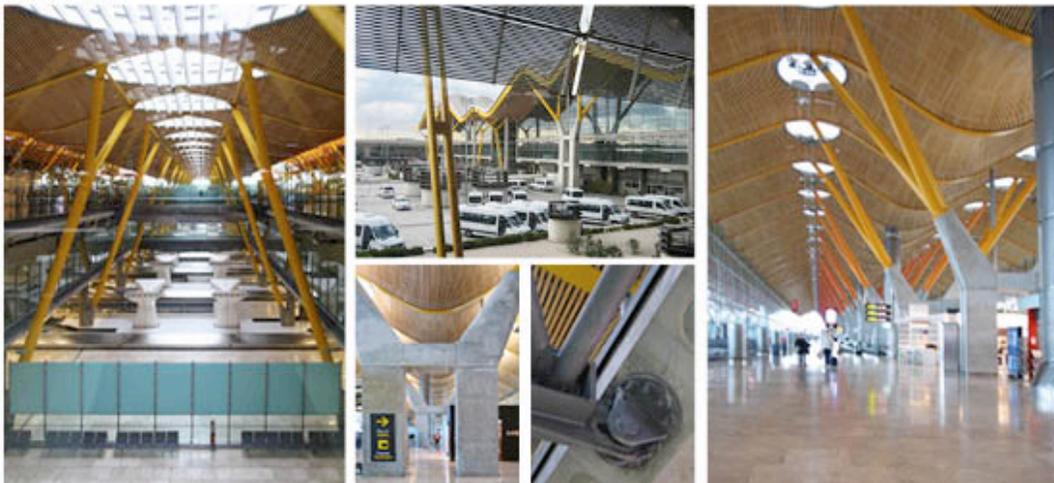
Localización: Madrid, España

Materialidad: Hormigón Armado + Acero

Planimetría:



Estructura:



## PROYECTOS ACTUALES



## PAJARERA

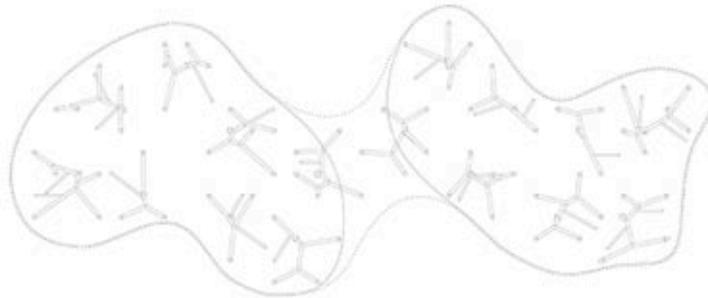
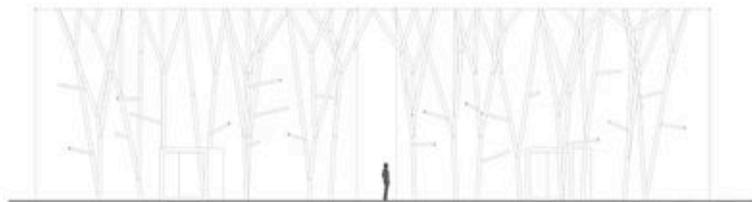
Arquitecto: **Group8  
Guscelli & Tournier**

Año: **2008**

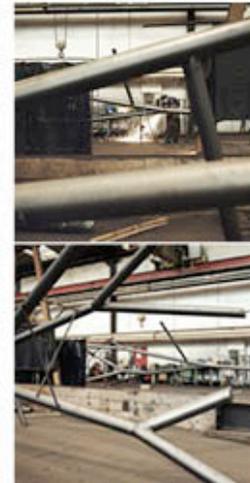
Localización: **Ginebra, Suiza**

Materialidad: **Acero**

### Planimetría:



### Estructura:



# THE TOTE



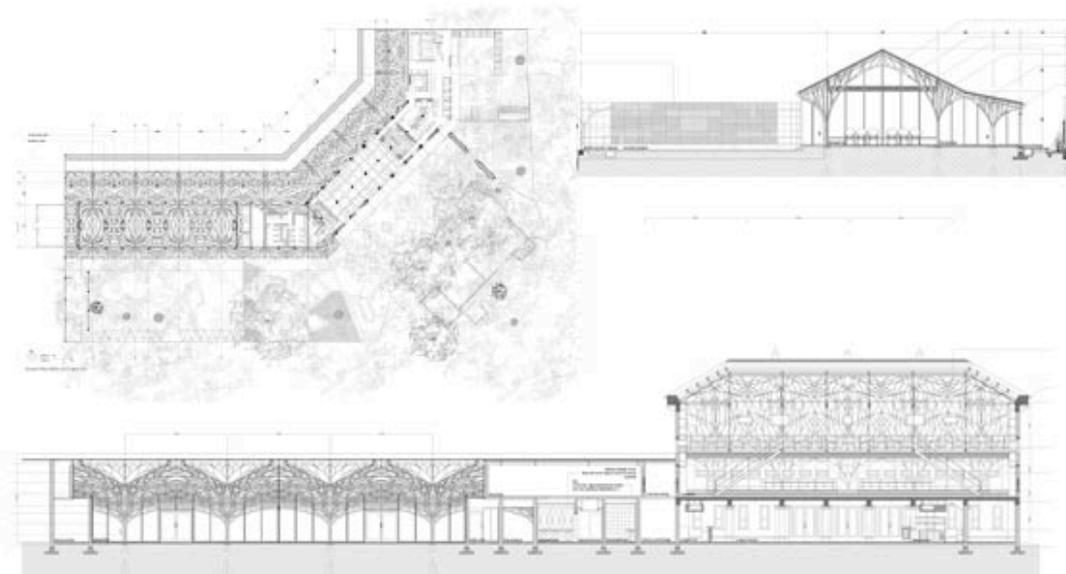
Arquitecto: Serie Architects  
Facet Construction  
Engineering Pvt. Ltd

Año: 2009

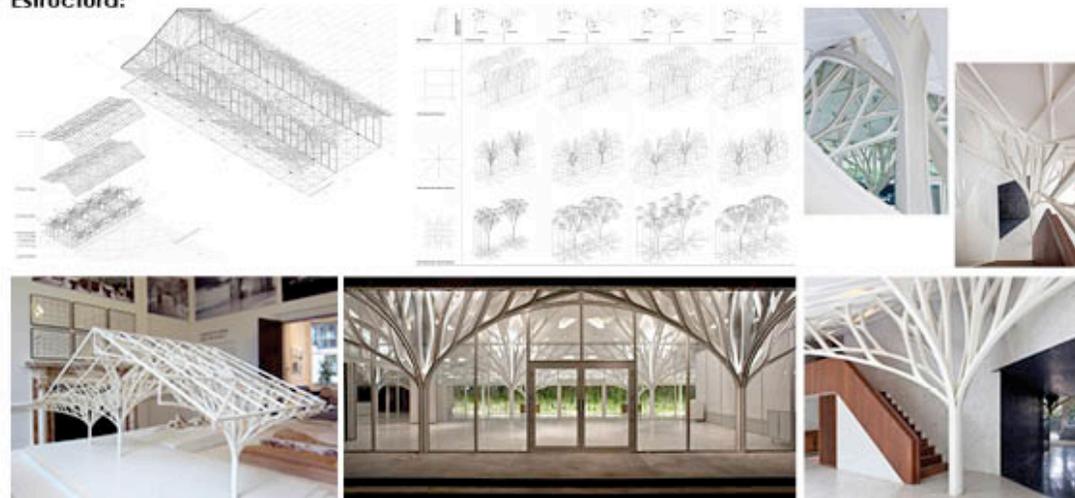
Localización: Mumbai, India

Materialidad: Acero

## Planimetría:



## Estructura:





## PABELLÓN DE NORUEGA

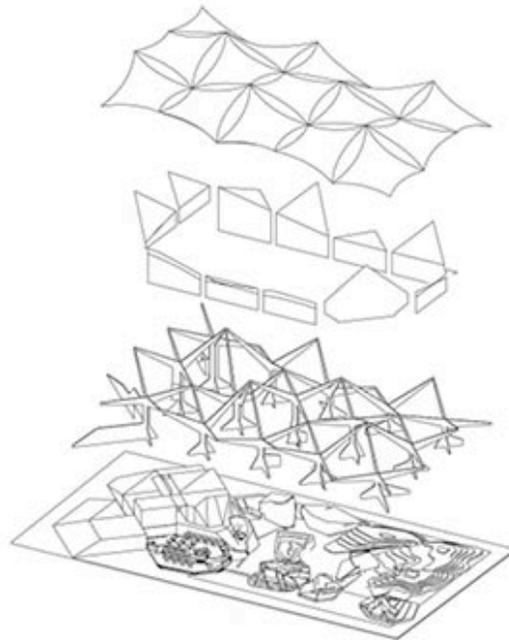
Arquitecto: Helen Hard

Año: 2010

Localización: Shanghái, China (EXPO)

Materialidad: Madera

Planimetría:



Estructura:





