

Universidad Politécnica de Valencia

TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES PARA GRANDES LUCES

Trabajo Final de Grado - Departamento Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.

López Navarro, Antonio

RESUMEN

El presente trabajo consiste en estudiar el comportamiento y la forma de trabajo de las diferentes tipologías estructurales adecuadas para edificios de grandes luces. Se realiza una introducción histórica y un análisis general de cada uno, tras lo cual se selecciona un edificio representativo de cada tipología sobre el que se aplica lo estudiado, detallando mediante imágenes los esfuerzos a los que están sometidos los diferentes elementos que componen su estructura principal.

De este estudio se sacan unas conclusiones en cuanto a la idoneidad de cada tipología, comparando brevemente las diferentes tipologías, ventajas y características, y formando una base con criterios suficientes para realizar la adecuada elección ante los condicionantes de cualquier edificio.

Palabras clave:

Tipologías estructurales, estructuras de edificios de grandes luces, comportamiento estructural

RESUM

El present treball consisteix en estudiar el comportament i la forma de treball de les diferents tipologies estructurals adequades per a edificis de grans llums. Es realitza una introducció històrica i una anàlisi general de cadascun. Després d'açò, es selecciona un edifici representatiu de cada tipologia sobre el qual s'aplica l'estudiat, detallant mitjançant imatges els esforços als quals estan sotmesos els diferents elements que componen la seua estructura principal.

D'este estudi es trauen unes conclusions quant a la idoneïtat de cada tipologia, comparant breument les diferents tipologies, avantatges i característiques, i formant una base amb criteris suficients per a realitzar l'adequada elecció davant els condicionants de qualsevol edifici.

Paraules clau:

Tipologies estructurals, estructures de edificis de grans llums, comportament estructural

ABSTRACT

The present work consists in studying the behavior and how the different structural typologies suitable for buildings of big spans work. A historical introduction and a general analysis of each one is carried out. The study is then applied to a selected building representative of each typology. The internal forces acting in each structural element of the main structure are shown through images.

This study draws conclusions on the appropriateness of each typology, briefly comparing the different typologies, advantages and characteristics, and forming a basis of knowledge with enough criteria to make the appropriate choice according to the constraints of any building.

Keywords:

Structural typologies, horizontal-span building structures, structural behavior

INDICE

1. Introducción.
2. Metodología y Objetivos.
3. Arcos.
 - a. Introducción Histórica.
 - b. Análisis general.
 - c. Aplicación en caso real.
4. Cables, Tensoestructuras y Estructuras Neumáticas.
 - a. Introducción Histórica.
 - b. Análisis general.
 - c. Aplicación en caso real.
5. Celosías, Mallas Espaciales, Bóvedas y Cúpulas Trianguladas.
 - a. Celosía plana.
 - b. Análisis general.
 - c. Aplicación en caso real.
6. Estructuras Laminares
 - a. Cúpulas.
 - b. Análisis general.
 - c. Aplicación en caso real.
7. Conclusiones.
8. Bibliografía.

ANEXO I

Ficha I: Catedral Sagrado Corazón de Kericho / John McAslan + Partners

Ficha II: Instalaciones deportivas para las Olimpiadas de Tokio, Japón, 1964, Kenzo Tange.

Ficha III: Colegio de Farmacéuticos de Valencia, proyecto de MDM Arquitectos + Ricardo Merí.

Ficha IV: Mercado de Abastos de Algeciras, Cádiz, España, 1935, Eduardo Torroja.

1. INTRODUCCIÓN

La Arquitectura ha evolucionado mucho desde sus inicios, así como los campos que ésta abarca. De este modo la base de conocimientos necesaria para que el Arquitecto pueda ejercer ha aumentado exponencialmente. Desde lo más accesorio como podrían ser los acabados y su calidad, hasta la estructura, sin la cual no habría arquitectura, así su calidad de materiales y ejecución, como la adecuada elección del sistema estructural y su distribución en planta pueden modificar sustancialmente la experiencia del usuario, habitual o esporádico, que hace uso o vive esa construcción. La estructura a su vez ha ido cogiendo importancia, al ampliar tanto sus posibilidades, incorporando otras funciones como definir el aspecto exterior y/o interior, a la obvia de soportar la construcción. Por lo que su elección y cálculo excede en muchos casos de los conocimientos básicos adquiridos durante el periodo de preparación convencional de la actualidad.

Estos conocimientos básicos obligan a recurrir a la colaboración de ingenieros u otros especialistas para poder llevar a término una construcción satisfactoriamente, y más cuanto mayor es la dificultad que el diseño de ésta implica. Dificultad que viene condicionada también por la ubicación de la construcción y de las características del suelo donde se apoya y su interacción.

Asimismo, la ampliación de conocimientos también se aplica a los materiales con los que se realizan las estructuras, siendo el acero, hormigón y madera, los más usuales. Esto, junto con la imperiosa necesidad que ha ido creciendo de disminuir, en algunos casos, al mínimo posible la presencia de la estructura, implica una mayor exactitud en los respectivos cálculos necesarios, aspecto que repercute en lo ya comentado anteriormente sobre los conocimientos básicos que adquiere el actual Arquitecto, y que, como la experiencia ha demostrado ya sobradas veces, ha provocado diversos problemas, desde unas grietas con apenas importancia, hasta el completo desplome de un bloque ya edificado por la acción de unas fuerzas para las que no estaba debidamente proyectado y ejecutado. El proyecto de estructura debe estar realizado como elemento principal que es dentro del proyecto de ejecución, prestando atención a todo detalle, según uso, zona geográfica, geometría etc. ya que los más que posibles errores en el diseño y su consiguiente error de cálculo pueden llevar a la ruina al edificio.

Como parte de la naturaleza del ser humano, nuestras expectativas crecen a medida que lo hacen nuestras capacidades. Capacidades que han dado solución a las también crecientes exigencias, bien sean necesidades de bienestar, físico o mental, como de ocio o incluso tan solo de deleite visual del usuario al que va destinado. Por lo que se busca en determinadas situaciones que la estructura, como algo secundario casi, no entorpezca el uso efectivo del edificio o el aspecto tanto interior como exterior que el edificio ofrece, siendo este en muchos casos la firma del autor, y que puede llegar a condicionar el resto del proyecto. Esto conlleva un aumento paulatino de las luces que los arquitectos y usuarios buscan y reclaman, respectivamente. De ahí que una buena

elección en cuanto al sistema estructural se refiere, sus características y sus posibilidades de diseño y cálculo, pueden hacer posible o inviable un determinado proyecto, o producir defectos menores de aspecto pero que pueden llegar a afectar al usuario en diversas formas.

A tal efecto, en este trabajo se va a analizar una serie de sistemas estructurales que permiten, en mayor o menor medida, un incremento de las luces, según unos condicionantes como puede ser el uso previsto. Tras una breve introducción histórica de cada sistema estructural se ofrecerá unos criterios básicos que servirán para realizar una pequeña comparación y en los que poder fundamentar una elección, así como unos ejemplos reales con los que ilustrar cada sistema.

Los criterios básicos que se van a tratar a lo largo del presente trabajo son:

- Rango de luces de vano que es capaz de soportar dicho sistema, así como la capacidad de carga y por tanto el uso más acorde.
- Comportamiento y estabilidad tanto frente a cargas estáticas externas directas verticales como horizontales.
- Transmisión de los esfuerzos internos en los diferentes elementos que conforman la estructura, así como entre ellos.
- Interacción con los elementos de apoyo y su influencia en el comportamiento; posibilidades que ofrecen.
- Aplicación del análisis realizado a un caso real, en el que se puedan observar dichos criterios/aspectos comentados.
- Conclusión general del trabajo realizado resumiendo los aspectos.

Al finalizar el análisis de las diferentes tipologías, se adjuntará una ficha de un edificio de cada una a modo de ejemplo del sistema estructural descrito, en la que se enunciarán sus datos y características principales, y se incluirá un breve resumen de los aspectos generales del mismo.

Los distintos sistemas estructurales se estudiarán en función de su tipología, enumerando al inicio los más usuales y pasando a comentar uno por apartado:

- Arcos.
- Cables, Tensoestructuras y Estructuras Neumáticas.
- Celosías, Mallas espaciales, Bóvedas y Cúpulas Trianguladas.
- Estructuras Laminares y Superficies Regladas.

2. METODOLOGÍA y OBJETIVOS

La propuesta del presente trabajo es poner en común las características y comportamientos de algunos de los diferentes tipos estructurales que existen en la actualidad y que pueden dar coberturas a espacios de grandes dimensiones, con luces entre apoyos mayores de los usuales y que se incrementan día a día.

El trabajo se centra en el estudio del comportamiento y la transmisión de los esfuerzos, y cómo esto influye en el diseño y cálculo de las estructuras, tratando de esta forma de dar unas bases o criterios básicos a la hora de seleccionar el sistema más adecuado a las características geométricas y técnicas que se pueden presentar hoy en día a la hora de realizar un proyecto de gran envergadura. Ante la pregunta que surge en todo proyecto cuando se pretende dar solución técnica a un espacio de grandes luces, y las consecuentes preguntas que de esta difieren, como pueden ser, la elección del material, la mejor solución para la interacción entre elementos y las mejores condiciones para que el sistema apoye en el suelo y transmita todo su peso a este, por ejemplo, surge la necesidad de tener un compendio básico que resuma de modo lo más sencillo y brevemente posible la ingente cantidad de información que se puede encontrar hoy en día y que no siempre va a resultar correcta.

En primer lugar se realizó una búsqueda de fuentes de consulta, bases de datos y ejemplos gráficos necesarios. Una vez recopilada toda la documentación que se consideró que podía ser útil se procedió a discernir aquello que realmente podría aportar lo que en un primer momento se pretendía.

Tras describir y analizar los criterios básicos mencionados en la introducción para cada tipología objeto de estudio se procedió a la selección de un caso real que sirviera para, aplicando los criterios y estudios aquí expuestos, hacer una hipótesis perfectamente válida del funcionamiento y comportamiento en servicio de la estructura del edificio seleccionado; dando de esta manera un caso práctico y visual que permitiese apreciar de modo más gráfico esta diferencia.

Por último se realizó un resumen sobre cada uno de los edificios seleccionados describiéndolo de modo más detallado.

OBJETIVOS

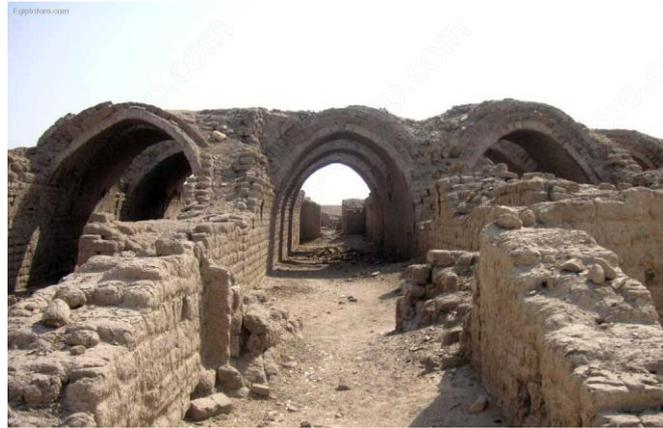
El objetivo principal es analizar el comportamiento de los sistemas estructurales existentes para grandes luces, que no se han estudiado o sobre los que se ha profundizado de manera muy escueta a lo largo de la carrera; así como disponer de una recopilación de criterios básicos pero suficientes que facilite la elección más adecuada, para el uso y los condicionantes del proyecto, en función del diseño del edificio.

3. ARCOS

a. Introducción Histórica

El arco es uno de los sistemas estructurales de mayor antigüedad que hoy en día conocemos. A día de hoy se conoce a ciencia cierta que fue empleado en Mesopotamia, alrededor del año 500 a.C, incluso algunos egiptólogos han encontrado rastros de lo que parecen los arranques de unos arcos (formando lo que parecía una bóveda de cañón) que daban cobijo a los almacenes de trigo de una ciudad del antiguo Egipto relacionada con el Faraón Ramses II.

Figura 1: Graneros del Ramesseum, templo de Ramsés II. Orilla occidental de Luxor-Sheikh Abd



En Europa la mayor influencia viene de la mano de los romanos. Durante la existencia del Imperio Romano, el arco se empleó para gran variedad de fines, como los cimientos de algunos de los monumentos más grandes de la ciudad de Roma, así como la estructura que soporta la cúpula de 43m de diámetro del Panteón. El perímetro del Panteón está formado por arcos en varias capas y niveles, que posteriormente fueron rellenados con mampostería, de modo que se rigidizó en gran medida el conjunto. Siendo los arcos los que transmitían los grandes esfuerzos de la cúpula al terreno.

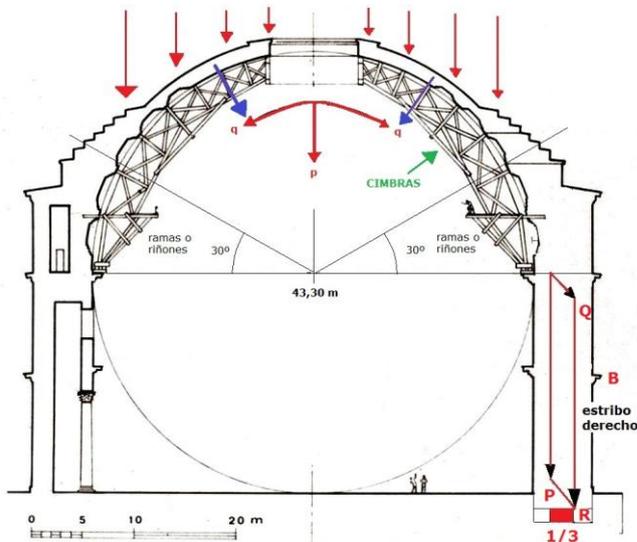


Figura 2: Sección del Panteón de Agripa

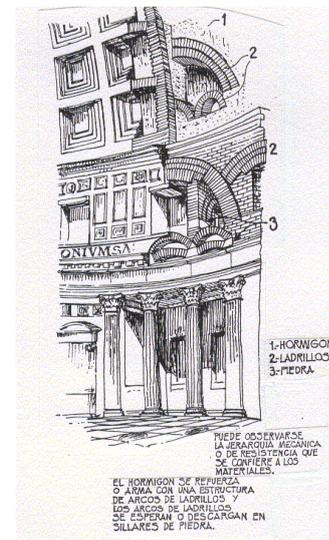


Figura 3: Dibujo sistema estructural del Panteón

Adquirieron mayor protagonismo y llegaron a formar parte de los monumentos de la ciudad, acueductos, arcos de triunfo, etc. Estructuras, que pese a no estar calculadas mediante procedimientos matemáticos, han llegado hasta nuestros días, superando el desgaste de cientos de años y otros desastres naturales.

La evolución del arco se debe en gran parte a la mejora continua que el ser humano ha adquirido mediante la intuición primero, el uso y finalmente los conocimientos científicos, matemáticos del arco, como por ejemplo su geometría y su comportamiento, dando lugar a numerosas tipologías y a diversos materiales con los que darles forma, con mayor precisión a medida que nos acercamos a nuestros días.

Arcos de forma semicircular (arco tipo romano) denominado arco de medio punto, que se ejecutaba mediante las dovelas en número impar que da lugar a la dovela central o clave, última en colocar. La clave es la que le confiere al arco la estabilidad necesaria mediante la transmisión de los esfuerzos entre las caras de las mismas, que están cortadas con un ángulo perfectamente medido. Estos arcos solían fallar aproximadamente en el centro de cada cuarto de círculo.

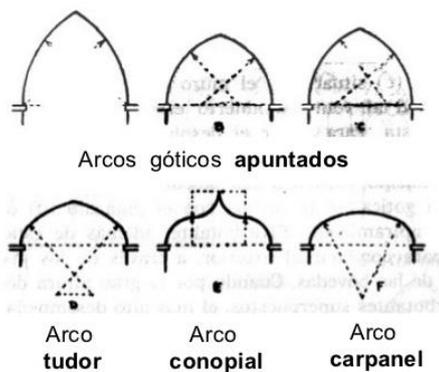
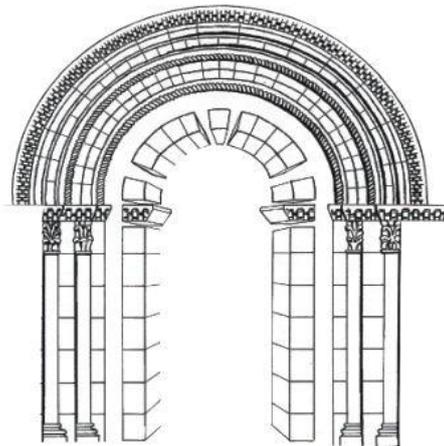


Figura 5: Ejemplo del arco romano de medio punto (derecha) en el que se pueden apreciar las dovelas, la clave central y la disposición de lo almohadón como inicio del arco en la imposta.

Figura 4: Ejemplo de los tipos de arcos góticos existentes (izquierda)



Durante el gótico se desarrolla una tipología muy común en catedrales, denominado arco apuntado, evolución de los arcos anteriores. Estos arcos se ejecutaban de forma simétrica pero deformando ligeramente el círculo en su punto medio superior, de esta forma se conseguía suavizar la curva a cada lado, lo que reducía las fuerzas y por lo tanto el fallo en estos puntos, antes mencionados.

Por último mencionar la introducción en la historia de la arquitectura de los arcos parabólicos que Antoni Gaudí utilizó en gran cantidad de sus creaciones, como por ejemplo el Colegio de Santa Teresa, el Palacio Güell y la Casa Batlló, entre otros.