## CENTRO DE VISITANTES

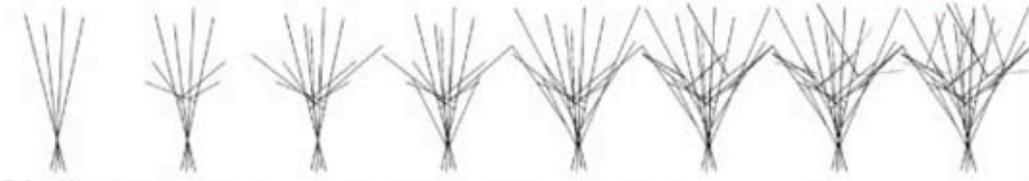
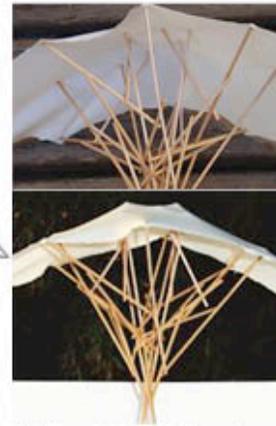
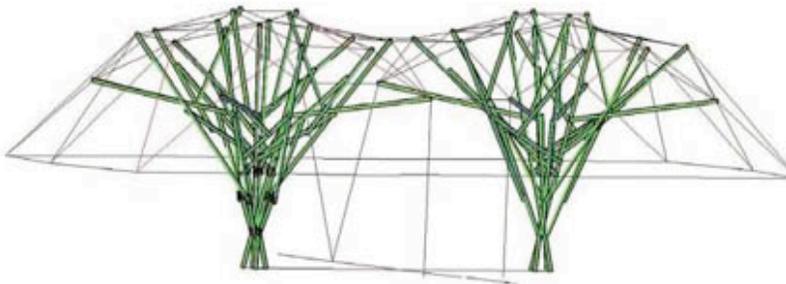
Arquitecto: Felix Escrig, José Sánchez

Año: 2011

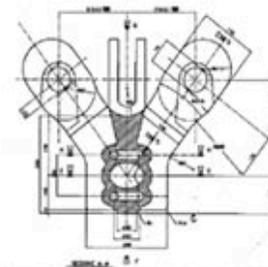
Localización: Melilla, España

Materialidad: Acero

Planimetría:



Estructura:





## CAPILLA EN EL BOSQUE

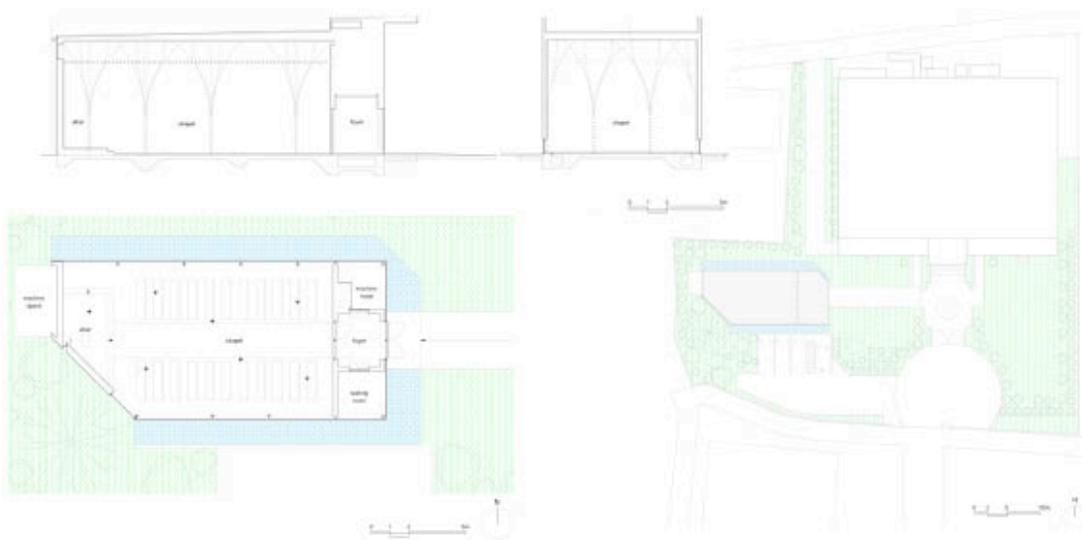
Arquitecto: **Hironaka Ogawa & Associates**

Año: **2011**

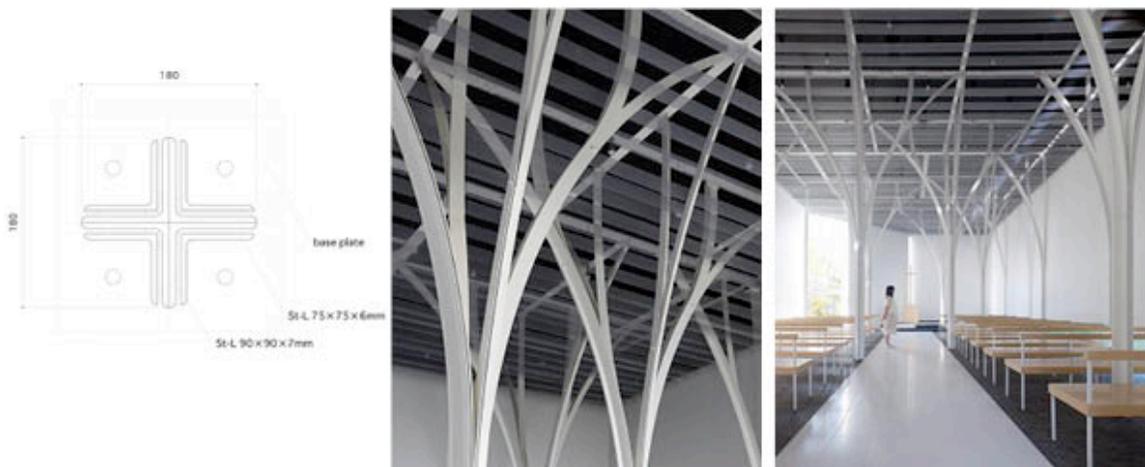
Localización: **Gunma, Japón**

Materialidad: **Acero**

### Planimetría:



### Estructura:



## TERMINAL 2-AEROPUERTO CHHATRAPATI SHIVAJI



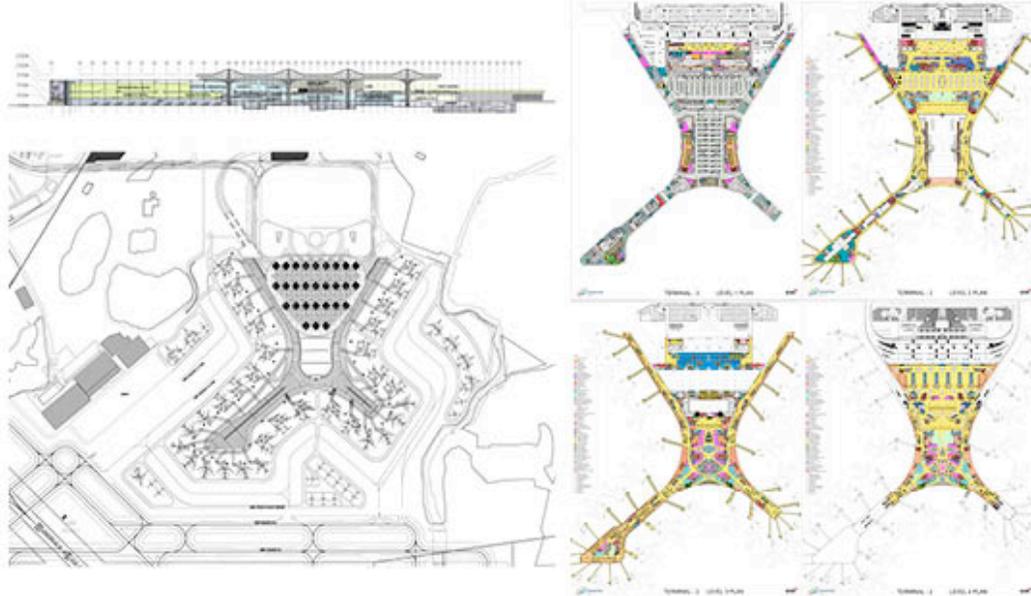
Arquitecto: Skidmore, Owings & Merrill

Año: 2014

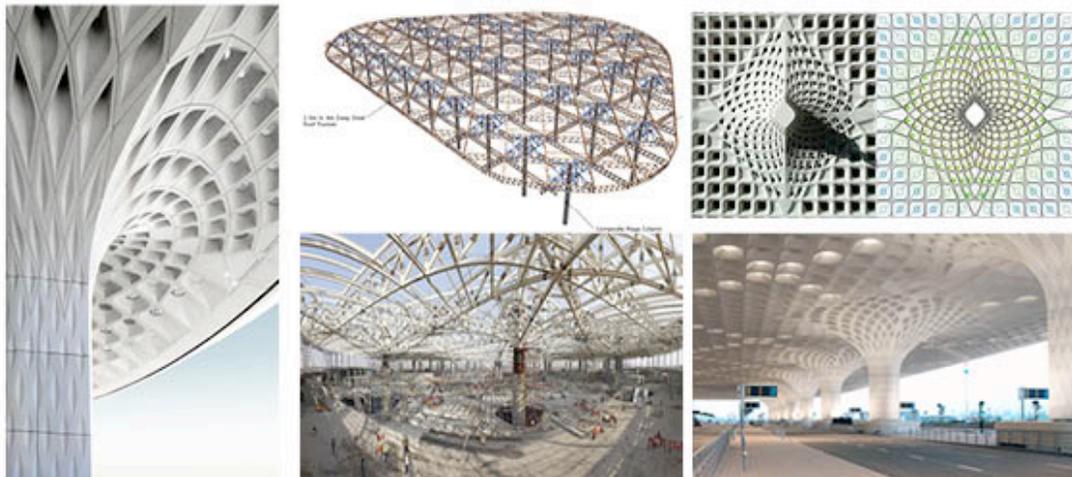
Localización: Mumbai, India

Materialidad: Hormigón Armado

### Planimetría:



### Estructura:



# Conclusiones

---

Según el estudio realizado, y comprobado en los distintos casos de la base de datos, los parámetros comunes que obtenemos formando los pilares de una estrategia de diseño ante estructuras ligeras de ramificación son:

1. - **Estrecha relación forma-función.** Depende de la distribución de la carga a soportar y la transmisión de ésta para obtener una determinada forma deseada.
2. - **No funcionan exactamente como un árbol natural.** Estas estructuras para que funcionen de forma óptima solo trabajan con esfuerzos axiales, mientras que las estructuras naturales también trabajan con esfuerzos flectores.
3. - Poseen una **gran carga estética** en cuanto al diseño integrado con la naturaleza.
4. - Utilizado actualmente en numerosas **estructuras ligeras.**
5. - Estructura **muy efectiva para salvar grandes luces** como puentes o edificios públicos de gran escala.
6. - Su buen **funcionamiento depende de los nudos** realizados. Éstos por lo general deben ser rígidos.
7. - **Se buscará el mayor número de apoyos posible.** La distancia entre dichos puntos, y por lo tanto la separación de la trama, dependerá de la carga a soportar y la geometría de la cubierta.
8. - **Todos los elementos** de las estructuras de la naturaleza **trabajan por igual en armonía.** Todos trabajan con la misma relación carga-esbeltez debido a su forma de transmisión de carga.
9. - En todos los estudios contemporáneos, se muestra que el acero es el material que presenta la mayor capacidad de soporte de carga, con menores deformaciones y simultáneamente de volumen y masa más pequeña, por lo tanto, **el acero es la mejor elección** para la creación y diseño de estructuras ligeras a pesar de poseer un peso específico más alto (10 veces la madera, y 3 veces el hormigón).

# Líneas de Aplicación Existentes

Actualmente, éste tipo de estructuras estudiado posee la ventaja de poder ser trabajado en cualquiera de los ámbitos que contiene la arquitectura. De manera ilustrativa, las líneas de aplicación donde la utilización de estructuras ligeras de ramificación tipo árbol pueden ser características son:

- Grandes espacios públicos



*John McAslan + Partners:  
Estación King's Cross de  
Londres*

- Mobiliario



*Zhili Liu, Shrub table.*

*Mobiliario minimalista  
inspirado en la  
naturaleza.*

- Mobiliario urbano – sostenible



*Milos Milivojevic, Árbol  
negro*

*Mobiliario urbano con  
función de cargador solar  
público situado en el  
parque Tasmajdan de  
Belgrado*

- Construcción artística – cultural



*Oloom + Samuel Wilkinson*

*L'arbre de Flonville*

- Enmarcar accesos



*Jouda Perraudin*

*Palacio de Justicia de Melun*

- Protección / Cubrimiento



*Atxu Amann + Andrés Cánovas +  
Nicolás Maruri*

*Cubierta del parque arqueológico el  
Molinete en Cartagena*

# Propuesta

## Justificación y Proyecto.

Tras mi estudio e investigación, y a fin de demostrar el funcionamiento de forma empírica de las estructuras ramificadas, he realizado un proyecto para poner en práctica los conocimientos adquiridos y siguiendo mis propias pautas indicadas anteriormente en el apartado "Conclusiones".

Éste proyecto se localiza en la ciudad extremeña de Mérida, mi ciudad natal.



*Mérida, Badajoz*

Se sitúa en la Av. José Fernández López dónde busca el acondicionamiento de una plaza situada junto a la avenida mediante la creación de espacios de sombra y la posibilidad de la instalación de stands para una pequeña feria de

muestras como ha ocurrido en ocasiones, mediante una estructura ramificada que cubra linealmente parte de dicha plaza.

El entorno más inmediato de este proyecto posee un gran valor arquitectónico debido, tanto por su posición junto al río Guadiana como por las edificaciones colindantes.