Se aplican los conocimientos adquiridos mediante el uso al igual que los anteriores para una aproximación, pero en este caso concreto el uso y conocimiento adquirido sobre las matemáticas, ecuaciones cuadráticas, y sus posibles usos en la arquitectura, siendo este un claro ejemplo.

Figura 6: Casa Batlló de Antoni Gaudí ubicada en el Passeig de Gràcia de Barcelona.



Los nuevos materiales también influyeron en el diseño de los arcos, de esta manera, la geometría y forma de los arcos fue perdiendo importancia con la inclusión del acero y el hormigón en su ejecución, ya que estos materiales sí que poseían en mayor o menor medida cierta rigidez a flexión. Aumentando así la tolerancia de ejecución.

b. Análisis General

El rango de luces de un arco se ve en gran medida condicionado por el material empleado en su ejecución. Eliminando los arcos de dovelas de piedras por razones obvias, observamos un rango de luces que va desde los 30 m hasta los 70 m en caso de que estén hechos con madera. Entre 20 y 70 m para los arcos hechos de hormigón y por último el acero, material que permite alcanzar la mayor longitud de vano, de 40 a 100 m, aproximadamente.

El arco que consideramos para el análisis en el presente apartado, a fin de acotar en algunos aspectos el campo de análisis, aunque trataremos de realizarlo de la forma más global posible, lo vamos a considerar como un arco compuesto de una única pieza, o en todo caso de varias piezas unidas entre sí mediante nudos rígidos que transmitan los esfuerzos entre sí, por lo que su comportamiento sea como el de una sola pieza. También se ha de tener en cuenta que actualmente existe una amplia variedad de soluciones estructurales para los arcos, debido entre otros aspectos a las variedades de sistemas constructivos y materiales de que se dispone y el conocimiento existente de estos, como por ejemplo sería el caso de arcos biapoyados, arcos biapoyados con una rótula en el punto central, arcos formados mediante celosías de acero, bi o tridimensionalmente, entre otros.

La línea de empujes, al cortar en cada junta o plano de estribo, determina el punto de aplicación de los esfuerzos que actúan sobre todas las secciones y, por lo tanto, es condición indispensable que dicha línea y resultantes queden incluidas en el elemento resistente propiamente dicho.

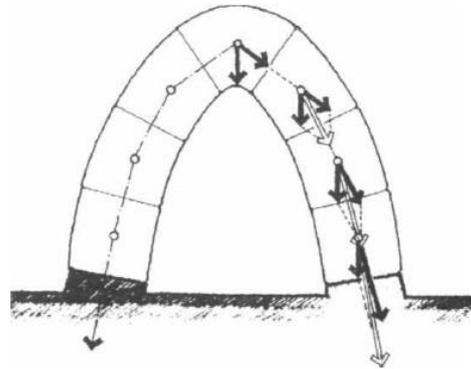


Figura 7 (derecha): Línea de empujes y descomposición de las fuerzas en el c.d.g. de cada dovela.

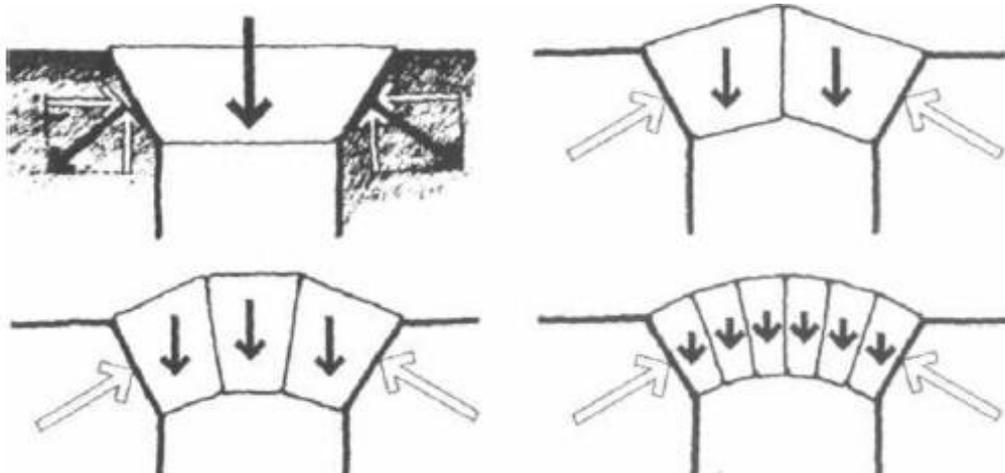
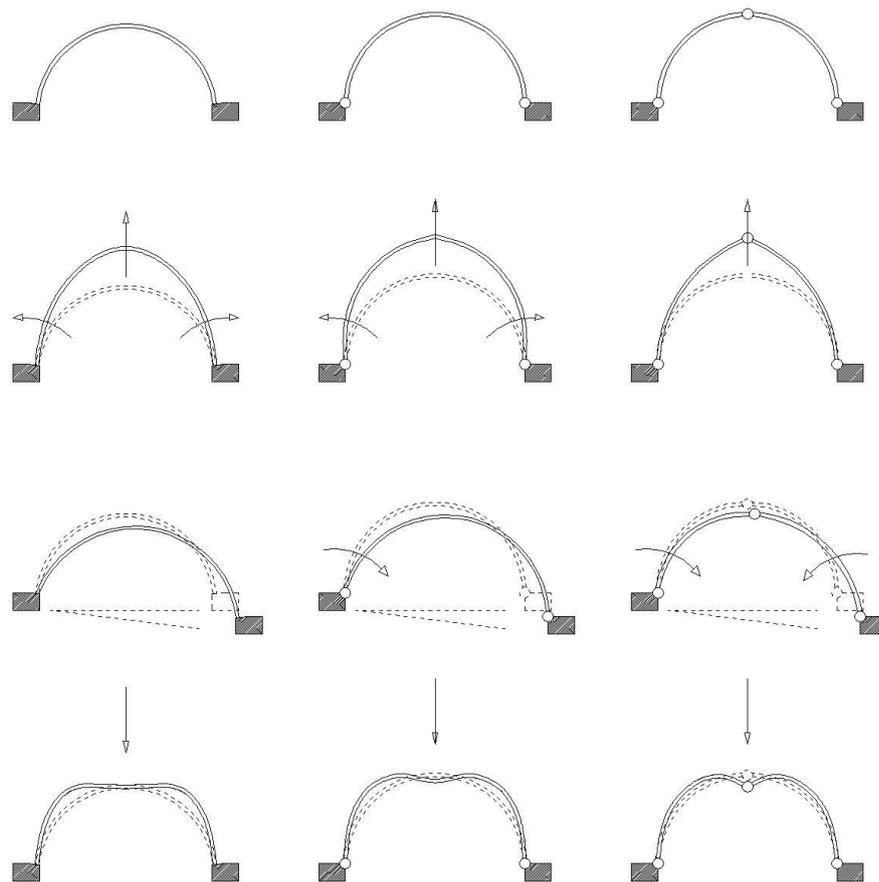


Figura 8: Esquema de las acciones (peso propio) y de las reacciones que se generan.

Para lograr la estabilidad del arco se requiere dos puntos de apoyo en los que tanto los desplazamientos como los giros estén impedidos. La fuerza vertical que sobre el arco gravite se descompondrá al llegar a los apoyos en el terreno y en este punto se dividirán en dos componentes, a saber, una vertical y otra horizontal, ésta última está íntimamente relacionada con la esbeltez del arco en su conjunto, es decir, de la relación entre la flecha máxima y la luz. Dicha fuerza horizontal genera unos esfuerzos a los que el arco no puede hacer frente, es decir, si la fuerza horizontal que se aplica en los apoyos supera la resistencia en estos hasta el punto de llegar a producir su desplazamiento, se producirá la rotura del arco, por tres puntos principalmente, que serían en la zona central del arco (si es de medio punto), es decir, cerca de la clave o dovela central y a ambos lados en la zona de arranque del arco, en la imposta. Por lo que los puntos de apoyo se deben proyectar para soportar los esfuerzos mencionados, teniendo en cuenta diferentes variables, según el tipo de unión con el arco, el punto de aplicación de los esfuerzos que el arco le transmite y los posibles esfuerzos que estos generarán en el soporte y por tanto en su base.

Atendiendo a los tipos de unión mencionamos que existen diferentes condicionantes para el diseño del arco y cada una de estas puede influir en la interacción arco-soporte.

Figura 9: Esquemas basados en los que aparecen en Abdilla y Basset

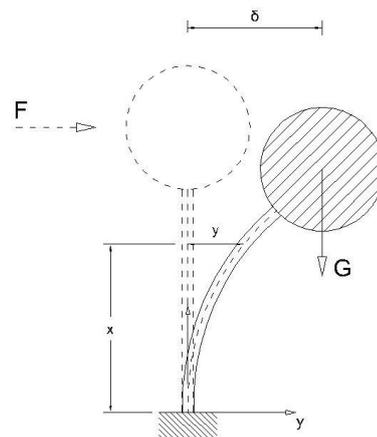


Como se puede apreciar en los esquemas la interacción del arco con los puntos de apoyo modifica sustancialmente su comportamiento frente a los diferentes esfuerzos a los que va a estar sometido a lo largo de su vida útil en el plano del pórtico. Se aprecia que el arco deformará en mayor medida en cuanto que se permitan los giros en la base (biarticulado) o en la base y en el centro del mismo, siendo este último caso el triarticulado; mientras que en el caso de estar empotrado, la deformación por flecha será menor que en las otras, pero, por el contrario el cálculo de los esfuerzos internos será de mayor dificultad al tener que contar con el momento generado.

Si el arco se dispone sobre elementos lineales dispuestos de forma vertical, hay que tener en cuenta la transmisión de efectos, es decir, en los ejemplos anteriores, el esfuerzo se transmitía del arco directamente al punto de apoyo, considerado como el suelo, en caso de que el suelo sufriera unos asientos diferenciales, el tercer caso en los ejemplos, o las fuerzas horizontales superaran la resistencia a desplazamiento o rozamiento, por ejemplo, el arco se vería afectado. Mientras que como se ha comentado los elementos lineales verticales, tienen sus propias características geométricas, como la esbeltez, que reduce la resistencia a deformación por flexión ante un esfuerzo de compresión, tanto cuanto mayor sea esta, y la resistencia a flexión al comportarse como una viga en voladizo al estar supuestamente empotrado en su base y soportar la componente horizontal de la carga que gravite sobre el arco. De esta forma se suman ambos esfuerzos, compresión axial y flexión, con lo que conviene tener en cuenta el soporte como un elemento a flexocompresión.

La Figura representa el dibujo esquemático del comportamiento del soporte bajo las cargas que le transmite el arco, el peso del arco simbolizado por la esfera, que tiene un peso G , y la componente horizontal F , que como se ha comentado también le transmite el arco. Como se aprecia en primera instancia el soporte sufrirá un acortamiento por efecto directo de las cargas gravitatorias, para poco a poco, y cada vez más, ir desplazándose lateralmente y añadiendo al momento inicial causado por la fuerza F en la base del soporte el momento que se genera al desplazar G respecto del eje del soporte, con lo que se genera un momento $G \cdot \delta$, siendo δ el valor entre el eje del soporte y el punto de aplicación de G , que irá aumentando hasta cierto punto.

Figura 10: Desplazamiento que experimenta un peso G sobre el que actúa una fuerza horizontal F , generando un momento de segundo orden al desplazar el punto de aplicación del peso G respecto del c.d.g. del soporte.



De esta forma, si las fuerzas horizontales que transmite el arco son elevadas puede ser conveniente la disposición de un tirante que las absorba e impida que el arco deforme.

El arco es un elemento que trabaja a compresión, debido a su escasa capacidad para absorber los esfuerzos de tracción, por lo que se deberá proyectar para que en ninguna sección el esfuerzo al que se vea sometido cambie las compresiones por esfuerzos de tracción que podrían llevar a la ruina al elemento estructural. Dando por cumplida esta teoría si la mencionada línea de empujes se mantiene en el interior de las diferentes secciones que podamos encontrar a lo largo de la directriz del arco. Fuera del esfuerzo de compresión el arco no es un elemento que tenga resistencia a flexión o tracción, siendo este caso en el plano transversal, pudiendo darse el caso de una estabilidad del arco completo en el plano mencionado o una deformación en el mismo plano debido a un exceso de esfuerzo de compresión que se genera con una carga excesiva sobre el arco.

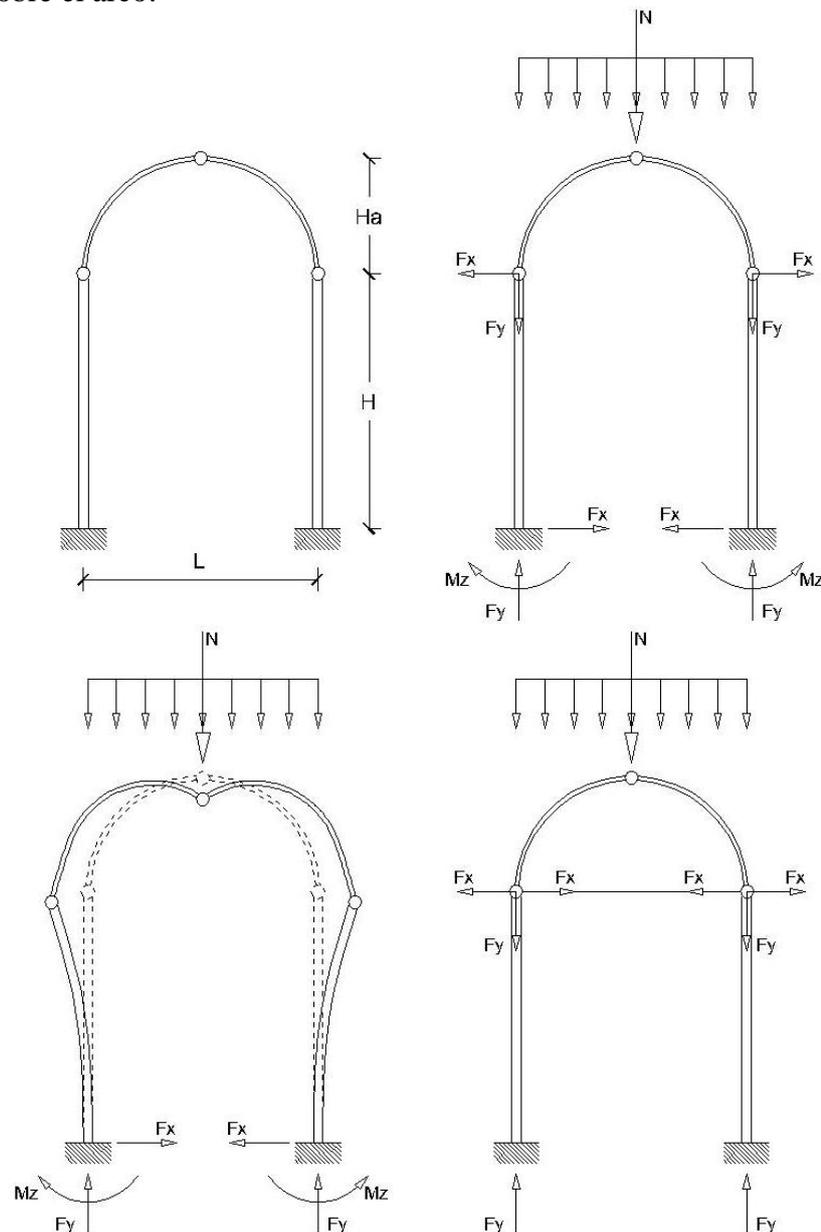


Figura 11: Esquema deformación arco sobre soportes verticales.

En la figura se observa como los esfuerzos horizontales se anulan al disponer un tirante, por lo que no se transmite momento a la base del soporte y este se considera sometido solo a esfuerzo axial de compresión, dos momentos iguales y de signo opuesto.

Para solucionar estos problemas de estabilidad habrá que recurrir, si no fuera posible evitarlo con el diseño propio, a elementos de arriostramiento o estabilización transversal. Entre los que se encuentran, por ejemplo, el caso de empotrar los puntos de apoyo, con los esfuerzos que se generarán en este caso, ya que al estar impedido el giro en su base, tanto las cargas horizontales como las verticales generarán un momento en este punto que ha de ser contrarrestado por el sistema seleccionado.

Otro sistema de arriostramiento o estabilización posible es el de arriostrar en el plano transversal al plano del pórtico, mediante diversas formas entre las que se encuentran las cruces de San Andrés, o un sistema que transmita unos esfuerzos opuestos a los que el arco ha de soportar por situaciones de proyecto, de esta forma ambos esfuerzos quedarían compensados y el esfuerzo resultante en las secciones sería de compresión triaxial.

En la figura 12 se muestra un ejemplo en el que se puede ver el arriostramiento transversal y la estabilización mediante fuerzas iguales y de sentido opuesto.