*Entorno Proyecto. Mérida*



*1. Puente Lusitania*



2. Palacio de Congresos



3. Biblioteca Pública del Estado

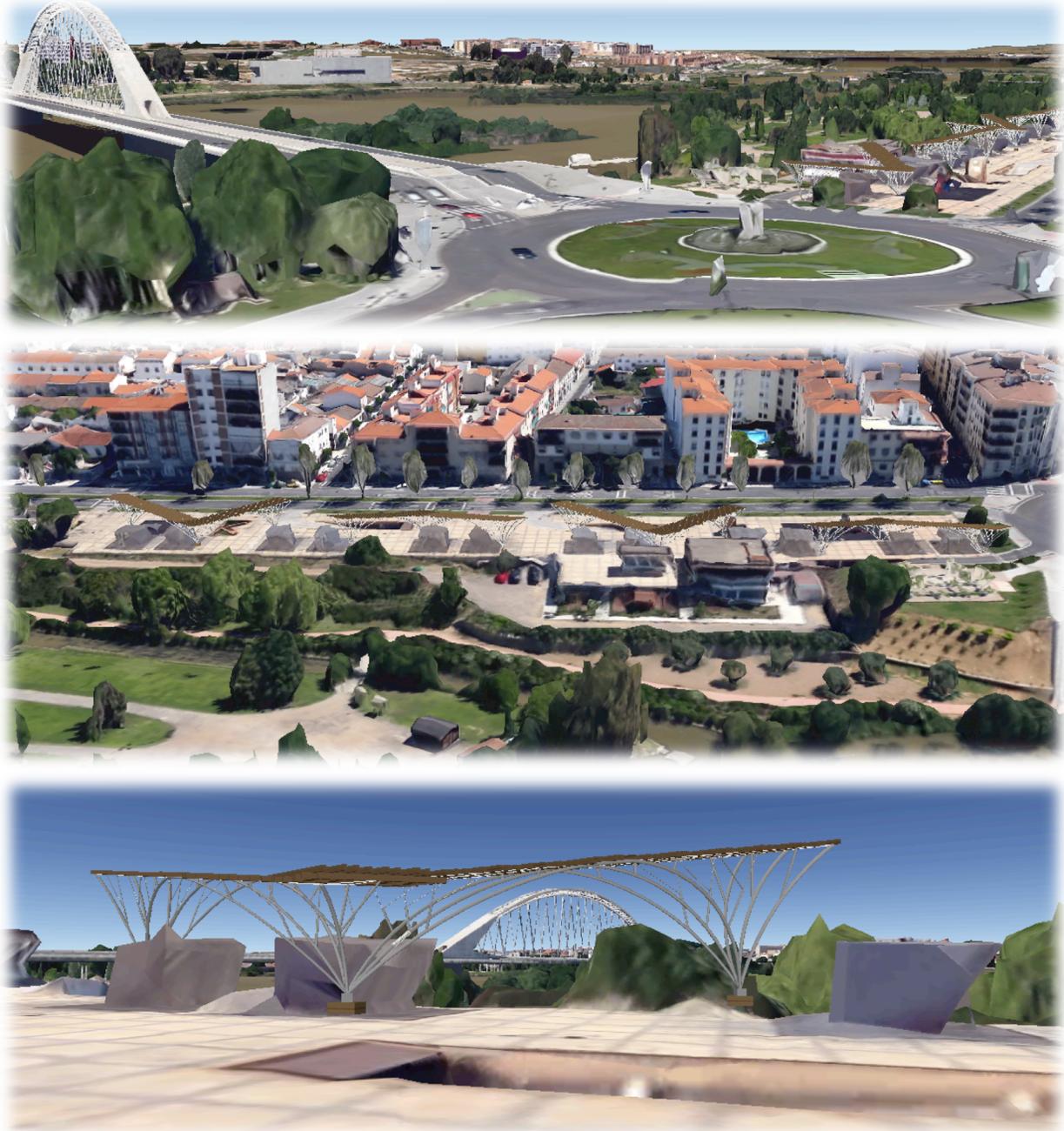
4. Consejerías Junta de Extremadura



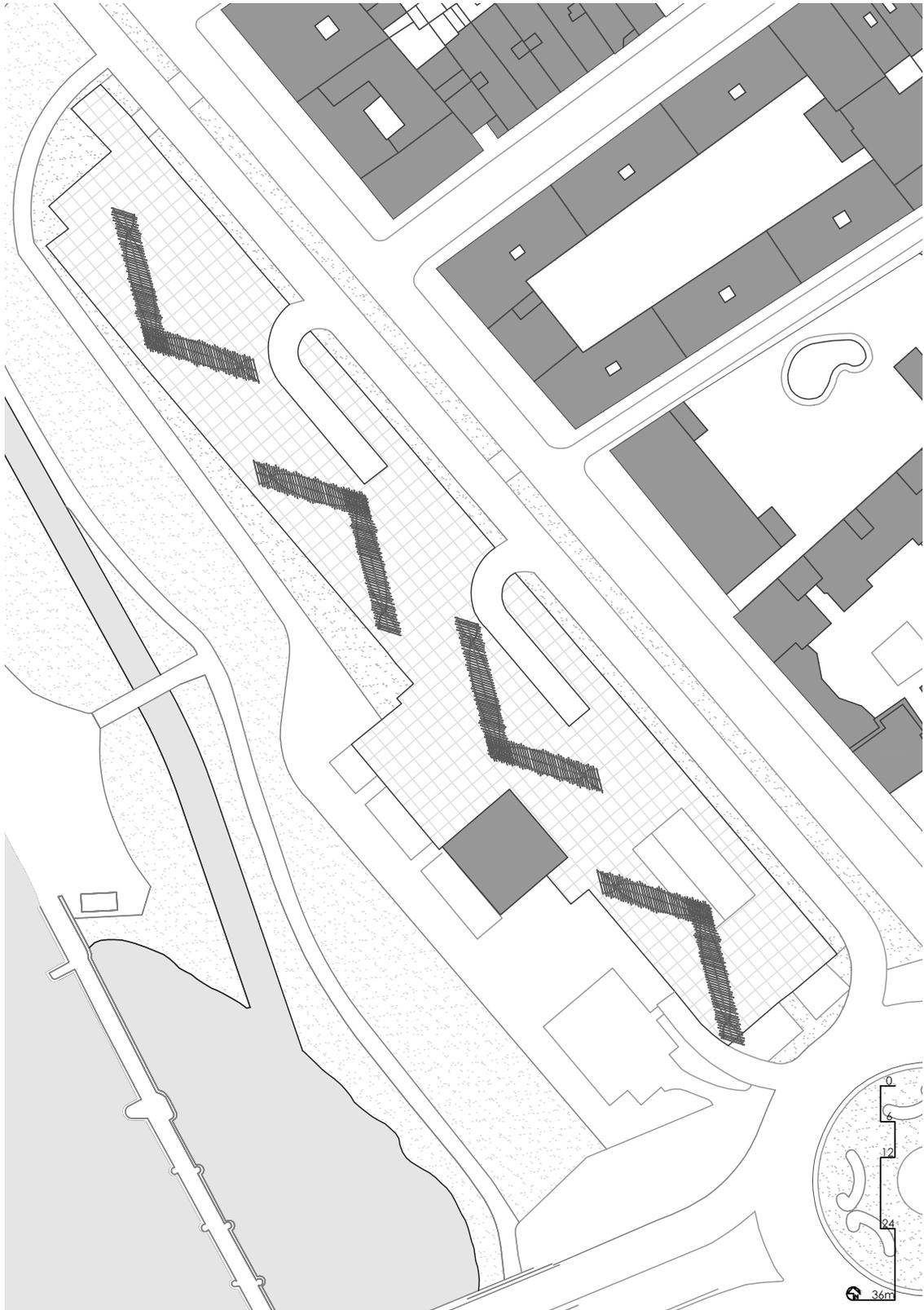
5. Lugar del Proyecto

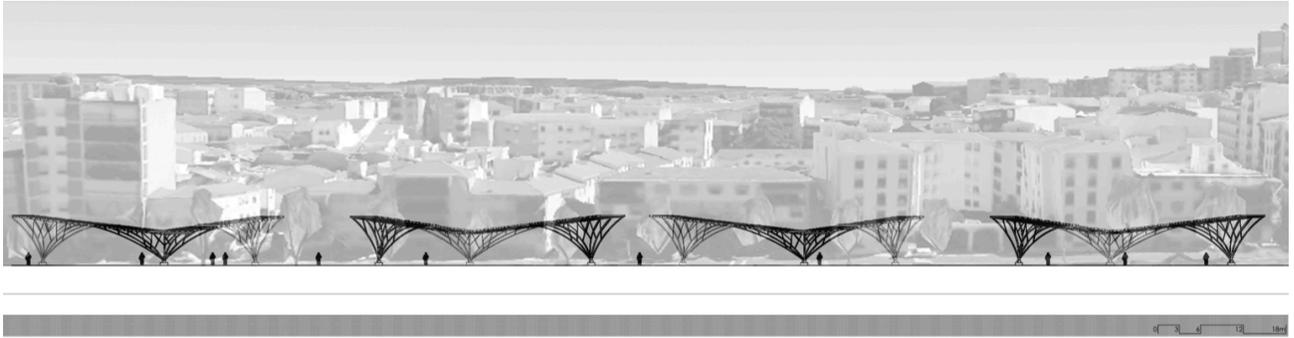
Actualmente, el lugar del proyecto posee doce pérgolas metálicas posicionadas linealmente, sin éxito de funcionamiento social y en el caso de alguna de ellas obstaculizando a la edificación de la propia plaza.

El proyecto surge desde éste contexto, para dar una mayor carga estética y arquitectónica al entorno, y para que esta plaza pueda brindar un buen espacio público para la ciudad.