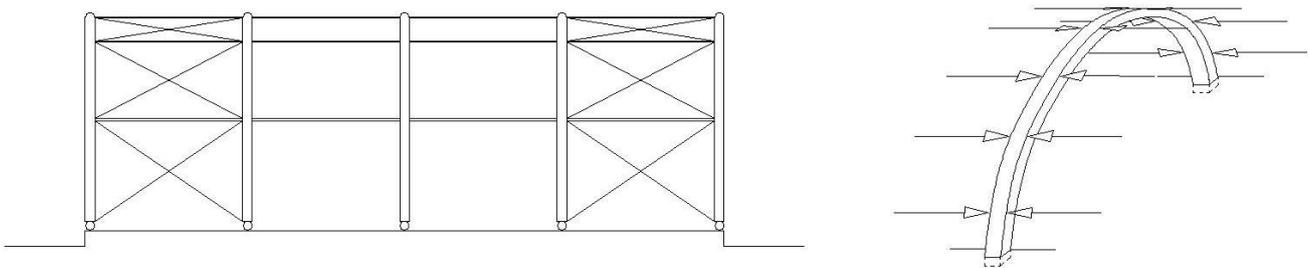


Figura 12: Ejemplo de arriostramiento y estabilización de arcos.



c. Catedral Sagrado Corazón, John McAslan + Partners, 2015, Kericho

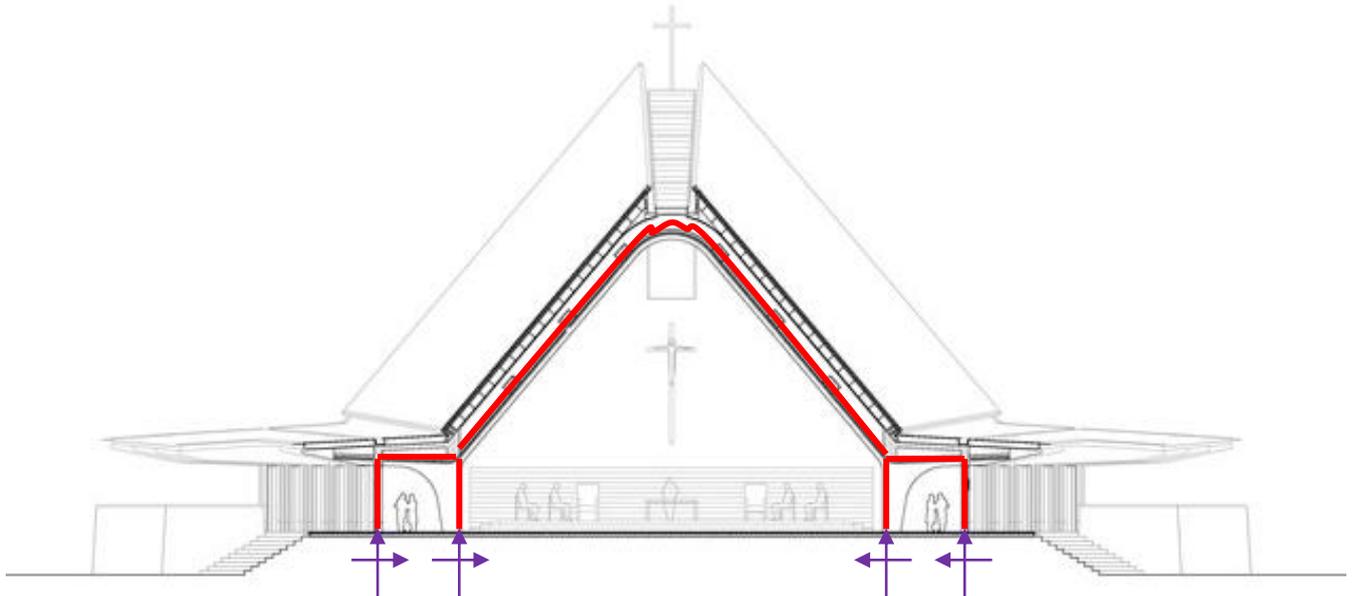
La estructura de la nave central de la catedral está formada por una serie de arcos dispuestos de forma paralela entre ellos. Sobre estos arcos de hormigón armado, se apoya la cubierta de forma similar a las cerchas, mediante correas que unen los arcos de forma transversal, dotando de estabilidad al conjunto.

Figura 13: Detalle lucernario de la catedral.



Figura 14: Interior de la catedral, sucesión de arcos paralelos.

Figura 15: Sección transversal de la catedral.



Leyenda: — Compresión — Flexión — Reacciones

Como se ha visto en el apartado de análisis, las cargas que gravitan sobre los arcos, los comprimen a lo largo de toda su directriz hasta llegar al punto de apoyo donde la fuerza de compresión se descompone en dos esfuerzos que deben resistir los soportes y la cimentación.

Figura 16: Planta baja de la catedral.

Al igual que en las catedrales góticas, en este caso se ha dotado al sistema de unos contrafuertes que ayudan a absorber el empuje horizontal e impiden que los arcos se abran en su base, dando cabida a los recorridos alternativos, aparte de la nave central, y albergando a su vez diferentes estancias a ésta adosadas.

De esta forma se consigue disminuir los esfuerzos que se transmiten a los soportes, ya que al llegar al punto de apoyo la fuerza de compresión que transmite el arco se divide en dos, el camino que puede seguir hasta disiparse en la cimentación en este caso se trata pues de un primer soporte de mayor sección que soporta la mayor carga vertical al descomponerse, mientras que la componente horizontal en este caso se transmite a lo largo de la viga (continuidad del arco que termina en voladizo, ayudando a reducir la sección de los puntos de apoyo.

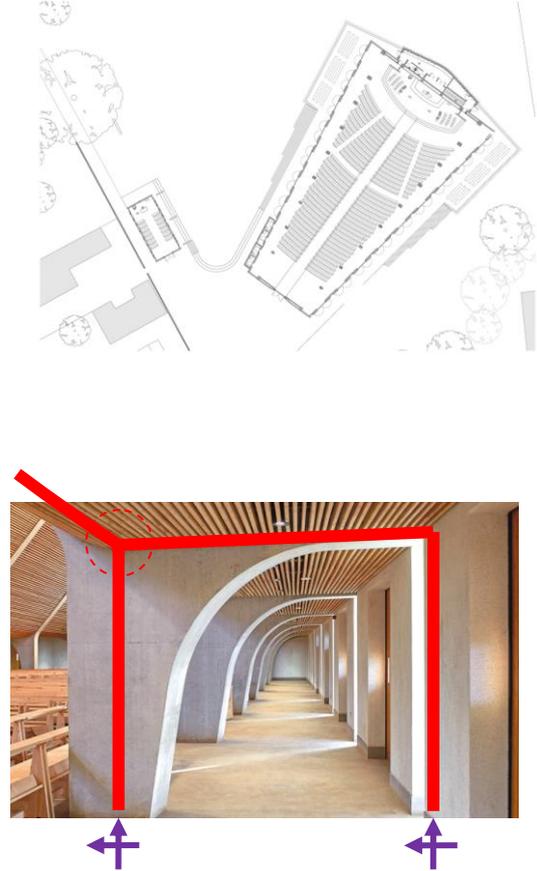


Figura 17: Pasillo lateral de la catedral.

Del mismo modo, las reacciones en la cimentación también se ven disminuidas al tener dos puntos de apoyo. Por otro lado en este caso tal y como se comenta en la correspondiente (Ver ANEXO I, ficha I), el encuentro entre los soportes y la cimentación se ha resuelto mediante una unión articulada, por lo que se trata de arcos biarticulados parabólicos con cuatro puntos de apoyo que disminuyen los esfuerzos de flexión en los soportes.

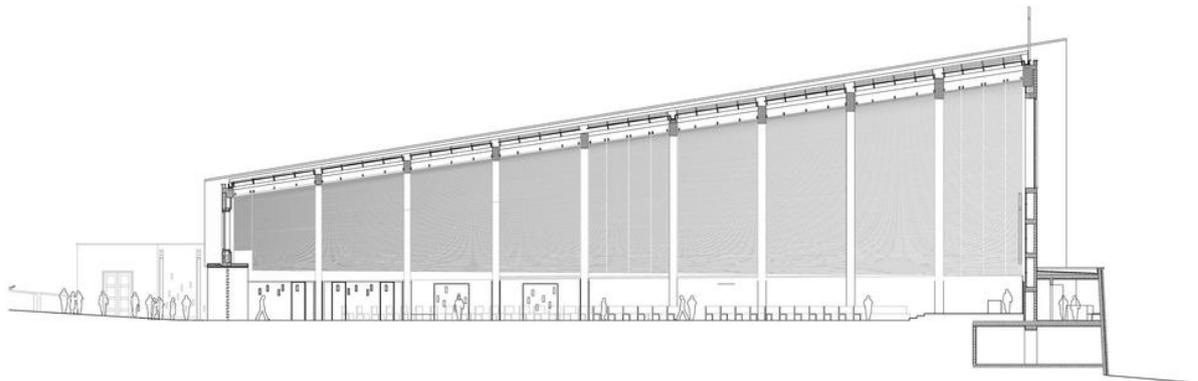


Figura 18: Sección longitudinal de la catedral.

4. CABLES, TENSOESTRUCTURAS Y ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS

a. Introducción Histórica.

Empleado extensamente a lo largo de la historia para diversos motivos, el cable permite la desviación de una fuerza, y/o su traslado a un punto que en la misma recta esté desplazado a una distancia x del primero. Se ha observado su uso mayoritariamente en las zonas asiática, africana o en la actual Sudamérica, más concretamente en sus ya extintas civilizaciones. Los muy conocidos puentes colgantes, propios de las antiguas culturas sudamericanas y orientales, que se anclaban a ambos lados de un acantilado, río, etc. mediante unas cuerdas, denominadas lianas, que sustentaban mediante otras cuerdas que de estas colgaban, unos listones de madera transversales. De modos análogos se daba solución en la antigua China y parte de África.

No solo empleado para los puentes colgantes, el imperio romano también hizo uso de este sistema para dar una cubierta a los grandes espacios diáfanos que ya en su día construyeron, como fueron el coliseo y otros anfiteatros, y construcciones. Que mediante un cable interior que era tensado por otros dispuestos de forma radial hasta el perímetro del monumento, daba la suficiente resistencia como para soportar una lona, tela o similar, en el caso del coliseo.

Actualmente el uso se ha ampliado, dado la mejora en los conocimientos de que se dispone. Como parte integrante del sistema estructural de un edificio completo, de una parte de este o de una versión más técnica de los puentes colgantes.



Figura 19: Anfiteatro Flavio.

b. Análisis General de los Cables.

Los elementos flexibles, como el cable, son capaces de soportar su peso propio y el de otros elementos para cubrir un espacio, transmitiendo las cargas a través de su directriz al punto de sujeción, es decir, estos elementos están sometidos únicamente a un esfuerzo axial, que generalmente, y en nuestro caso, los cables, es de tracción. De esta forma y debido, entre otros aspectos a su escasa sección, los cables no tienen rigidez alguna ante otro tipo de esfuerzos, no es un sistema autoportante.

El cable permite alcanzar luces extraordinariamente grandes siempre que se diseñe bien su interacción con los demás elementos estructurales, como son los puntos de apoyo, y de todo el conjunto con el suelo. Como por ejemplo el Gran Puente de Akashi kaikyo, en kobe-Awaji, Japón, en el que se alcanza una luz en su vano central de 1991 m mediante el sistema de cables (Figura 20).



Figura 20: Gran Puente de Akashi kaikyo, en kobe-Awaji, Japón.

Resulta obvio pensar que el material empleado y su conocimiento, que se ha ido perfeccionando a la par que lo ha hecho la física y las matemáticas, influyen en gran medida en la luz abarcable. El perfeccionamiento de la técnica empleada para la fabricación de los cables permite, como se verá más adelante, la elaboración de un complejo sistema de cables envueltos unos en otros, que confiere, aparte de la rigidez y capacidad portante necesaria, una cierta ductilidad absolutamente imprescindible para la correcta absorción de las fuerzas a las que se pueda ver sometido a lo largo de su vida útil, bien por causas ajenas al hombre como a las derivadas del uso efectivo para el que fue diseñado.

Los cables son elementos estructurales sin rigidez alguna a flexión, que sujetado en sus extremos adquiere una forma debida a la carga concreta a la que está siendo sometido, y variando esta forma en función del valor de la carga y de su posición a lo largo de la longitud del cable. Todos los esfuerzos que se apliquen a lo largo de su longitud serán descompuestos en dos fuerzas que se transmitirán, gracias al comportamiento de estos sistemas.

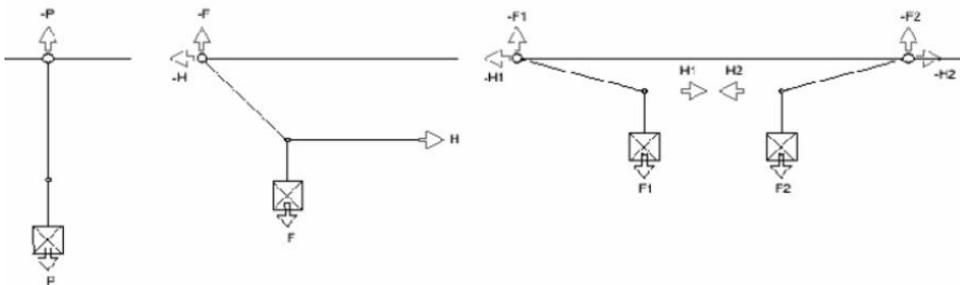


Figura 21: Reacciones que se generan al aplicar unas fuerzas en el extremo de un cable.

Como se ha mencionado, según las cargas aplicadas al cable este adoptara una forma concreta que responde a, un cable poligonal, elíptico, circular, parabólico, catenaria, entre otros y a una combinación de alguno de los anteriores. A esta forma se le denomina forma funicular.

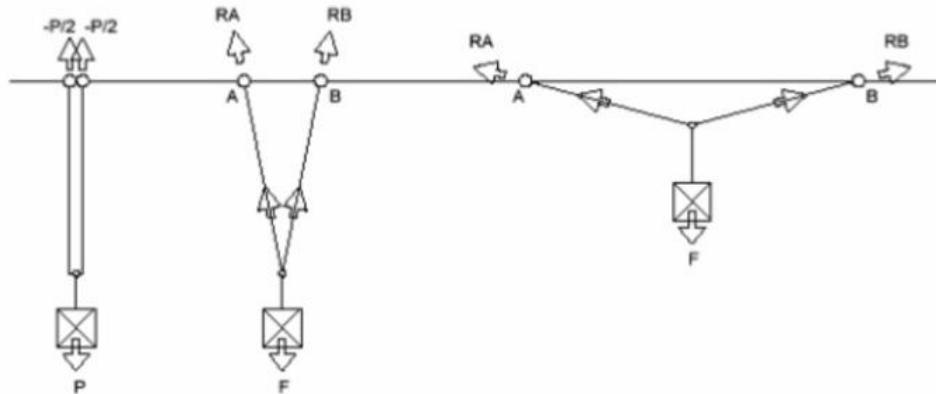
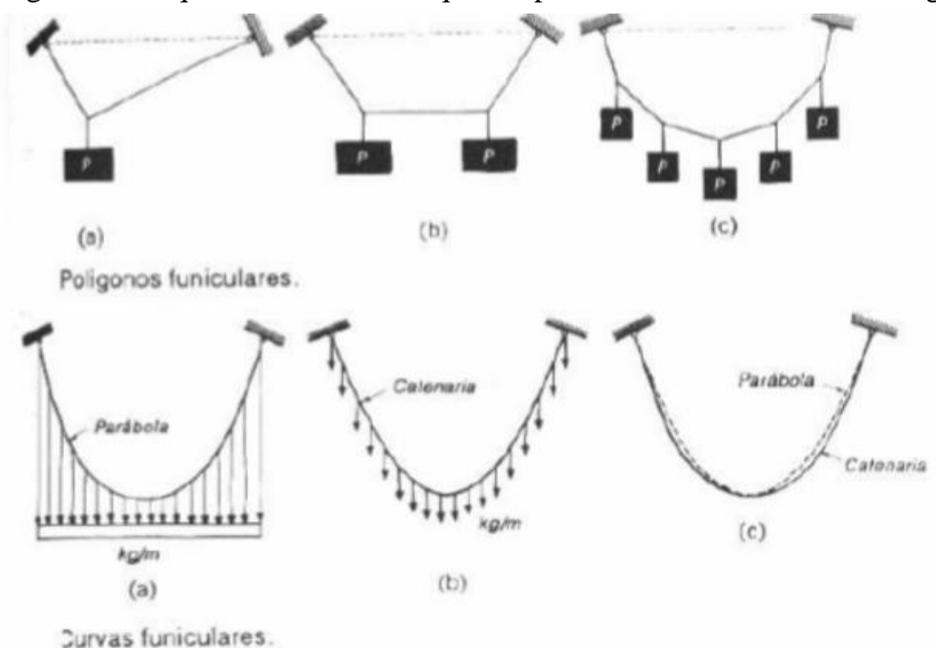


Figura 22: Reacciones que se generan al utilizar dos cables para soportar un peso.

A modo de ejemplo descriptivo, podemos asemejar su comportamiento a las leyes de esfuerzos de momentos flectores a los que estarían sometidas unas barras rígidas, de hormigón o acero (modelizadas como sólido rígido), de iguales dimensiones y condiciones de contorno en sus apoyos, es decir, biapoyadas. Si una barra, idealizada como sólido rígido, está sometida a una carga puntual en la sección central del vano, la ley de momentos flectores correspondiente sería similar a un triángulo isósceles invertido, con un momento positivo. Si en su lugar se carga esa misma barra con una carga uniformemente distribuida, como por ejemplo un forjado, la ley de momentos flectores correspondería a una parábola de segundo orden. Por tanto la forma buscada para un cable en igualdad de condiciones de contorno y geometría correspondería a esta ley obtenida en cada caso.