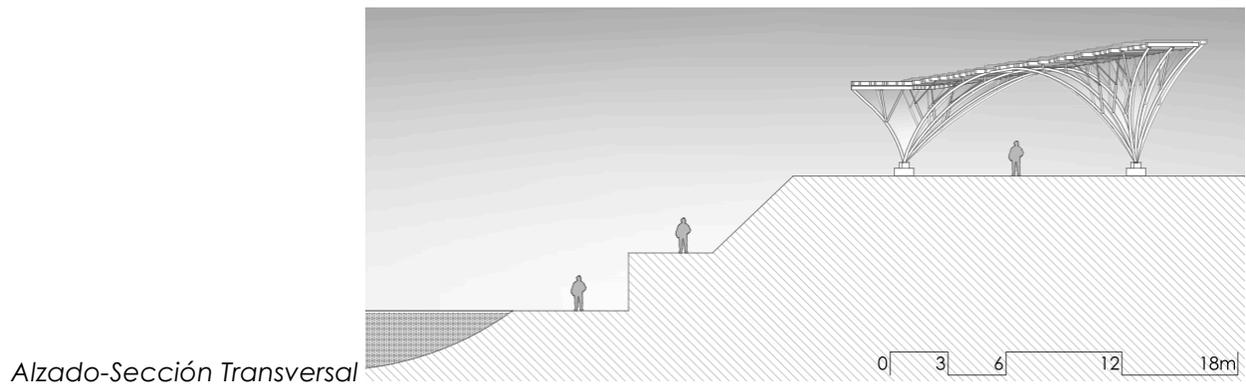


*Imágenes del Proyecto*

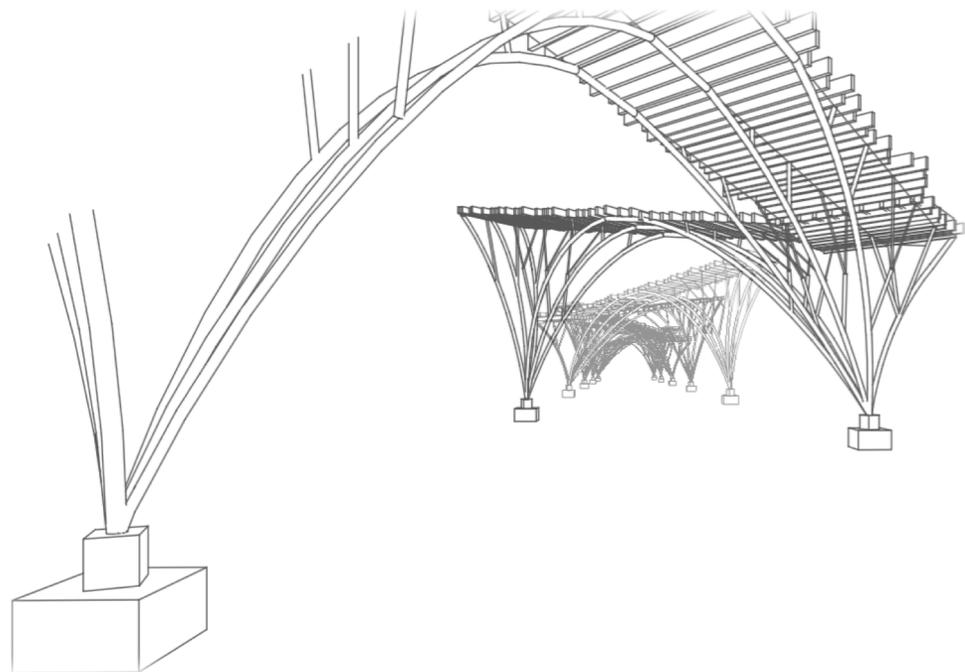




Alzado general \_ Suroeste

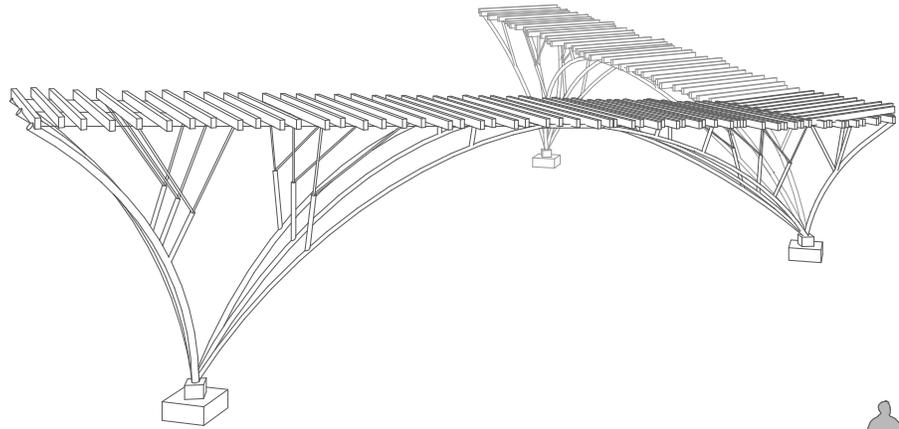


Alzado-Sección Transversal



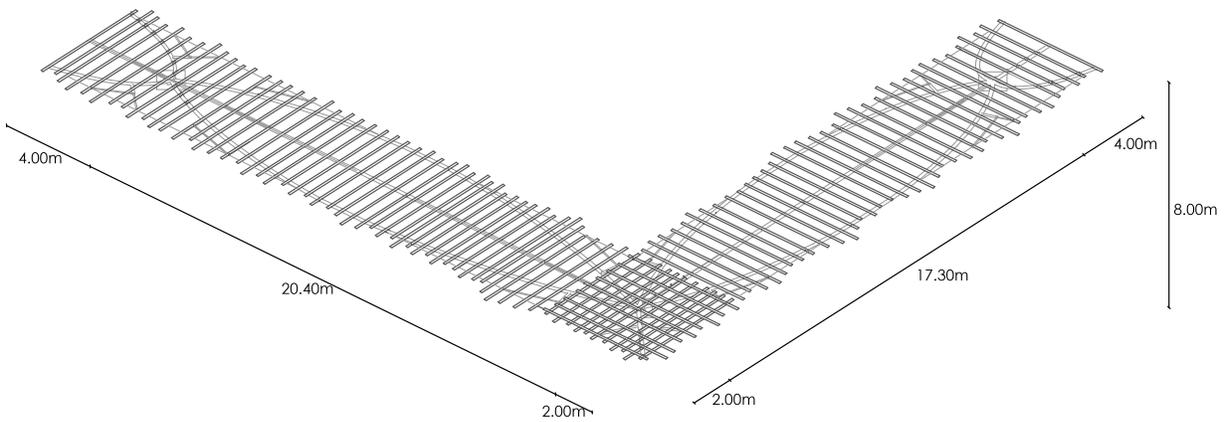
Perspectiva Interior

# Definición del Modelo.

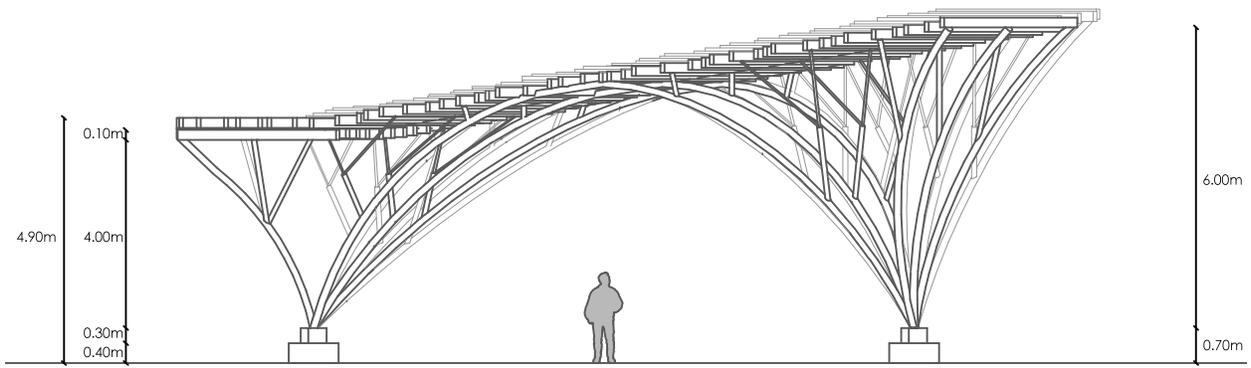


Perspectiva

29.00m



Planta Acotada



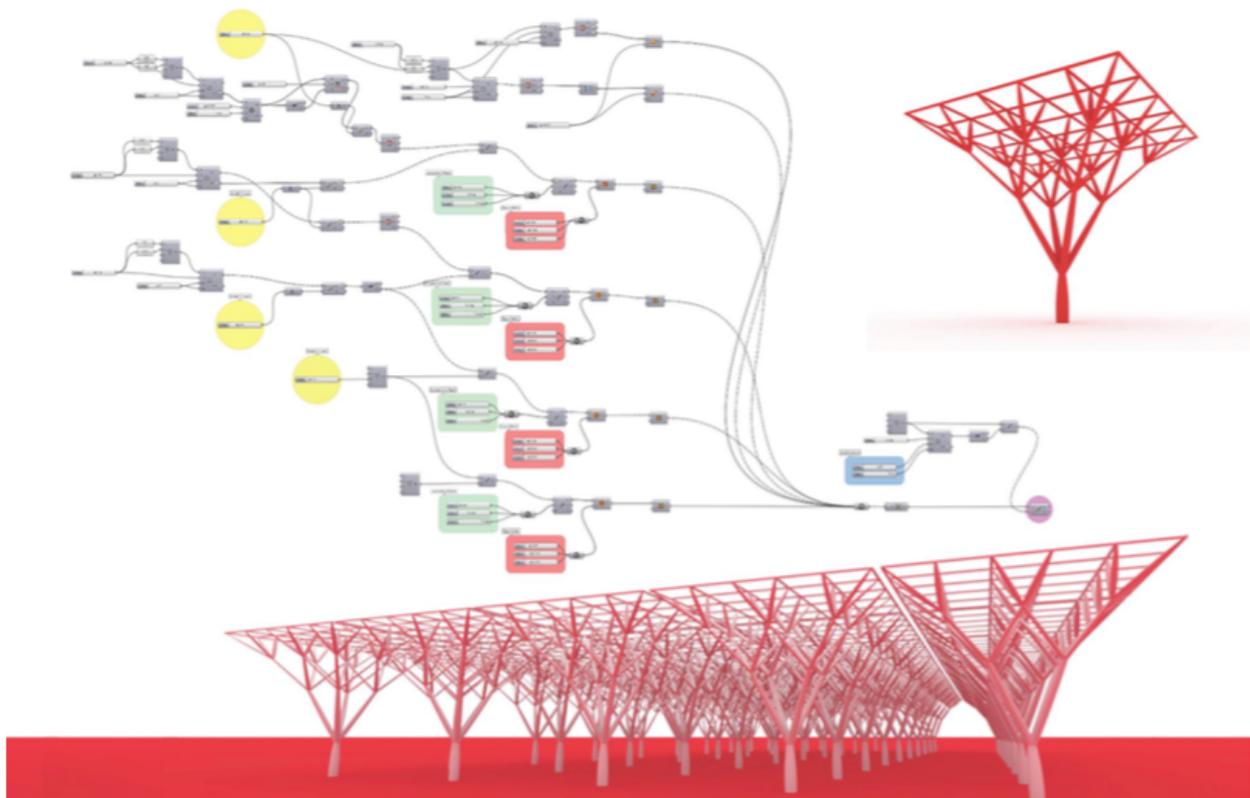
Alzado Transversal Acotado

# Líneas Futuras de Investigación

## Grasshopper

Éste es un trabajo que no tiene su punto final aquí, si no que más bien puede considerarse como un punto y seguido. Tras realizar éste estudio, análisis, y propuesta personal donde se comprueban dichos conocimientos, dicha investigación continuaría mediante la parametrización de los elementos de una estructura de ramificación para dar así mayor exactitud y facilidad para afrontar un futuro caso similar.