Dada una carga puntual aplicada en la sección central, obtenemos, como hemos mencionado en el apartado anterior, una ley de momentos flectores triangular y simétrica, con un momento máximo en el centro del vano, y por tanto la forma que el cable adoptaría si lo sustituyéramos en lugar de la viga rígida.

Figura 23: Esquemas de la forma que adopta un cable con diferentes cargas.



Para la obtención de los esfuerzos interiores que se transmitirían a lo largo del cable hasta alcanzar los puntos de apoyo dependerá del ángulo que ha formado con respecto a la horizontal. De esta forma, descomponiendo la fuerza aplicada según el ángulo que adopta, se obtendrá el axil que se transmitirá hasta el apoyo a través del cable, punto en el cuál este esfuerzo se volverá a descomponer, en este caso en una fuerza reacción horizontal que se alejará del punto de apoyo y una fuerza reacción vertical en sentido ascendente.

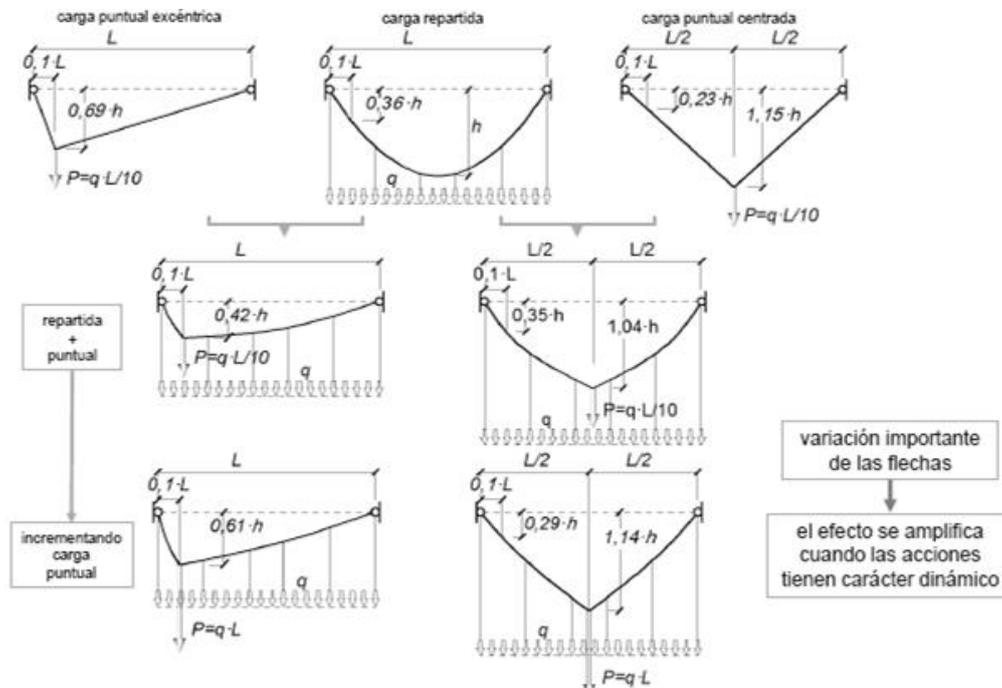


Figura 24: Esquema de la adaptación del cable a la carga aplicada.

La influencia que éste ángulo puede ejercer sobre el punto de apoyo es un dato importante a tener en cuenta, puesto que la componente horizontal que este puede llegar a transmitir será tanto mayor cuanto menor sea el ángulo que se forma con la horizontal. De esta forma el punto de apoyo puede ver comprometida su estabilidad y resistencia, caso de no estar bien proyectado o ejecutado; por ejemplo, si dispusiéramos un cable anclado en sendos soportes formados con mampostería o, algo más actual, con ladrillos, y separados una longitud L , deberíamos darle al cable una longitud L_c suficientemente grande respecto a la separación entre apoyos como para que la forma que este adopte forme un ángulo lo mayor posible, reduciendo la componente horizontal e incrementando la vertical. Mientras que si L_c es más o menos igual a L , la componente horizontal que ésta misma carga transmitirá a la cabeza de los pilares será mayor que la que estos son capaces de soportar.

Siendo muy importante el correcto diseño de los soportes, debido como se ha comentado a la importancia que adquieren los esfuerzos horizontales en este tipo de sistemas, así como la magnitud, posición y flecha; podría ponerse como variable la longitud relativa del cable en relación a la separación entre los puntos de apoyo o sujeción.

Como se ha comentado al inicio del análisis, los cables no poseen rigidez alguna en el plano ortogonal a su directriz, por lo que las fuerzas exteriores que se apliquen fuera de esta afectarán en gran medida a la estabilidad del sistema, hasta el punto de comprometer su integridad. Fuerzas muy habituales como las que genera el viento ante una superficie que se interpone en su curso natural, o en mayor medida las cargas dinámicas, como el tráfico en un puente, o más aún con cambio de signo, como son, por ejemplo, los sismos que afectan tanto a edificación como obras de ingeniería civil. El viento puede generar unas tensiones/esfuerzos para las que el cable no está proyectada, llegando, incluso a poder cambiar el signo de las fuerzas que sobre éste graviten, y por transmisión los apoyos cambiarán radicalmente los esfuerzos a los que están sometidos, siendo posible un cambio de esfuerzo a compresión a esfuerzo de tracción, lo cual según el material puede ser especialmente importante.

Remitiéndome, de nuevo al caso del Gran Puente de Akashi kaiyko, en Kobe-Awaji, Japón siendo como es una zona con riesgo sísmico elevado, y en el que los sismos ya han llevado a la ruina muchas de las estructuras, no se creía que tal puente pudiera ejecutarse, debido a las razones expuestas.

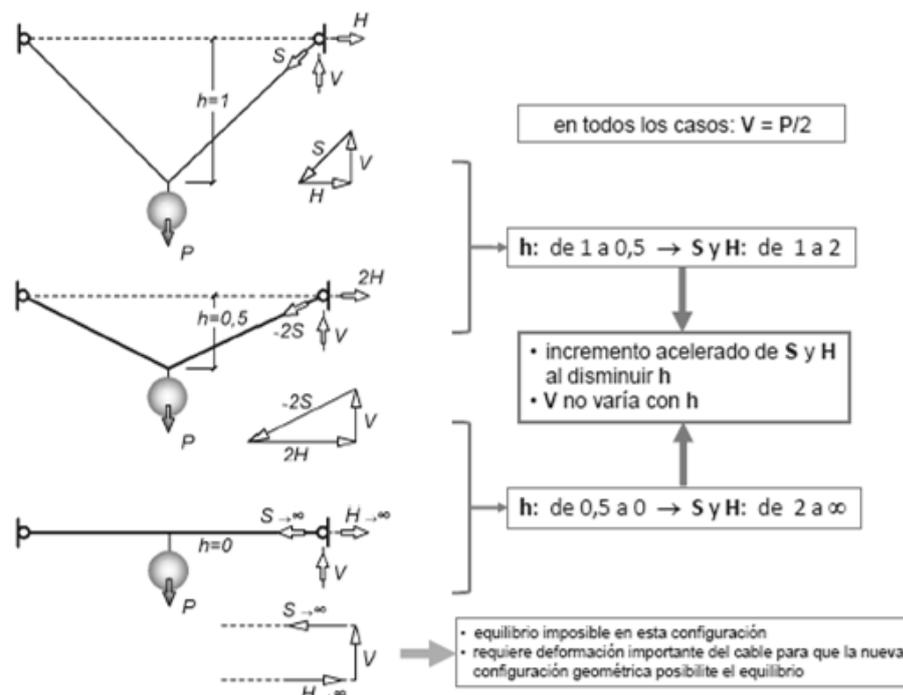


Figura 25: Esquema explicativo del aumento de la fuerza horizontal transmitida.

Como toda estructura, los cables también poseen una frecuencia de resonancia, que, una vez alcanzada, supone en la mayoría de los casos el vencimiento de su capacidad y no por haber superado su capacidad portante. Durante la fase de diseño y proyecto se deberán tener en cuenta estas posibles oscilaciones producidas por las acciones dinámicas que sobre ellos actúan y minimizarlas. Unas posibles ayudas al diseño para minimizar estos efectos son, por ejemplo en el caso del viento, aumentar las cargas que graviten sobre el cable aumentando así la resistencia a las acciones que en

este sentido efectúe. Otro sistema válido de estabilización sería, algo similar a las triangulaciones que se observan en las estructuras metálicas y celosías, es decir, anclar los cables de la estructura en varios puntos a lo largo de su longitud mediante otros cables u otros elementos de mayor rigidez, conectándolos con otros elementos más rígidos o que les aportaran la estabilidad necesaria. Como por ejemplo al terreno, véase las tiendas de los circos, las tiendas de campaña, todos tienen unos tirantes que estabilizan el conjunto resistente.

Si fuera una estructura de cubierta curva, se pueden disponer unos cables pretensados en dirección ortogonal y con la curvatura invertida, de forma que doten al sistema principal de mayor rigidez, puesto que los cables ya no estarán sometidos únicamente a unas cargas que graviten sobre ellos o que los empujen horizontalmente. Esto es similar al comportamiento de las tenso estructuras que están formadas por unos cables unidos mediante unas membranas de gran resistencia y que trabajan también a tracción, pero en la dirección ortogonal, lo que actúa a forma de triangulación, a modo de tirantes.

En cuanto a la interacción con los soportes, hay varias formas de materializarlo, pero se han de tener en cuenta una serie de aspectos que condicionarán en gran medida el diseño de los mismos, hemos visto alguno anteriormente, como son las fuerzas horizontales que estos generan y transmiten y el punto de los soportes en el que se transmitirán. Puesto normalmente generarán un momento en la base de los mismos, que será proporcional a la altura de los mismos. Este es el caso de los Soportes Verticales, ejemplo antes mencionado. Por otro lado se puede proyectar el soporte buscando la transmisión de esos esfuerzos horizontales a otro sistema complementario como podría ser una viga horizontal apoyada en sus extremos, desviando la componente horizontal hacia otro elemento de mayor rigidez, en este aspecto la variedad es grande.

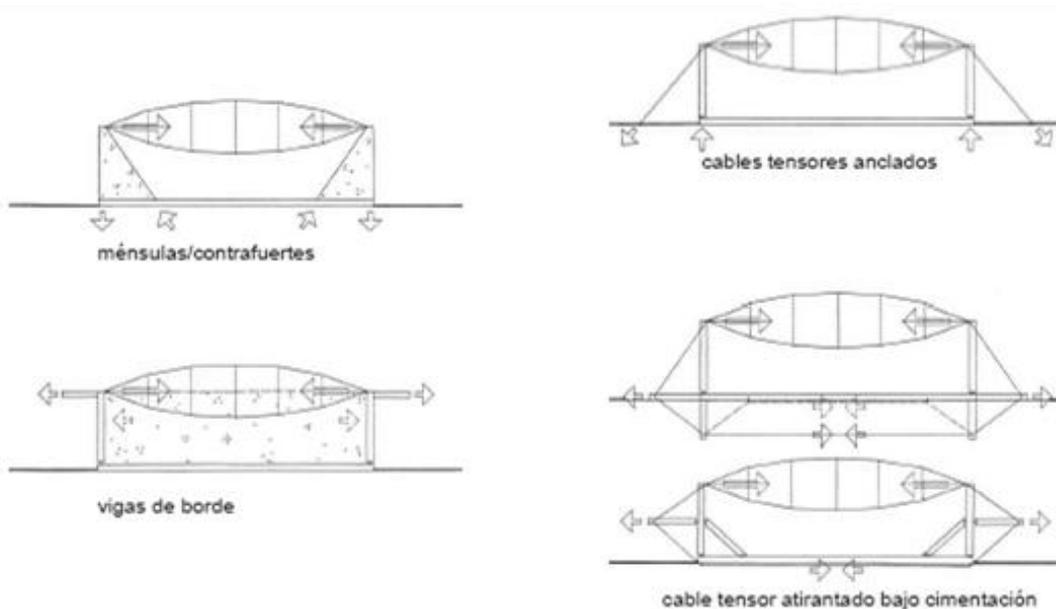


Figura 26: Sistemas de arriostramiento y estabilización del cable.

Imagen sobre los tirantes, contrafuertes y vigas de borde que contrarrestan, como se puede apreciar en los diferentes esquemas las componentes horizontales que las celosías transmiten a los puntos de apoyo. Estabilizando y anulando el momento generado en la base de los mismos.

Ambas soluciones no eliminan el problema del momento, es decir, o se contrarresta mediante el empotramiento de la cimentación en el terreno, o se transmite a elementos de gran rigidez en la dirección paralela al momento. Otra forma sería eliminar el momento en la base, obligando a que la fuerza horizontal se vuelva a descomponer, mediante un soporte en V invertida. Que finalmente transmitirá unos esfuerzos de compresión o tracción en la base de sus apoyos y otro horizontal, correspondiente al que transmite el cable. De esta forma los elementos trabajarán de nuevo solo a esfuerzo axial, reduciendo por tanto la sección necesaria para soportar las cargas iniciales. Esquemas de estabilización de los cables.

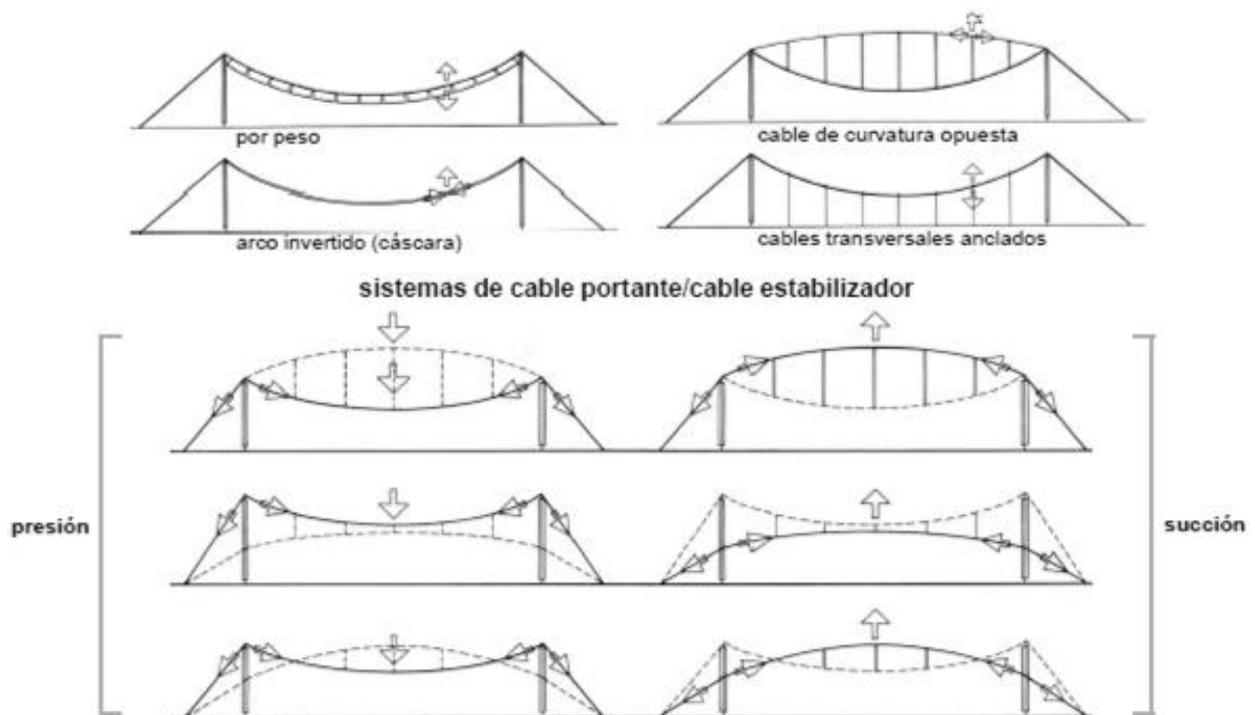


Figura 27: Esquema de las diferentes soluciones posibles para estabilizar los cables ante las fuerzas de presión y succión que puede generar el viento en las cubiertas.