La parametrización y su estudio se realizará mediante la ayuda de programas informáticos, como es el caso del programa de modelado 3D Rhinoceros, a través de su plug-in de parametrización Grasshopper.



## Material de cubrición.

En mi proyecto, el material de cubrición elegido ha sido la madera laminada, dispuesta mediante un enlaminado para la creación de una sombra continua formada por las cuatro estructuras planteadas de forma lineal.

A pesar de este material, existen múltiples opciones con distintas prestaciones y características a tener en cuenta para futuros usos como puede ser:

- Material textil
- Placas fotovoltaicas para dar servicio eléctrico a su entorno
- Material textil con células fotovoltaicas integradas
- Paneles metálicos
- Estructura secundaria para una envolvente ligera
- Cubierta vegetal

Existe un gran número de posibilidades de cubrimiento, por lo que una línea futura de investigación de este proyecto global sería del estudio de este campo en función de las posibilidades de uso que ofrece, peso, etc.

En concreto, el caso de estudio que ofrece mayor interés bajo mi punto de vista sería la cubrición mediante placas fotovoltaicas ya sea sobre un soporte rígido o textil para así poder funcionar el proyecto como una pequeña central eléctrica urbana sostenible y poder abastecer en cierto porcentaje a los elementos de su contexto.

## Detalles Constructivos de Uniones.

La realización de las uniones de los elementos dentro de una estructura de ramificación es imprescindible, ya que de ellos dependerá su buen funcionamiento. Estas uniones están caracterizadas por ser nudos rígidos y transmitir la carga mediante esfuerzos axiales, pero a pesar de ellos existen numerosas variantes, cada una de ellas adaptadas a un proyecto determinado.

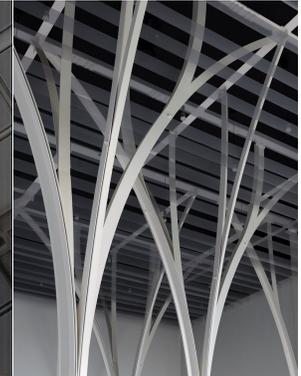
Algunos ejemplos de estos detalles constructivos de las uniones son:



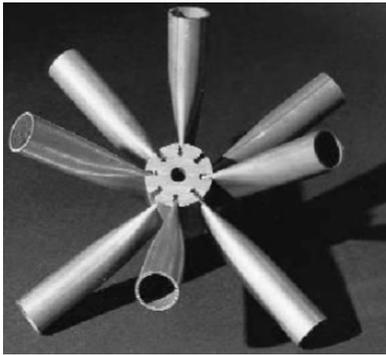
*Aeropuerto Madrid*



*Aeropuerto Stuttgart*



*Capilla en el Bosque*



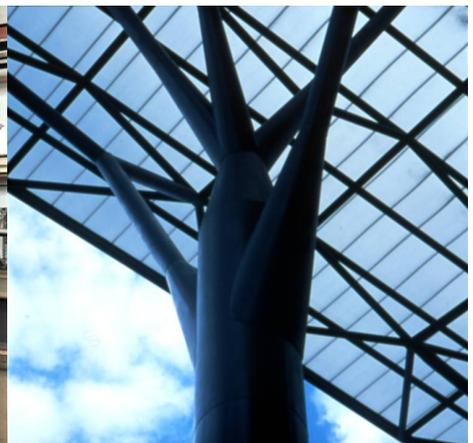
*Centro de Visitantes de Melilla*



*The Tote*



*Pajarera*



*Palacio de Justicia de Melun*

Para llevar a la realidad mi propuesta personal habría que definir y diseñar las uniones necesarias siguiendo estas variantes, por lo que habría que realizar un estudio a fondo de los distintos nudos existentes dentro de la materialidad del acero, comprobando las incompatibilidades entre materiales, funcionamiento, fabricación, puesta en obra, etc., y compararlos para llegar a la solución más viable.

## Cimentaciones.

La cimentación de este tipo de estructura dependerá, como en todos los proyectos de arquitectura, del terreno a trabajar y las cargas a transmitir. Por ello, éste tema será una línea futura de investigación de gran importancia en función del caso a estudiar.

En el caso de mi propuesta personal, la cimentación está ya definida por la edificación del parking existente bajo mi estructura. El estudio de ésta se basaría en la comprobación de que la cimentación construida es capaz de soportar los nuevos esfuerzos, y de realizar los recalces y refuerzos necesarios si fuese preciso.

# Bibliografía

---

- Brown, Claud L., (1975). Crecimiento y la forma. Capítulo III: Árboles: Estructura y Función.
- Charlson A. W., (2005). Estructura como Arquitectura.
- Cobb F., (2004). Libro de bolsillo del ingeniero estructural.
- Eggen, AP, y Sandaker, NB, (1995) Acero, Estructura y Arquitectura, biblioteca Whitney de diseño.
- Journal, vol. 19, n. 2-3, pp 151-163. Springer Berlin/Heidelberg.
- Linsen, L. et al., (2005). Tree Growth Visualization. The Journal of WSCG, vol. 13.
- Macdonald, A. J. (2001). Estructura y Arquitectura.
- Mark, R. (1994). Luz, viento, y Estructuras: El misterio de los maestros constructores.
- Marg, V. (2006). Stadien und Arenen. Von Gerkan, Marg und Partner, Hatje Cantz.
- Nerdinger, W., (2005). Frei Otto Complete Works Lightweight Construction Natural Design.
- Prosnez, A., (2003). Therme Bad Oynhausen. In: Atlas Holzbau. Birkhauser.
- Prusinkiewicz, P., (1998). Modelización de estructura y desarrollo de plantas.
- Horticulturae, vol.74.
- Schlaich, J. and Bergermann, R. (2004) Leicht Weit/Light Structures. DAM.
- Schultz, H. C. et al., (2000). Manual de la construcción en acero.
- Font Quer, P. 1953. Diccionario de botánica. Barcelona, Editorial Labor.
- Rec. M. BOTANICA 1969. Rebelais.

## Enlaces Web

[https://books.google.es/books?id=in3OBQAAQBAJ&pg=PA1339&lpg=PA1339&dq=melilla+visitors+center+nature&source=bl&ots=NRdp\\_tQZ8C&sig=UmVHjVlpw2JUiCL52Gg2FsedNC4&hl=es&sa=X&ei=c9GQVeCuKoOwUeXsqlgL&ved=0CCIQ6AEwAA#v=onepage&q=melilla%20visitors%20center%20nature&f=false](https://books.google.es/books?id=in3OBQAAQBAJ&pg=PA1339&lpg=PA1339&dq=melilla+visitors+center+nature&source=bl&ots=NRdp_tQZ8C&sig=UmVHjVlpw2JUiCL52Gg2FsedNC4&hl=es&sa=X&ei=c9GQVeCuKoOwUeXsqlgL&ved=0CCIQ6AEwAA#v=onepage&q=melilla%20visitors%20center%20nature&f=false)

<https://designontopic.wordpress.com/2014/01/18/branching/>

<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl>

<http://www.group8.ch/index2.php>

<http://blog.bellostes.com/?p=4311>

[http://www.jourdaarchitectes.com/test/testPage.php?langue=en&section=archi&etat=\\_realisati&categorie=bat\\_publics&code=melun&page=1](http://www.jourdaarchitectes.com/test/testPage.php?langue=en&section=archi&etat=_realisati&categorie=bat_publics&code=melun&page=1)

<http://www.bathintime.co.uk/category/17245/churches-chapels-cemeteries/bath-abbey>

# Anexos

## Modelo de cálculo. Materiales.

Los materiales utilizados son: acero S275 para los perfiles tubulares que componen la estructura y madera laminada para los shells situados sobre dicha estructura como material de cubrimiento mediante un enlaminado, utilizados únicamente para la transmisión de las cargas superficiales (viento, nieve, sobrecarga de uso) a la estructura.

Los datos de dichos materiales están registrados en las siguientes tablas dadas por el programa informático:

- Propiedades generales de los materiales

Table: Material Properties 01 - General

Material	Type	SymType	TempDepend	Color	GUID	Notes
4000Psi	Concrete	Isotropic	No	Red		Customary f'c 4000 psi 19/05/2015 12:04:00
A992Fy50	Steel	Isotropic	No	Cyan		ASTM A992 Grade 50 19/05/2015 12:04:00
BARRAS	Steel	Isotropic	No	Blue		Europe EN 1993-1-1 per EN 10025-2 S275 added 19/05/2015 12:10:12
SHELLS	Concrete	Isotropic	No	8454143		Europe EN 1992-1-1 per EN 206-1 C30/37 added 19/05/2015 12:10:51

- Propiedades mecánicas básicas

Table: Material Properties 02 - Basic Mechanical Properties

Material	UnitWeight KN/m3	UnitMass KN-s2/m4	E1 KN/m2	G12 KN/m2	U12	A1 1/C
4000Psi	2,3563E+01	2,4028E+00	24855578,06	10356490,86	0,200000	9,9000E-06
A992Fy50	7,6973E+01	7,8490E+00	199947978,8	76903068,77	0,300000	1,1700E-05
BARRAS	7,6973E+01	7,8490E+00	210000000,0	80769230,77	0,300000	1,1700E-05
SHELLS	3,8000E+00	3,8749E-01	11600000,00	4833333,33	0,200000	5,5000E-06

- Datos de los frames

Table: Material Properties 03a - Steel Data

Material	Fy KN/m2	Fu KN/m2	EffFy KN/m2	EffFu KN/m2	SSCurveOpt	SSHysType	SHard	SMax	SRup	FinalSlope
A992Fy50	344737,89	448159,26	379211,68	492975,19	Simple	Kinematic	0,015000	0,110000	0,170000	-0,100000
BARRAS	275000,00	410000,00	275000,00	410000,00	Simple	Kinematic	0,015000	0,110000	0,170000	-0,100000

- Datos de los shells

Table: Material Properties 03b - Concrete Data

Material	Fc KN/m2	LtWtConc	SSCurveOpt	SSHysType	SFc	SCap	FinalSlope	FAngle Degrees	DAngle Degrees
4000Psi	27579,03	No	Mander	Takeda	0,002219	0,005000	-0,100000	0,000	0,000
SHELLS	1,00	No	Mander	Takeda	0,001818	0,005000	-0,100000	0,000	0,000

- Parámetros de amortiguación

Table: Material Properties 06 - Damping Parameters

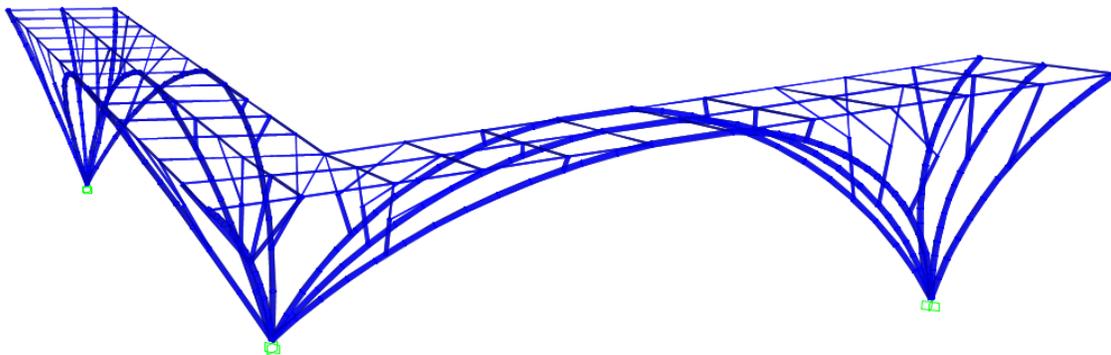
Material	ModalRatio	VisMass 1/Sec	VisStiff Sec	HysMass 1/Sec2	HysStiff
4000Psi	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000000
A992Fy50	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000000
BARRAS	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000000
SHELLS	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000000

## Modelo de cálculo. Perfiles.

La propuesta diseñada está realizada mediante perfiles tubulares de acero de distintas dimensiones según va creciendo dicha estructura y se va ramificando.

En ella encontramos tres tipos de perfiles, fabricados siempre en acero S275, los cuales son:

- **Perfil Principal.** Perfil tubular de dimensiones  $\varnothing 150 \times 10$  mm en los arcos que unen los tres soportes.
- **Perfil Secundario.** Perfil tubular de dimensiones  $\varnothing 100 \times 10$  mm en la primera ramificación que se produce a partir de los arcos.
- **Perfil Terciario.** Perfil tubular de dimensiones  $\varnothing 50 \times 5$  mm en la segunda ramificación que se produce a partir de los perfiles secundarios.



## Modelo de cálculo. Acciones.

Las acciones consideradas para el cálculo y estudio del modelo informático son:

- Peso propio acero S275
- Viento =  $1 \text{ KN/m}^2$
- Nieve =  $1,5 \text{ KN/m}^2$
- Sobrecarga =  $0,2 \text{ KN/m}^2$

Éstas acciones son introducidas en SAP2000 con su manera de actuar en el modelo, ya sea como carga gravitatoria como la con carga, carga gravitatoria proyectada como la carga de nieve, o con carácter normal a los shell que componen el pabellón como es el caso de la carga de viento según su orientación (introduciendo una mitad como presión, hacia abajo, y otra como succión, hacia arriba, en la hipótesis de viento).

La acción del viento la considero como un única hipótesis ya que al tratarse prácticamente de una superficie plana la superficie de los shells, la dirección donde actúe el viento no importa siento los efectos los mismos.

## Modelo de cálculo. Combinaciones.

Para poder realizar el cálculo del modelo informático primero hemos de definir las combinaciones pertinentes para ver el comportamiento de éste en las situaciones más desfavorables. El programa de base nos realiza las combinaciones necesarias según la normativa elegida, que en nuestro caso sería el EuroCódigo2005 (parte 3 – Acero). De estas combinaciones dadas, tomamos como más desfavorables para el cálculo y análisis las siguientes:

- COMBINACIÓN CARGAS VERTICALES + VIENTO. En ésta combinación consideramos todas las cargas verticales más la acción del viento actuando como presión con sus correspondientes coeficientes de mayoración:  
DEAD (1,35)+NIEVE (1,05)+SOBRECARGA DE USO (1,05)+VIENTO X (1,50)

## Modelo de cálculo. Estudio de las Deformaciones.

Analizando el modelo en los supuestos de hipótesis simple de peso propio, viento como presión y viento como succión, se han analizado las deformaciones del modelo inicial obteniendo los siguientes resultados máximos (al ser ELS se comprueba con las cargas sin mayorar):

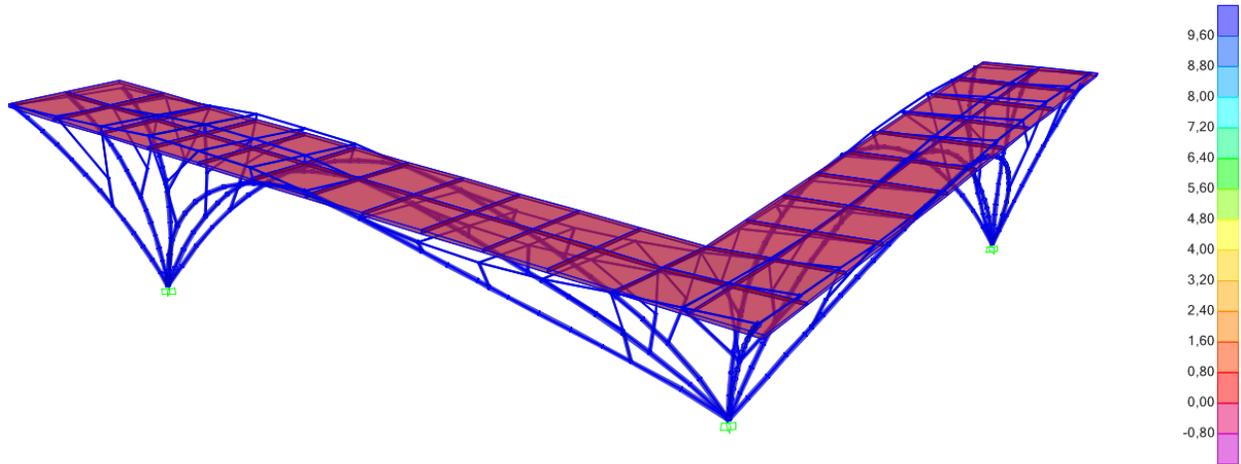
- Peso propio:  $8.9 \cdot 10^{-3}$  m (8.9 mm)
- Viento:  $14.1 \cdot 10^{-3}$  m (14.1 mm)
- Combinación con viento:  $9.9 \cdot 10^{-3}$  m (9.9 mm)
  
- Desplome:  $5.0 \cdot 10^{-3}$  m (5 mm)

Dichos valores, si los sometemos a las comprobaciones pertinentes de flecha máxima y desplome (consideramos L/250 ya que cuenta con una cubierta ligera que puede admitir ciertas deformaciones y que no es registrable, por ser de tela).