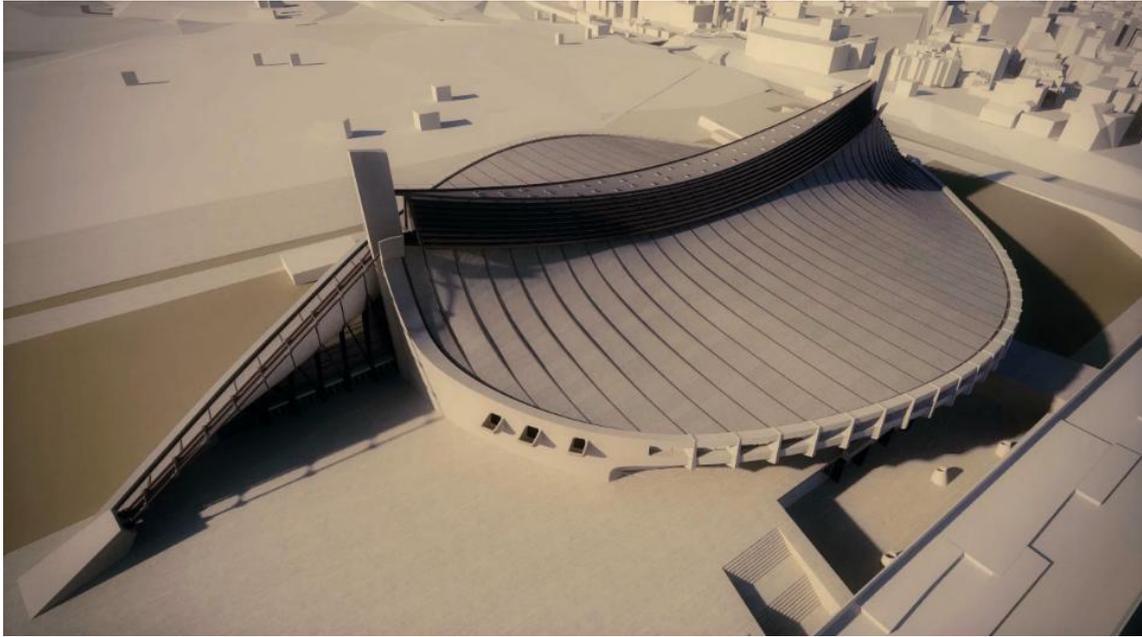
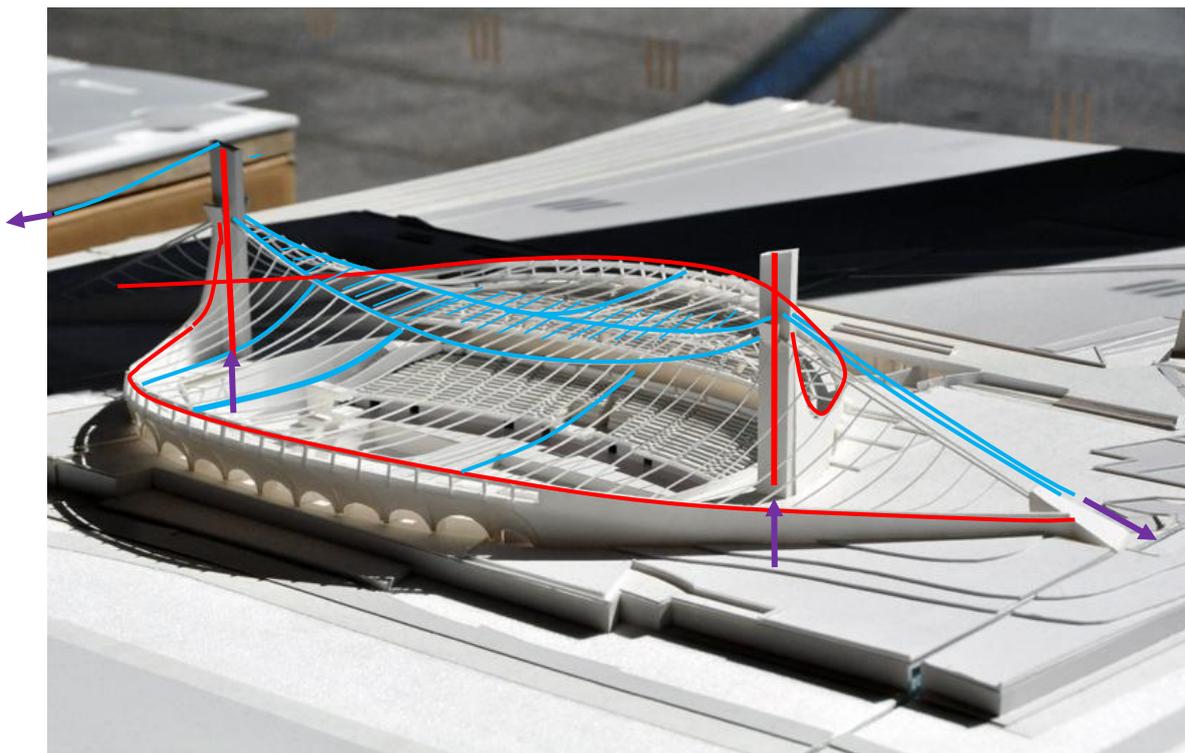


Figura 28: Maqueta del aspecto exterior del estadio principal.

c. Instalaciones deportivas para las Olimpiadas de Tokio, Japón, 1964, Kenzo Tange.

Figura 29: Maqueta de la estructura del estadio principal.



Leyenda: — Compresión — Tracción —> Reacciones

Se observan dos cables principales, a modo de espina dorsal, que unen los soportes extremos y a los que se unen a ambos lados las “costillas” de la estructura, que son otra serie de cables, y otros uniendo ambos cables principales. Esto origina unos grandes esfuerzos de tracción debido a las cargas que gravitan sobre el conjunto de la cubierta que tiran de los dos soportes hacia el interior. Estos elevados esfuerzos de tracción que solicitan a flexión los dos soportes, son contrarrestados, por otros cables que se anclan en unos macizos de hormigón, y por tanto transmiten los esfuerzos horizontales generados en el sistema directamente al terreno. Los soportes, tras esto evitan el esfuerzo muy perjudicial a flexocompresión, y transmiten los esfuerzos de compresión generados por las cargas directamente sobre el terreno

Se adjuntan unas secciones, longitudinal y transversal del conjunto Figura 30, además de un modelo tridimensional Figura 31 en el que también se puede ver la forma de trabajo de los diferentes elementos de la estructura. Y cuya leyenda es: 1. Cables principales; 2. Tirantes longitudinales que estabilizan los cables transversales a la dirección principal; 3. Cables transversales; 4. Estructura perimetral que trabaja a compresión y soporta la tensión de tracción que le transmiten los cables transversales, dirigiéndola al terreno; 5. Soportes Principales; 6. Macizo de hormigón, cimentación de los tirantes; 7. Subestructura que atiranta la estructura en la base.

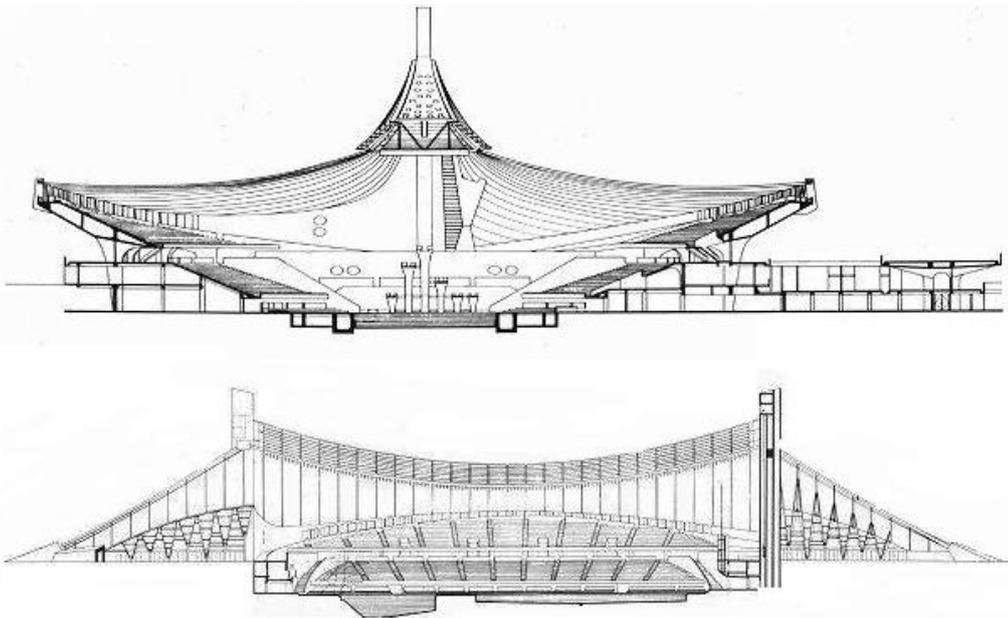
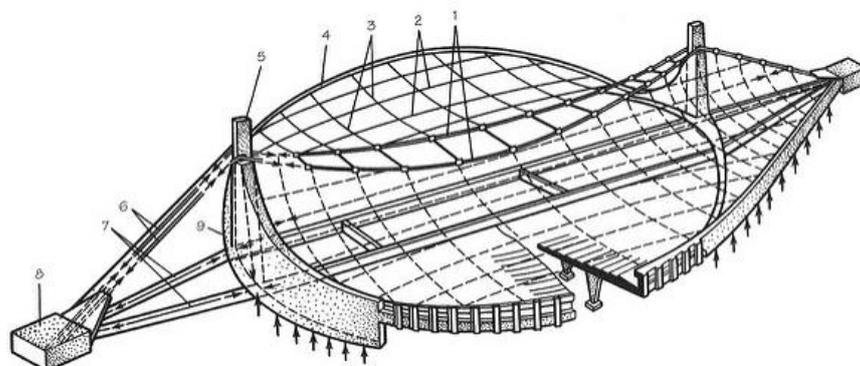


Figura 30: Secciones transversal y longitudinal del estadio.

Figura 31: Modelo tridimensional.



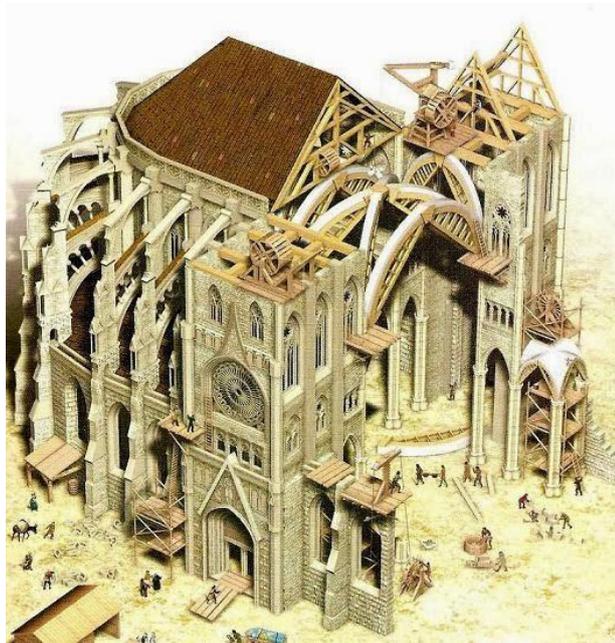
5. CELOSÍAS, MALLAS ESPACIALES, BÓVEDAS Y CÚPULAS TRIANGULADAS.

a. Introducción Histórica.

Los romanos emplearon las celosías de madera para diversos usos como por para realizar tejados triangulados, ya en el siglo I a.C. también se conoce por la columna de trajano el uso de estos entramados para la construcción de puentes, como por ejemplo el de Trajano y el de Damasco. No se han encontrado restos de este último puente pero si indicios, gracias a los grabados de la columna de trajano, que ponen de manifiesto la existencia de estas celosías.

Más adelante, durante el periodo gótico, era habitual el uso de este sistema estructural para dar cubierta a las iglesias y catedrales góticas. La cubierta estaba realizada mediante un tejado a dos aguas obtenido gracias a unas celosías triangulares que daban cobijo, en algunos casos, a una gran variedad de acabados interiores. Es el caso por ejemplo de la catedral de Salisbury (s. XIII).

Figura 32: Ejemplo del método constructivo mediante cimbra empleada habitualmente en la construcción de estructuras de grandes luces, durante la época romana, gótica, etc.



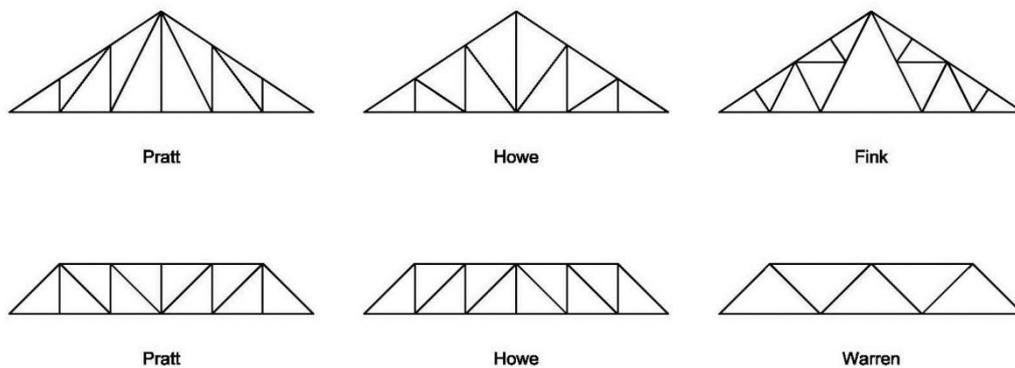
Llegan a nuestros días las páginas que Andrea Palladio dedicara a las estructuras trianguladas en “Los cuatro libros de Arquitectura” escritos ya en 1570. Por lo que se le considera como el precursor del sistema. Durante los años posteriores numerosas construcciones fueron ejecutadas gracias a las estructuras trianguladas, incluso en la elaboración de cimbras, que se empleaban para poder ejecutar sobre ellas los arcos de mampostería, para luego ser retiradas. Dato que pone de manifiesto ya de por sí la capacidad resistente que aporta el sistema.

No obstante no es hasta la aparición del hierro cuando las celosías se emplearon con mayor asiduidad, también porque los primeros ingenieros estudiaron este sistema y propusieron diferentes modelos que aún hoy en día se emplean, como son el de Howe, Lattice, Pratt y Warren, por ejemplo. Obteniendo un desarrollo teórico especialmente extenso durante el s. XIX y que se ve plasmado en grandes estructuras a lo largo de todo el mundo, valga de ejemplo la Torre Eiffel, de París, Francia. Dicha estructura data de 1889, construida para la Exposición Universal.

Figura 33: Imagen de la Torre Eiffel, y del entramado de celosías empleado en su construcción.



Figura 34: (Debajo) Ejemplos de los primeros diseños de las celosías con la aparición del acero.



Actualmente el uso de este sistema está muy extendido debido a la gran capacidad de que dispone para adaptarse al uso. Como por ejemplo el Colegio de Farmacéuticos de Valencia, proyecto de MDM Arquitectos + Ricardo Merí, actual profesor de Proyectos 5 en el Taller A.

En este edificio se ven dos prismas que se desplazan uno sobre el otro, quedando en voladizo. El prisma superior está formado por unas celosías de acero de un canto igual a la totalidad de la altura del mismo, que quedan perfectamente ocultas de la vista y permiten alcanzar un gran vuelo respecto del prisma inferior.

a. Análisis General de las Celosías.

Los materiales empleados en la ejecución de las celosías influyen en gran medida en la luz de vano que éstas pueden alcanzar, así como la precisión en la ejecución de sus nudos. Un sistema versátil que permite con elementos de relativa esbeltez alcanzar grandes luces, tanto mayores cuanto mayor sea el canto con el que se diseña.

El uso de las celosías suele ser frecuente cuando se dan luces mayores de 10 m, por ejemplo, y hasta 60 m en condiciones geométricas normales.

Para un correcto análisis del comportamiento de las celosías planas, y dado que las estamos analizando desde el punto de vista de que están sometidas únicamente a esfuerzo axial, ya sea de tracción como de compresión, se han de considerar unas hipótesis empleadas para el cálculo de las mismas. Estas hipótesis surgen para considerar la celosía como ideal y, como todo sistema estructural, indeformable.

Las celosías están formadas principalmente por dos cordones, uno superior, a compresión y otro inferior (a tracción), suponiendo para el análisis un modelo de una celosía biapoyada en sus extremos. Además de unas barras entre estas dispuestas de modo que queda perfectamente triangulado el conjunto, estas barras pueden colocarse de diversas formas, favoreciendo el trabajo a tracción o compresión en función de esta disposición. Todas ellas de directriz recta y sección constante, haciendo coincidir siempre los ejes longitudinales entre ellos y en el centro del nudo al que acometen. El resultado de plantear la celosía como biapoyada en sus extremos (isostática) es que la resultante de las cargas que sobre esta gravitan se reparte al cincuenta por cien en sus dos apoyos y que el momento máximo que generan se da en la sección central del vano considerado.

Caso A (Figura 35); Nudos considerados como articulados aunque su ejecución sea como nudo rígido, se considera que la articulación está en las barras. De esta suposición se considera que el axil N es distinto de 0, mientras que $M = 0$. Por lo que la deformada sería la de la imagen.

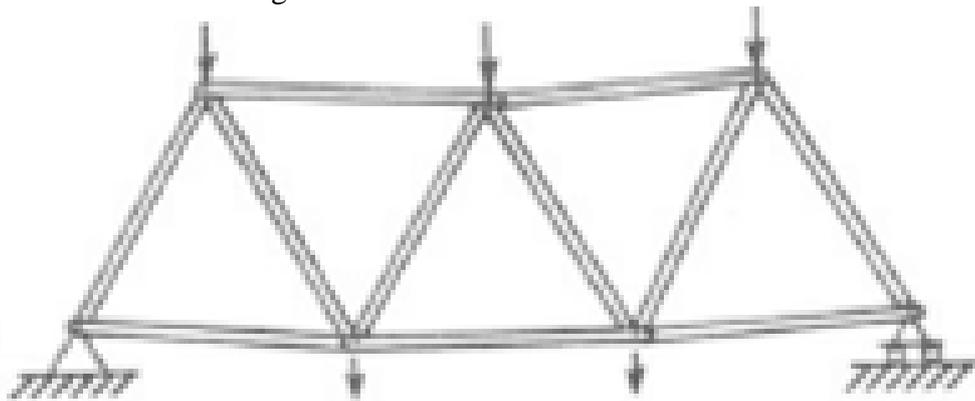


Figura 35: Deformación celosía con nudos articulados.

Caso B (Figura 36); Nudos proyectados y ejecutados como rígidos. La deformada corresponde a la imagen inferior, donde ni el axil N ni el momento M son iguales a 0.

Este caso no se va a estudiar en el presente trabajo.