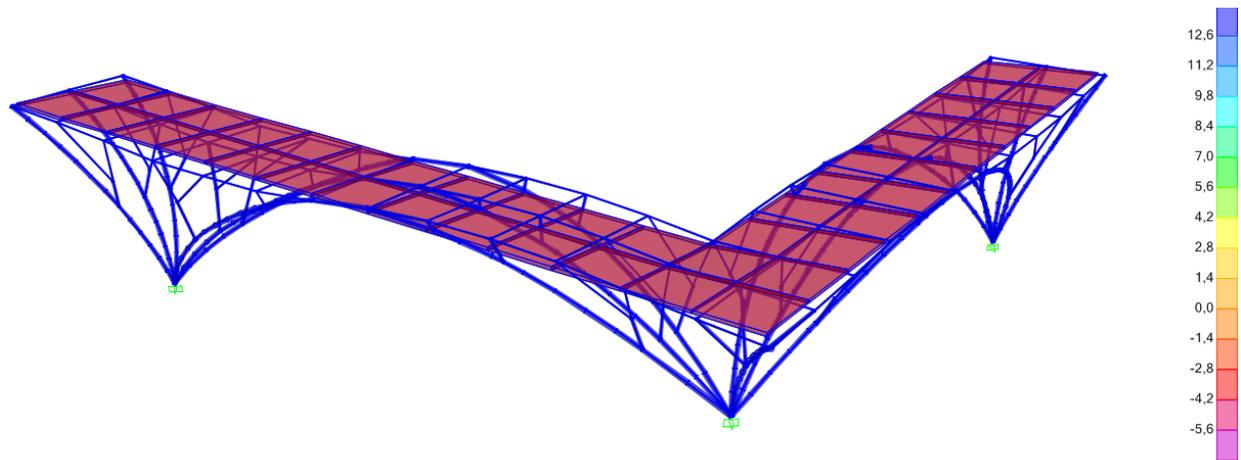
- Comprobación flecha L/250 :  $20,40/250 = 0.081$  m (81 mm)
- Comprobación flecha L/250 :  $17,32/250 = 0.069$  m (69 mm)
  
- Comprobación desplome H/500 :  $6/500 = 0.012$  m ( 12 mm)
- Comprobación desplome H/500 :  $4/500 = 0.008$  m ( 8 mm)

El valor de flecha máxima en nuestro caso es de 14.1 mm, y el desplome de 5 mm, por lo cual ambos valores cumplen los límites por normativa.

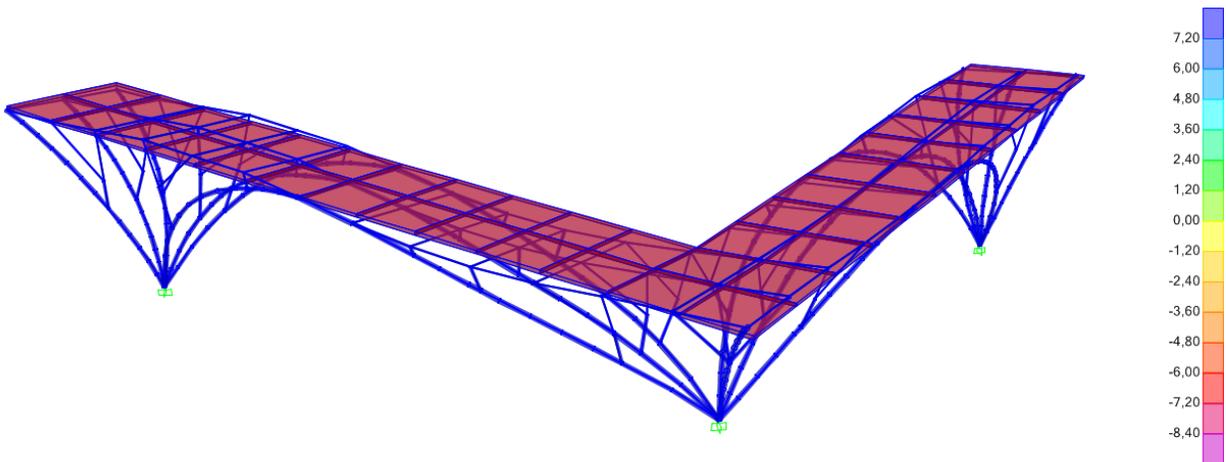
Se adjunta a continuación los diagramas de deformaciones máximas para las hipótesis de las cargas consideradas.



*Deformada – Peso Propio*



*Deformada – Peso Viento*



*Deformada – Combinación Cargas Verticales + Viento*

## Modelo de cálculo. Reacción en los apoyos

En el modelo de cálculo, todos los vínculos exteriores, al igual que los interiores, son nudos rígidos para que así la transmisión de la carga sea directa desde el punto más alto al punto más bajo, en éste caso la estructura de hormigón armado del parking donde se apoya.

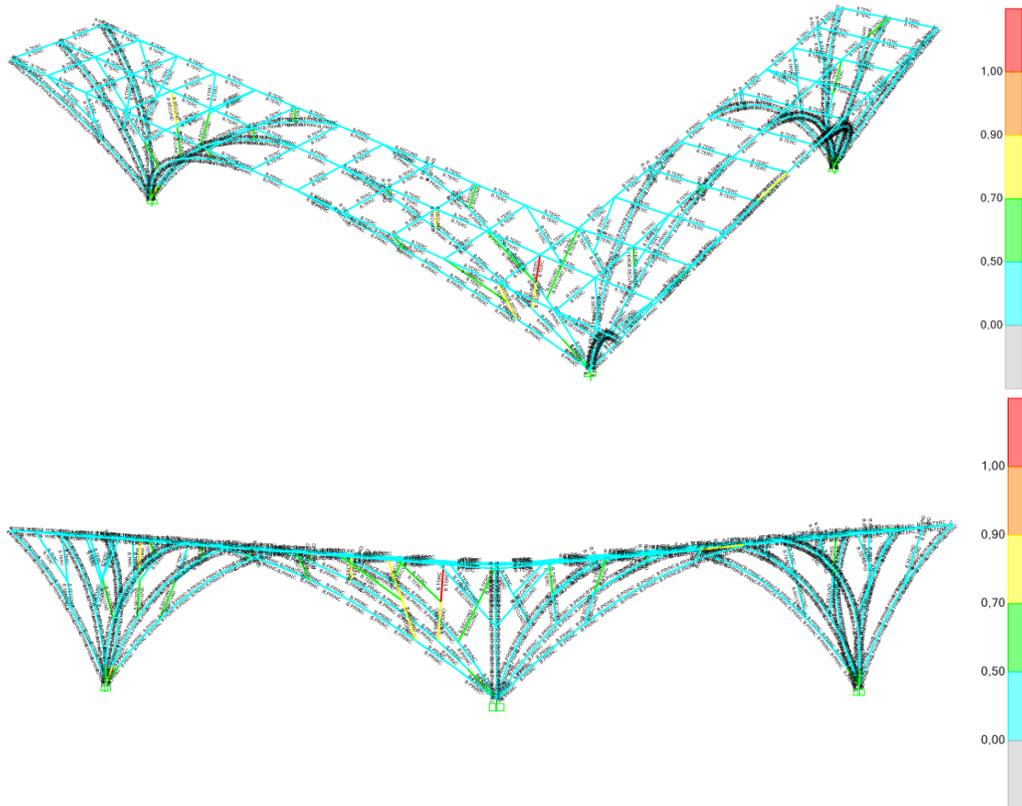
Se adjunta la tabla obtenida de SAP con los valores de dichas reacciones:

Joint	OutputCase	CaseType	F1	F2	F3	M1	M2	M3
			KN	KN	KN	KN - m	KN - m	KN - m
53	DEAD	LinStatic	- 8,285	31,549	64,492	14,4829	7,1767	0,4688
53	COMB VIENTO PRESION	Combination	- 15,945	66,952	115,757	11,0865	11,8705	0,6538
53	COMB VIENTO SUCCION	Combination	- 15,945	66,952	115,757	11,0865	11,8705	0,6538
93	DEAD	LinStatic	- 13,881	- 14,553	41,448	9,2444	- 1,8019	0,9462
93	COMB VIENTO PRESION	Combination	- 20,139	- 20,493	65,362	8,3245	- 0,5539	1,0215
93	COMB VIENTO SUCCION	Combination	- 20,139	- 20,493	65,362	8,3245	- 0,5539	1,0215
99	DEAD	LinStatic	22,166	- 16,996	48,256	11,5397	8,4372	- 0,5172
99	COMB VIENTO PRESION	Combination	33,836	- 24,982	77,341	12,7226	12,7318	- 0,5190
99	COMB VIENTO SUCCION	Combination	33,836	- 24,982	77,341	12,7226	12,7318	- 0,5190

## Modelo de cálculo. Aprovechamiento de perfiles

El método utilizado para el cálculo de la estructura en SAP2000 ha sido el método de ensayo y error, aumentando progresivamente los diámetros, espesores o ambos a la vez hasta llegar a la solución actual. Al aumentar los diámetros o espesores de cada perfil tubular no se realiza de modo aleatorio, sino con cierta lógica estructural ya que un perfil mayor supone un peso mayor. Finalmente, el resultado obtenido es el de realizar la estructura mediante los tres tipos de perfiles nombrados anteriormente en el anexo de "Modelo de Cálculo. Perfiles" con un aprovechamiento óptimo de las barras.

Se adjuntan los diagramas de aprovechamiento de SAP2000 de la estructura, en la que se ve que la mayoría de barras están por debajo del 70% de aprovechamiento, excepto en las zonas más críticas. En el diagrama se observa una de las barras de color rojo, pero se asocia a un problema en el cálculo realizado por el programa, ya que tras realizar varias pruebas, incluso eliminando dicho elemento, la estructura sigue funcionando de la misma manera con las mismas deformaciones.



# Documento Digital

---