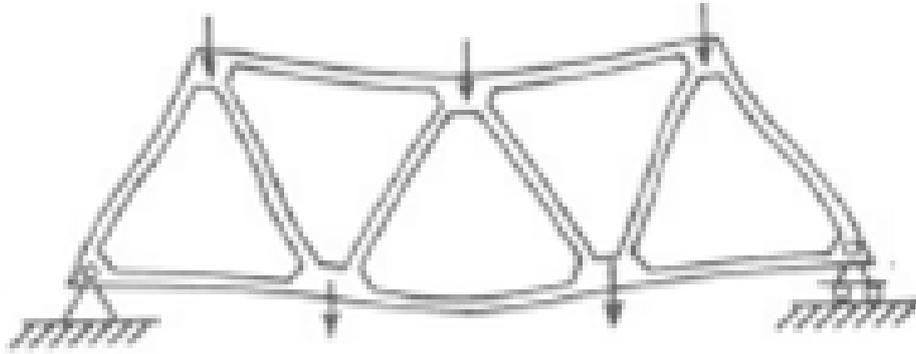


Figura 36: Deformación de la celosía con nudos rígidos.

En el caso de las barras sometidas a esfuerzos de tracción, se debe comprobar que poseen la suficiente área para soportar dicho axil en condiciones de seguridad. Mientras que las barras solicitadas a compresión, como por ejemplo en nuestro caso el cordón superior, se puede dar el caso del pandeo en las barras, debido a la esbeltez que las caracteriza, tanto en el plano del pórtico que forma, siendo este un desplazamiento vertical entre los elementos verticales, como son los apoyos y los montantes que se encuentran entre cordones, como pandeo en el plano transversal al pórtico. Pandeo en el plano horizontal que dependerá de la longitud de arriostramiento en ese mismo plano.

En el plano del pórtico, la longitud de pandeo se verá reducida al disminuir la distancia entre estos elementos verticales. Mientras que la longitud de arriostramiento transversal en el plano horizontal, tal y como hemos planteado la cercha, se considera la distancia existente entre los puntos de apoyo, y, por lo tanto, la longitud de pandeo del modelo se la longitud total del vano. Para mejorar la estabilidad frente al pandeo transversal de la cercha se recurre a la triangulación en el mismo plano entre correas, consecutivas o no, en función de las características de proyecto.

Existen diversos métodos de cálculo de las celosías, que se consideran como elementos indeformables, siendo el cálculo simplificado el más empleado, y en el que para realizar los cálculos se aplican antes una serie de criterios que los simplifican. Entre los que se encuentran:

- Los ejes que pasan por el centro de gravedad de los distintos elementos que conforman la celosía, al encontrarse en un nudo, se dispondrán de forma que concurran en un mismo punto. Evitando de esta forma los esfuerzos que se generarían, y que supondrían unos cálculos adicionales más complejos.

Figura 37: Nudo articulado en una viga continua.

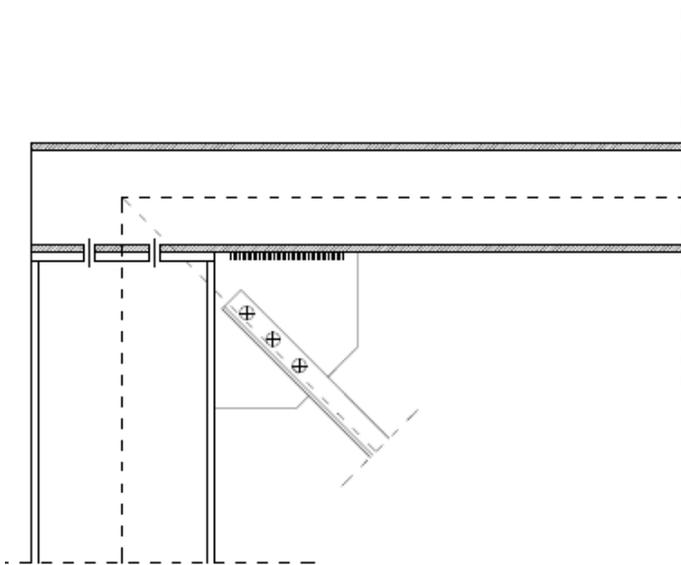
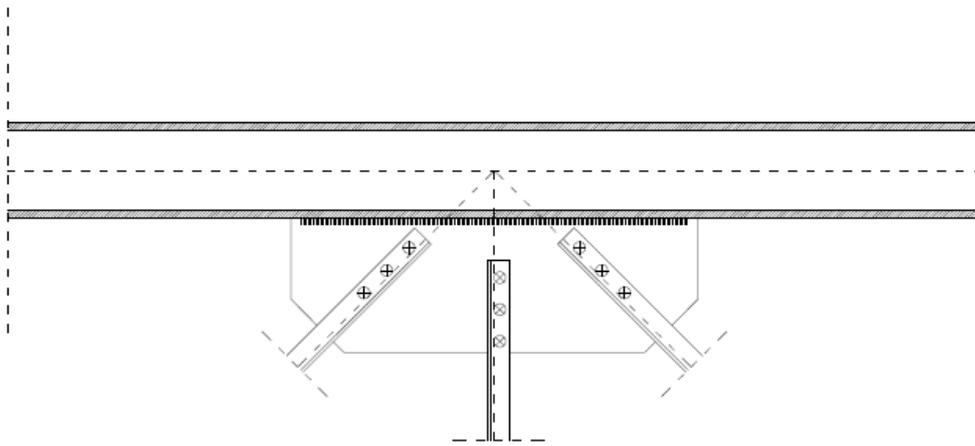


Figura 38: Unión viga-soporte articulada, del cordón superior de una celosía. Ejecutada mediante tornillos dispuestos en los 2/3 centrales del alma del soporte.

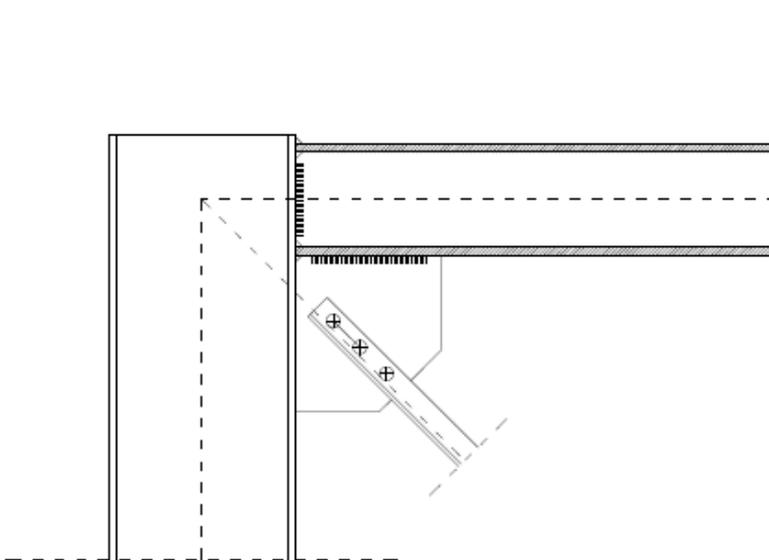


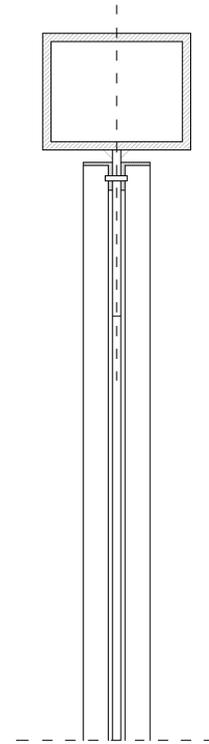
Figura 39: Unión celosía-soporte rígida, la soldadura incluye toda el alma del cordón superior, así como las alas del perfil.

Cartela de acero soldada al cordón superior y diagonal de la celosía atornillada a la cartela.

- El diseño debe asegurar que las cargas aplicadas sobre la estructura se transmitan en el eje del plano de la celosía.

- Este eje define también un plano de simetría respecto de sus elementos, es decir, tanto los montantes como las diagonales deben disponerse pareados para que el eje de cada par coincida con el de la celosía o, en su caso un perfil dispuesto de forma que su eje de simetría coincida con el de la celosía en caso de no requerirse, por condiciones de carga, el uso de perfiles de mayor capacidad portante.

Figura 40: Sección transversal del cordón superior de una celosía, eje de simetría común a todos los elementos.



- Se considerará que las cargas aplicadas en cualquier punto de los elementos se transmiten directamente sobre los nudos, tal y como se ha comentado anteriormente, siempre que no sea posible aplicar las cargas directamente sobre estos. Esto quiere decir que en cada caso se obtendrán las reacciones que corresponda a cada extremo del elemento según la carga aplicada y su posición relativa. Puesto que los elementos no disponen de resistencia a flexión, debido a la esbeltez geométrica que las caracteriza.

- Como hipótesis también tendremos en cuenta que todos los nudos (incluidos como hemos mencionado los dos extremos) se considerarán como articulaciones, que permitan el giro relativo entre barras. Los nudos se ejecutan como nudos rígidos ya sea mediante soldadura en taller o en obra, si las condiciones de proyecto lo permiten, o por tornillos, pretensados o no, y considerando la articulación gracias a la deformación que son capaces de asimilar las barras que se concentran en los diferentes nudos.

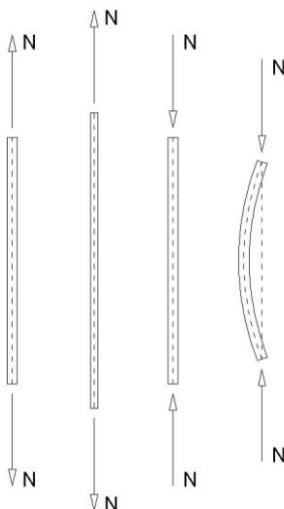


Figura 41: Esquema pandeo.

Las cargas aplicadas pueden generar unos momentos en los diferentes elementos, que generaran momentos secundarios en ellos. Estos momentos se verán compensados en caso de que la barra se encuentre a un esfuerzo principal de tracción, ya que no se verá afectada por el pandeo de la misma. En cambio, en caso de que la barra se encuentre a un esfuerzo axial de compresión, el efecto de pandeo, agravado por las fuerzas

ortogonales a la directriz del elemento, generará unos esfuerzos de segundo orden, que pueden comprometer su estabilidad, debido, a la comentada esbeltez geométrica, al sumarlos a los esfuerzos principales.

A esto se añade, por último, la aceptación de la Teoría de Pequeños Desplazamientos aplicada al sistema.

La interacción con los soportes dependerá de varios factores y la modelización de este encuentro jugará un papel esencial, ejemplo en las imágenes. Entre estos factores se encuentran, la mencionada modelización de la unión, el arriostramiento del soporte y el arriostramiento de la estructura global, de la longitud de vano, de la longitud del elemento vertical, de las condiciones del terreno y de la modelización de la unión del soporte con el terreno, etc.

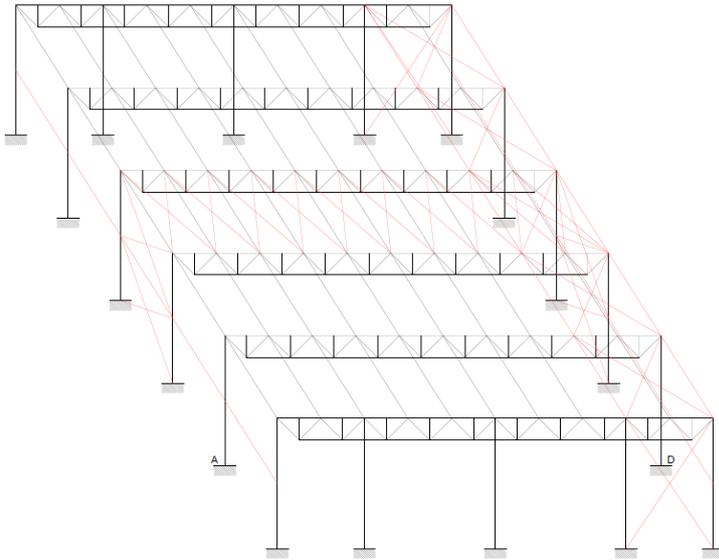


Figura 42: Modelo tridimensional de un sistema porticado arriostrado en el plano del pórtico y en el plano transversal.

A modo de breve introducción al fenómeno de la estabilidad frente a esfuerzos laterales, explicaremos brevemente la inestabilidad y emplearemos como ejemplo un soporte, que se encuentra empotrado en su base y libre en coronación, sobre el que gravita una carga en su c.d.g. con lo que el soporte se comprimirá y sufrirá una deformación de valor negativo. Si a este le aplicamos una fuerza lateral, la carga inicial se desplazará junto con el final del soporte en la dirección de la fuerza, generándose un momento en la base del soporte que trata de contrarrestar la fuerza horizontal aplicada. A este momento (de primer orden) se le sumará entonces un momento de segundo orden que se corresponderá a la carga inicial vertical por la distancia desde ésta al c.d.g. en la base del soporte, lo que hará a su vez que siga aumentando el desplazamiento lateral (Figura 10).

Como se ha mencionado, la estabilidad influye en gran medida en el diseño de la celosía, tanto en el plano del pórtico como en el transversal, pero esta estabilidad también afecta del mismo modo, plano del pórtico y transversal, en los elementos verticales y en su comportamiento ante las cargas que les transmite la celosía. Una estructura sin arriostrar, significa que los soportes trabajarán como vigas en voladizo dispuestas en vertical, que soportaran todas las cargas horizontales, mientras que si se arriostra en ambas direcciones principales, la estabilidad y por tanto el comportamiento de la estructura en general se modificarán, así como las leyes de esfuerzos de los soportes. A unos esfuerzos transmitidos dados, las leyes de esfuerzos de los soportes se verán radicalmente diferentes si arriostramos la estructura, empotrado en la base-apoyado en coronación o empotrado en la base-libre, así como la mencionada unión celosía-soporte, de ser una articulación a ser un empotramiento, y la transmisión de momentos que esto supone.



Figura 43: Pandeo de la celosía en el plano del pórtico.

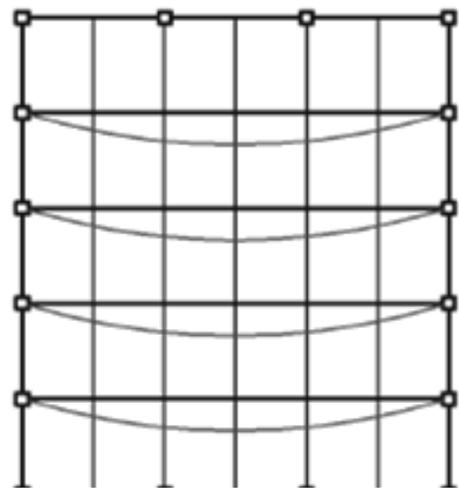


Figura 44: Pandeo de la celosía en el plano transversal sin arriostramiento, longitud de pandeo = luz de vano.

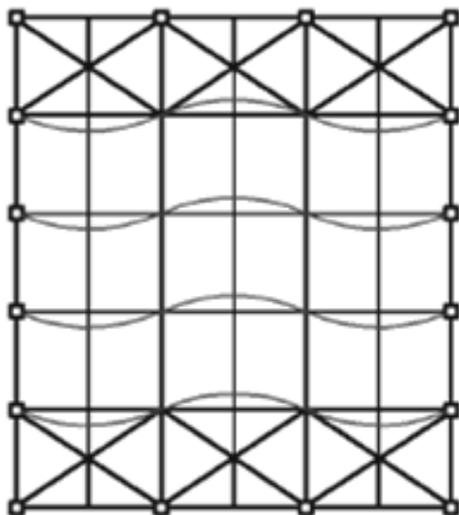


Figura 45: Pandeo de la celosía en el plano transversal con arriostramiento mediante perfiles conformados en frío, correas (Figura 46).

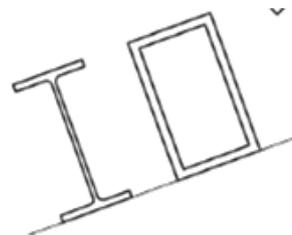


Figura 46: Posibles de acero conformado en frío.

Este arriostramiento influye en la denominada longitud de pandeo, si arriostramos reducimos dicha longitud, es decir reducimos la longitud del elemento que es susceptible de deformarse en dirección ortogonal a su directriz. Esta longitud se ve influenciada por las condiciones antes mencionadas entre otras, y es la longitud de una barra virtual con las mismas características geométricas y condiciones de carga, pero que se haya articulada en sus dos extremos. Del mismo modo, el arriostramiento lateral ayuda a transmitir las cargas horizontales a través de otros elementos, es decir, consideramos que el soporte que en un primer momento estaba sometido a un momento, ya fuera empotrado-apoyado o empotrado-libre, debido a la transmisión de los esfuerzos verticales y horizontales directamente de la celosía, ahora se considera que el esfuerzo horizontal se transmite a los elementos que arriostran, mediante, por ejemplo, las cruces de San Andrés, y de estos se transmiten al suelo.

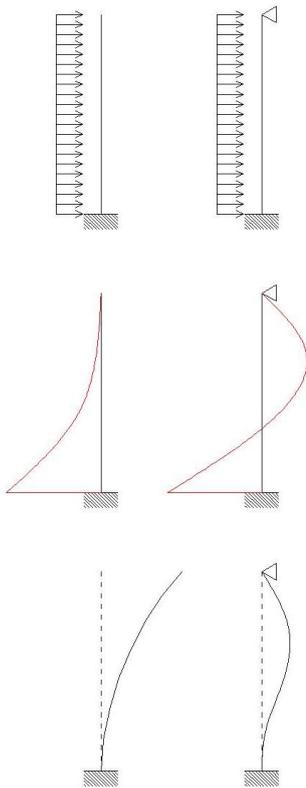


Figura 47: Diagramas de deformación de un soporte empotrado-libre y empotrado-apoyado.

De esta forma volvemos a tener una descomposición del esfuerzo horizontal, que se transmitirá como un esfuerzo axial a través de estos nuevos elementos. Como se ve en la imagen, se dispone una viga horizontal, mediante las cruces de San Andrés (Figura 48), que al llegar a los pórticos de cabecera continúan en vertical transmitiendo las cargas como se ha mencionado.

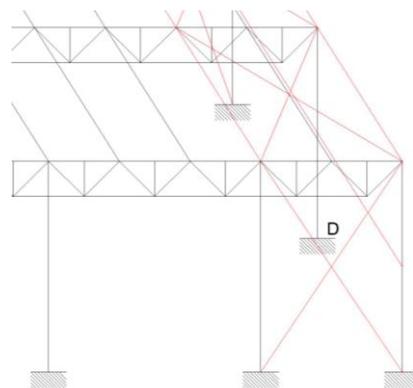


Figura 48: Arriostramiento tipo cruz de San Andrés.



Figura 49: Vista de la estructura desde el interior durante la construcción.

b. Aplicación del análisis al Colegio de Farmacéuticos de Valencia, proyecto de MDM Arquitectos + Ricardo Merí.

Vista exterior de las celosías que conforman la estructura, cuatro grandes celosías marcan la dirección principal de los forjados, y la transmisión de las cargas.

- Dirección de las vigas principales.
- Volumen a nivel de rasante.
- - - Longitud de solapo de ambos volúmenes.
- Longitud del voladizo.

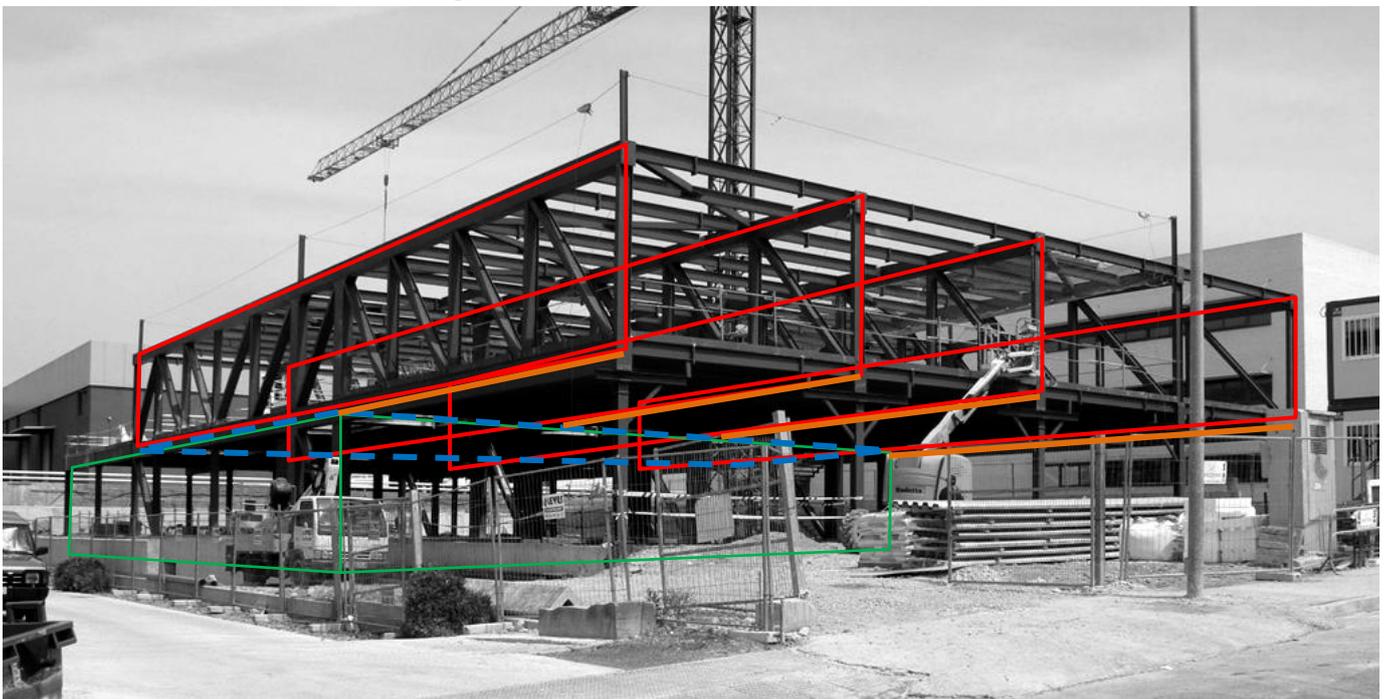


Figura 50: Perspectiva exterior de la estructura ejecutada.



(Figura 50)

Leyenda: — Compresión — Tracción — Reacciones — Cargas — Terreno

En la imagen superior se pueden apreciar a simple vista los esfuerzos que solicitan los diferentes elementos que conforman la estructura de celosía. Se considera una carga uniformemente repartida a lo largo de toda la superficie que corresponde al volumen superior y que se correspondería con el peso propio del volumen superior, Según uso, materiales, peso propio de la estructura, etc. Además del uso que se haya previsto para la cubierta.

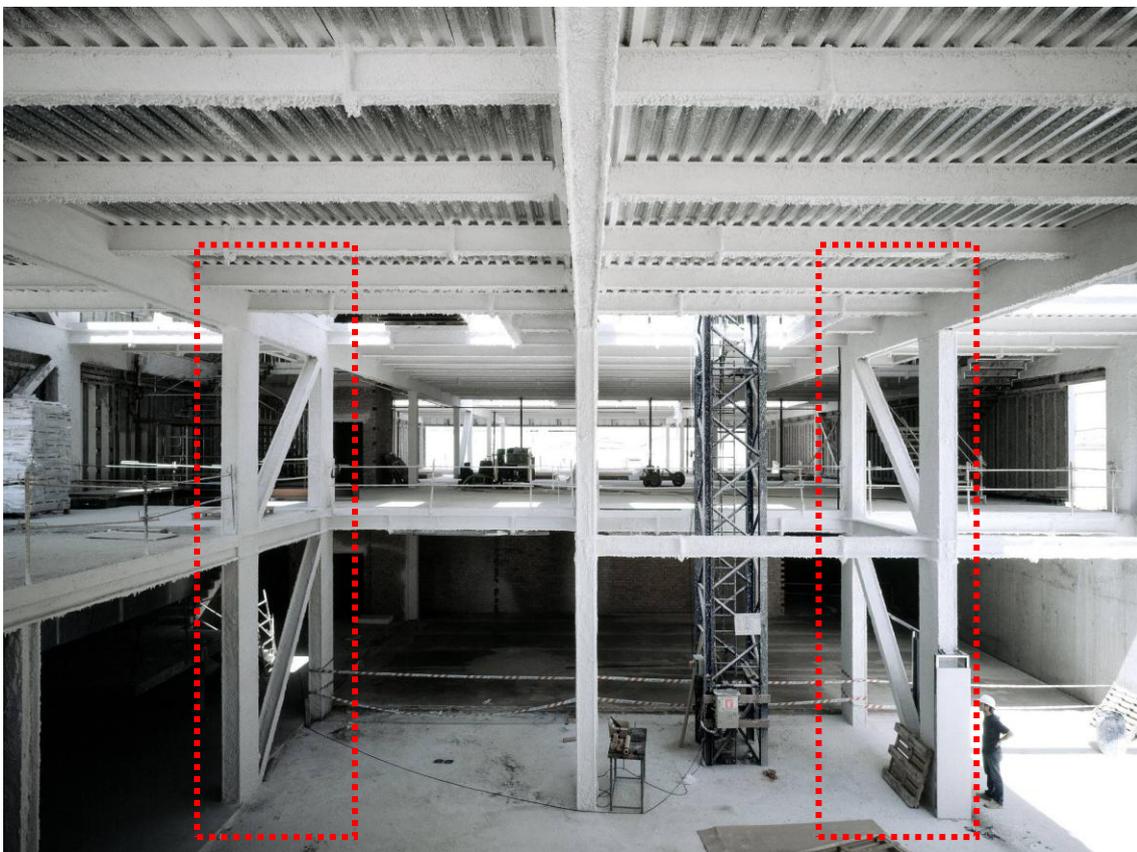
Se trata de dos volúmenes, como se puede apreciar, que están desplazados uno respecto al otro generando un voladizo de grandes dimensiones. Partiendo de esto ya se puede apreciar que el cordón superior de la celosía estará traccionado mientras que el inferior se comprimirá, en el tramo correspondiente al voladizo, también se puede apreciar un cambio de signo en los esfuerzos a los que se someten los cordones una vez pasado el primer punto de apoyo, lo que de modo general se traducirá en unos esfuerzos de compresión en los apoyos. Obviamente lo que aquí se comenta puede variar en algunos puntos si se efectuara un cálculo detallado de esta estructura en particular.

En cuanto a los elementos intermedios de la celosía, diagonales y montantes, se ha realizado una hipótesis de su forma de trabajo, tracción o compresión, según los análisis realizados. Los montantes estarán sometidos a compresión transmitiendo las cargas verticales que gravitan sobre las cerchas directamente al cordón inferior, mientras que desde el extremo del voladizo, las diagonales se ven sometidas a un esfuerzo de tracción.



Figura 51: Imagen del interior una vez finalizada la estructura, que da una idea de la altura que alcanza la celosía sin ser necesario a su vez el uso de perfiles metálicos de gran área.

Figura 52: Vista de uno de los puntos de apoyo para transmitir las cargas de la celosía hasta la cimentación.



6. ESTRUCTURAS LAMINARES

a. Introducción Histórica.

El último de los sistemas estructurales que vamos a tratar en el presente trabajo es el de las cúpulas, que han visto una gran evolución a lo largo de su aún mayor historia. Una de las construcciones más conocidas y de mayor impacto es el de la cúpula del Panteón en Roma. Esta cúpula hecha con materiales y herramientas propios de la época es capaz de albergar en su interior una esfera de 43 m de diámetro. Gracias a la habilidad de los constructores del momento, que emplearon rocas de tamaños y pesos específicos muy variados, a lo largo de la sección estructural de la construcción, y más concretamente de la cúpula.



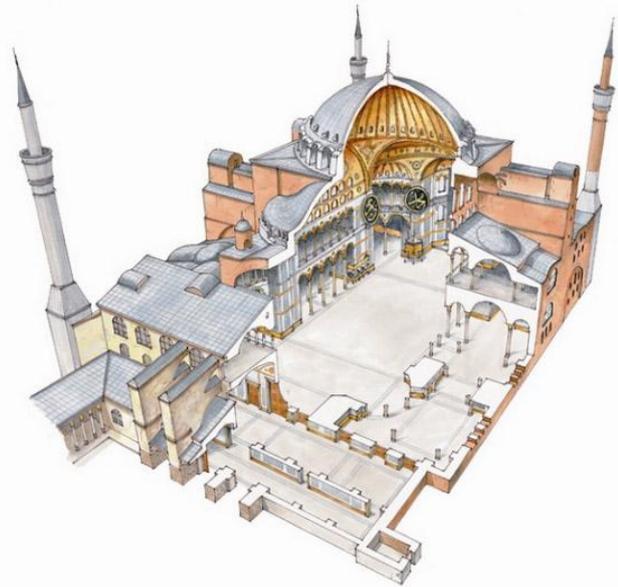
Figura 53: Panteón de Agripa, Roma, 125 d.C.

Dicho esto, queda de manifiesto que también los romanos hicieron extenso uso de las cúpulas, y profundizaron en su ejecución. Llegando a realizar cúpulas como cubiertas de las termas y palacios, lo que supone un conocimiento de las mismas lo suficientemente extenso como para evitar los más que posibles problemas que pueden sufrir.

De este conocimiento sobre las estructuras en general que poseían los romanos, se aprovecha también el imperio Bizantino, que logra alcanzar la cúpula semiesférica dando cubierta a un espacio cúbico, introduciendo el elemento estructural conocido

como las Pechinas. Este elemento es una transición entre estas dos geometrías gestálticas como son el cubo y la esfera. De forma triangular se adapta entre ambos volúmenes en las esquinas del cubo. **Figura 54: Axonométrico Iglesia de Santa Sofía.**

Como se ha comentado las cúpulas, al igual que todo sistema estructural puede sufrir una importante variedad de patologías, y alguna de estas se puede observar en el ejemplo más conocido que el imperio Bizantino nos ha dejado en herencia, la Iglesia de Santa Sofía en Constantinopla, Estambul. Esta cúpula de 31,87 m de diámetro en su base y 56,60 m de altura sufrió diversos siniestros que obligaron a ir adaptando y complementando el sistema estructural, con unos contrafuertes que absorbieran los grandes esfuerzos que generaba.



La evolución de las cúpulas pasa por diferentes épocas, de las cuales las que más afectan a la zona Europea actual son la Edad Media y el Renacimiento, durante el cual se produjo una rápida difusión del sistema, momento de gran esplendor de la cúpula puesto que en muchos lugares se ejecutan cúpulas en catedrales, y otros edificios que pretenden ser cada vez más altos, en Florencia, en la Ciudad del Vaticano, En Madrid, etc. En la zona norte de Europa, también se desarrollaron las cúpulas, durante el periodo Barroco y Neoclásico, donde tuvieron mayor presencia e impacto.

Por último, el máximo esplendor podríamos decir que se alcanzó en el s.XX durante el cual el progreso tecnológico y el desarrollo de nuevos materiales y procesos constructivos, permitió ampliar las luces que se alcanzaban mediante este sistema. Por ejemplo alcanzándose espesores mínimos de unos pocos centímetros gracias al novedoso hormigón armado, con el que se experimentó ampliamente durante este periodo. Momento que supone un punto de inflexión en las cúpulas, ahora estas se comportan como láminas.



Figura 55: Robert Mailland, 1940, Cement Hall, Zurich

a. Análisis General

Podemos encontrar diferentes estructuras laminares, en función de la curvatura de su superficie, a saber, de simple curvatura o desarrollables, es el caso en el que la curvatura siempre es del mismo signo sea cual sea el punto que se tome como referencia y la dirección en la que se mida, a excepción hecha de la recta generatriz que se da en los elementos como cilindros, conos, etc. En cuyo caso, en una dirección sí que se observa el mismo signo en la curvatura, mientras que en la ortogonal, se encuentra la recta que mediría, en el caso de los cilindros la altura.

Por otro lado también encontramos las superficies con doble curvatura, que a su vez se pueden dividir en dos subgrupos. Las sinclásticas, que al igual que las de simple curvatura sea cual sea el punto de referencia que se tome obtendremos el mismo signo en la curvatura sea cual sea su dirección, en este caso no hay excepciones, como es la generatriz en las desarrollables, entre las que se encuentra la cúpula, que es la que más adelante desarrollamos, el elipsoide o el hiperboloide de dos hojas, por ejemplo. También existe el caso opuesto, las superficies de doble curvatura anticlásticas; en este caso, la curvatura tendrá un signo o su opuesto según la dirección en la que se compruebe, como por ejemplo el hiperboloide de una sola hoja.

Figura 56: Prueba de carga de una estructura con escaso espesor, de hormigón armado.

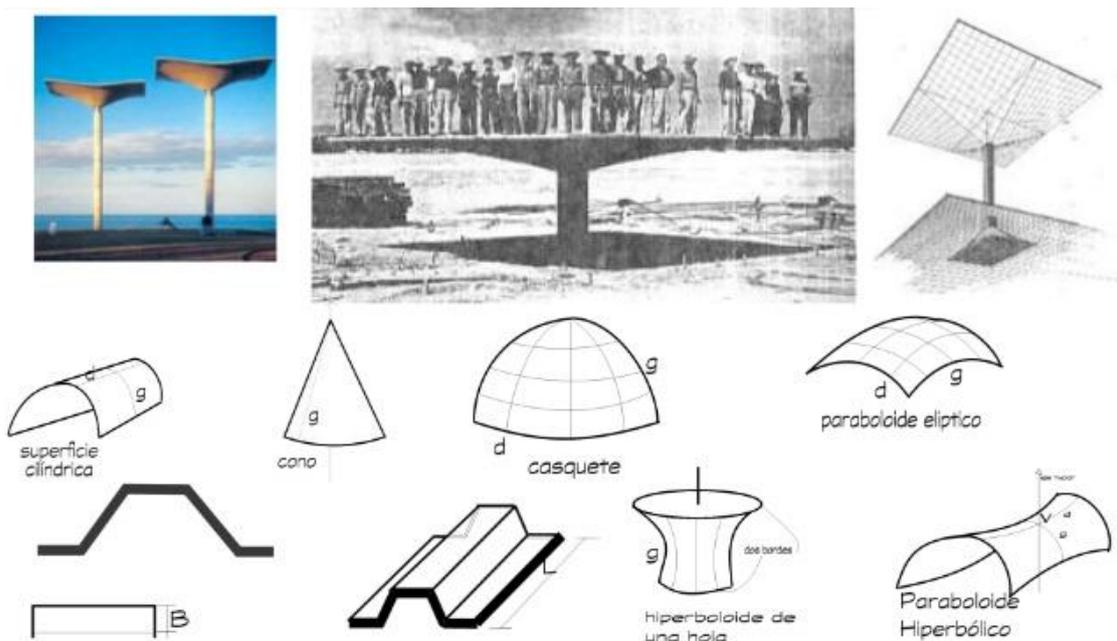


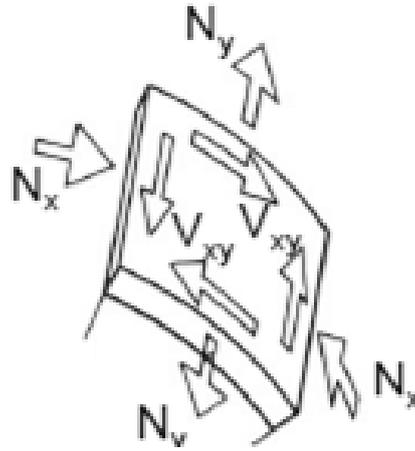
Figura 57: Esquemas de la tipología de superficies.

Todas estas superficies se pueden obtener haciendo girar la curva alrededor de un eje de rotación que da nombre al método de obtención, también denominadas superficies de revolución, como podrían ser el cilindro, el cono o el paraboloide, etc., o por el contrario, si la curva se mueve de manera paralela a su misma dirección, se

obtiene la superficie por traslación. El conoide, o el paraboloides elíptico e hiperbólico son ejemplos de las superficies de traslación.

Si obtenemos la superficie curva por desplazamiento y rotación de una línea recta se obtienen las denominadas superficies regladas como serían el cilindro o el paraboloides hiperbólico.

Figura 58: Descomposición de los esfuerzos a los que está sometido un diferencial de superficie.



Dada la gran esbeltez de las superficies laminares, no son capaces de transmitir esfuerzos ortogonales a su directriz o esfuerzos de compresión que provocarían fenómenos de inestabilidad como el pandeo, e incluso podrían llevar al colapso la estructura. Es decir, este tipo de estructuras han de trabajar a esfuerzo axial de tracción, esfuerzo que se transmitirá a lo largo de su superficie, buscando siempre el camino más corto, sea cual sea la dirección que tome, por lo que puede ser bidireccional, hasta llegar al soporte o punto de apoyo más cercano. Los momentos que se generarán en los puntos de apoyo, en su caso, serán uno de los condicionantes para determinar el espesor de la superficie necesario para que las tensiones que se generen se transmitan a lo largo de su superficie. Estas tensiones, como se ha comentado han de ser de tracción por la reducida resistencia a flexión, pero, como todo material, siempre hay una pequeña capacidad resistente a compresión por lo que admitirá unas pequeñas tensiones que se transmitirán del mismo modo, por su superficie. Como comprobación, por tanto, del pandeo, se verificará que estas tensiones mencionadas de compresión no superarán el valor límite dado para el espesor de cálculo.

Figura 59: Restaurante “Los Manantiales”, 1957, Ciudad de México, Félix Candela.



Figura 60: Hipódromo de la Zarzuela, Eduardo Torroja, Carlos Arniches y Martín Domínguez.



Debido a la escasa resistencia a flexotracción del hormigón, 3,5 MPa o 4,0 MPa para resistencias características aproximadas a compresión de 25 MPa y 30 MPa, respectivamente, por lo que si la superficie es de hormigón, como solía ser a partir del siglo XIX, esta deberá reforzarse mediante el uso de una armadura de acero en su interior que deberá dimensionarse y ubicarse donde se requiera para el esfuerzo de tracción al que esté sometido. Debido al mismo o similar problema que poseen los arcos, las estructuras laminares deben tener limitado el desplazamiento en los puntos de apoyo, con tal de limitar las tensiones que ahí se desarrollan y que pueden dar lugar a la aparición de fisuras en el material, e incluso su ruina.

Su estabilidad se obtiene mediante el propio diseño, la geometría, y las tensiones que se producen tras su entrada en carga. Ciertas superficies necesitan entrar en carga para garantizar su estabilidad frente a las acciones exteriores horizontales como puede ser el viento.

Figura 61: Mercado de Algeciras, de E. Torroja, se pueden apreciar los elementos longitudinales que actúan como tirantes soportando los empujes horizontales que la cúpula le transmite a los soportes. (Ver ANEXO I, Ficha IV).



El mercado de Algeciras de la imagen se estudiará más a fondo en la aplicación al caso real del análisis efectuado en este apartado y posteriormente se añadirá una ficha con información complementaria.

En este apartado, tras la breve introducción general de los sistemas estructurales laminares, se va a desarrollar un poco más concretamente las cúpulas que, como se ha comentado, son superficies sinclásticas.

Desde los 43 m de la cúpula que cubre el Panteón de Roma, las cúpulas han ido aumentando su rango de luz máximo y disminuyendo su espesor, gracias a la introducción del hormigón armado, hasta alcanzar los 310 m de diámetro en el Estadio Nacional de Singapur

Figura 62: Mecanismo portante de las cúpulas semiesféricas:

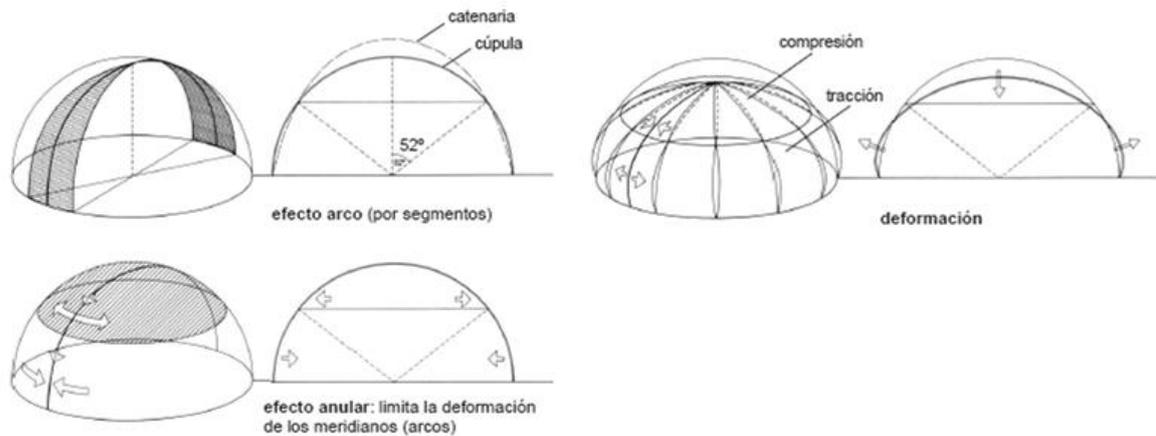


Figura 63: Deformación provocada al aplicar una carga externa sobre la cúpula en su eje de simetría.



Entre las patologías más usuales se encuentra la de los empujes horizontales generados en el perímetro de apoyo de las cúpulas, que tienden a abrir los puntos de apoyo hasta provocar la ruina, si no se soluciona mediante unos tirantes, o un anillo de tracción. Este efecto deriva de la transmisión de los esfuerzos internos, que al llegar al punto de apoyo, se descompone en dos fuerzas, una vertical que se transmite directamente al terreno de apoyo y otra horizontal, que provoca unos esfuerzos de flexión en los elementos de apoyo. Esta componente horizontal de las fuerzas puede verse reducida o aumentada en función de la altura de la cúpula, siendo que estos aumentarán a medida que la cúpula se achate, efecto que también se da en los cables colgados entre dos puntos.

Al aumentar la altura de la cúpula, la componente horizontal de los esfuerzos que se generan al aplicar una carga sobre ellas, tienden a disminuir, aunque de igual modo la parte superior de la cúpula deformará hacia el interior, hacia abajo, tratando de abrirse en la parte baja de la misma.

Las cúpulas que apoyan perimetralmente se comportarán como una membrana, de esta forma, y suponiendo una carga uniformemente repartida, las fuerzas que se transmiten siguiendo la línea de los meridianos son las fuerzas principales de compresión, descomponiendo estas fuerzas en cada punto correspondiente a los anillos, o paralelos horizontales, obtenemos la componente de tracción horizontal que actúan a lo largo de la superficie de la cúpula. De esta forma, cada meridiano se comporta como un arco funicular en el que no se desarrollan esfuerzos de tracción, aspecto que supone una clara ventaja sobre los arcos en su capacidad estructural. Y evitando que se deforme tanto hacia el interior como el exterior debido a la desviación de las fuerzas. Siendo los anillos los que impiden la flexión del elemento.

El anillo de borde sufrirá pues, debido a la componente horizontal radial, una fuerza que provocará la dilatación o la abertura de la circunferencia y por tanto su fisuración. Estos efectos vistos, se agravarán cuando la carga no sea uniformemente repartida, o el material sufra esfuerzos producidos por un gradiente de temperatura a lo largo de su superficie.

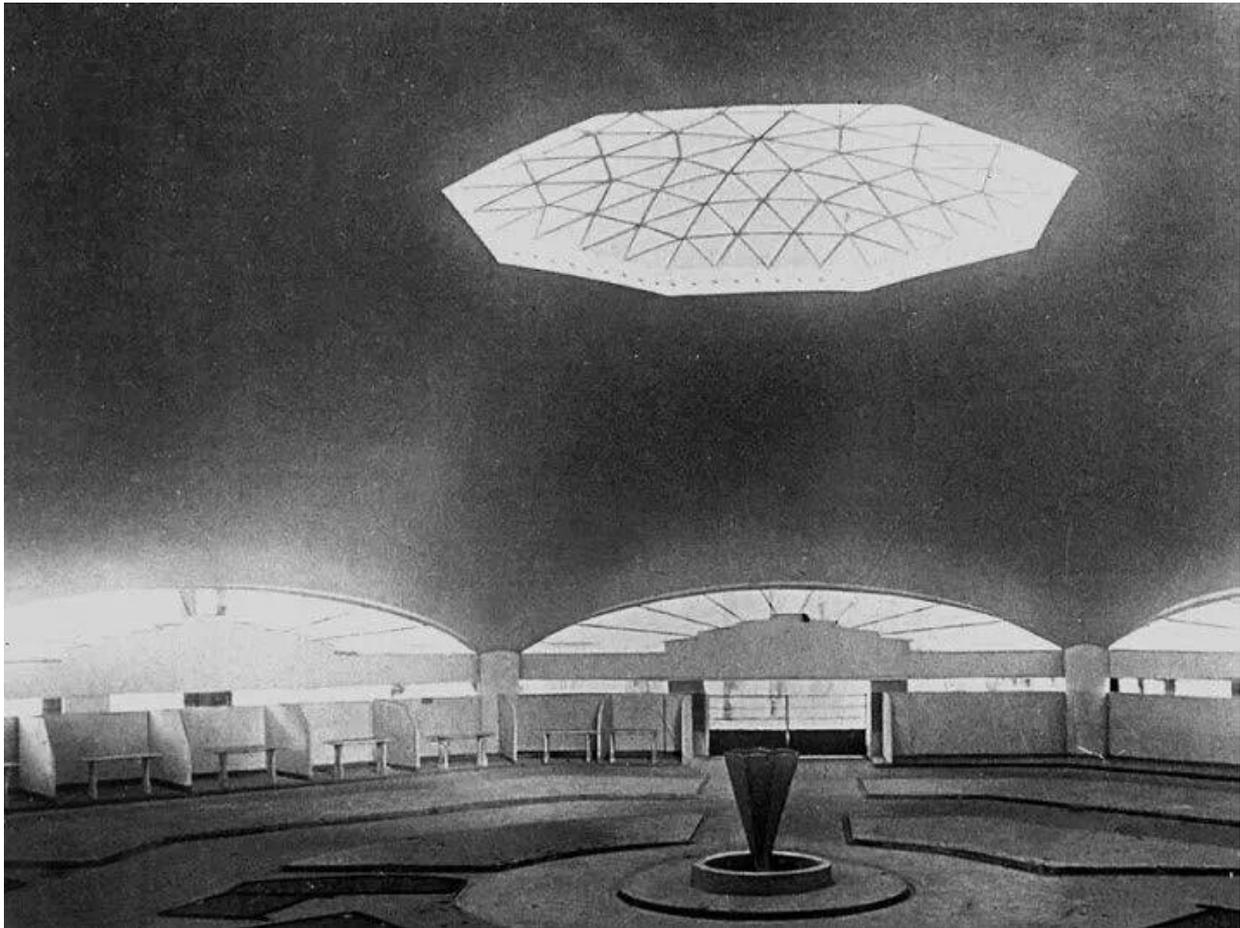


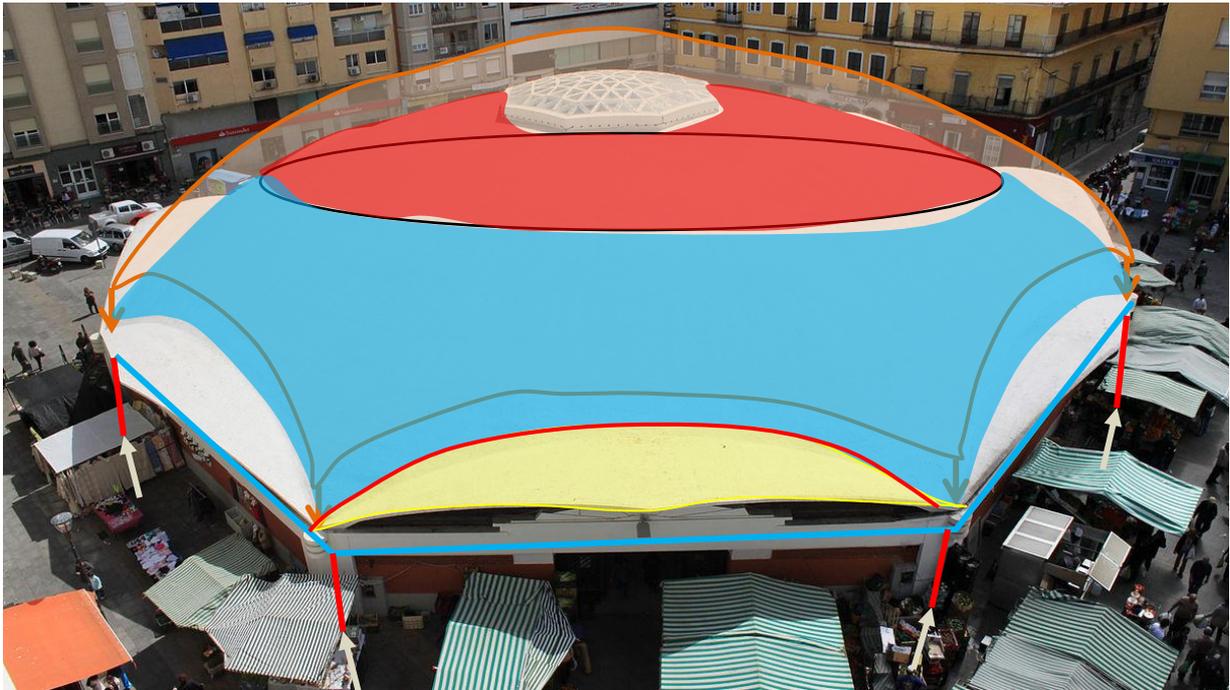
Figura 64: Vista interior del mercado de Algeciras

c. Mercado de Abastos de Algeciras, Cádiz, España, 1935, Eduardo Torroja.

Figura 65: Vista aérea del Mercado del Algeciras.



Leyenda: — Soportes — Tirantes — Cúpula rebajada



(Figura 65)

Leyenda: — Compresión — Tracción — Reacciones — Cargas — · Terreno

Como se puede apreciar en la imagen superior, en este caso la carga que debe soportar el sistema estructural es el peso propio de la cúpula, los esfuerzos que esta genera al transmitirse por la superficie hasta que se disipa al llegar al terreno. Las acciones exteriores que se puedan dar como el viento, por ejemplo, también afectarán al sistema, teniendo en cuenta que al tratarse de una gran superficie ofrece mucha resistencia al viento, aunque en este caso al estar entre edificios, estos actuarán como pantallas.

Aplicando entonces lo analizado en el apartado anterior, y en referencia a lo que esquemáticamente se muestra en la imagen, el peso de la cubierta genera una serie de compresiones a lo largo de su superficie en la parte alta de la misma en la dirección de los meridianos como en la dirección de los paralelos, mientras que cuanto más se acerca a la base, la compresión disminuye y aumenta a su vez la tracción en los paralelos, lo que tiende a separar los soportes en su punto de coronación, es decir, en el perímetro que define la base de la cúpula, y aumenta la posibilidad de fisuración.

Los esfuerzos de compresión y tracción se transmitirán bidireccionalmente a lo largo de la superficie de la cúpula, que se distribuirían de forma uniforme a lo largo del perímetro de su base. En este caso se ha evitado parte de esas tracciones actuantes en la base de la cúpula al suprimir parte de su perímetro inferior y disponer en su lugar unos fragmentos de cilindros, marcados en amarillo, redirigiendo los esfuerzos a lo largo de la intersección que se genera entre estos dos directamente a los puntos de apoyo y

suprimiendo los esfuerzos de tracción que podrían suponer la fisuración del elemento si esta llegara toda al mismo punto en el que se sitúan los puntos de apoyo.

Como se ha comentado anteriormente, los esfuerzos de tracción tienden a separar los puntos de coronación de todos los soportes de forma radial, pese a la disminución que supone la intersección del cilindro eliminando porciones de la cúpula. Por lo que se han dispuesto unos tirantes perimetrales dispuestos uniendo todos los soportes cerca de su punto de coronación, absorbiendo todas las tracciones que a este se le transmitirían.

De modo que los tirantes se dimensionarán a esfuerzo axial de tracción y los soportes a compresión simple, simplificando de esta forma el cálculo de los esfuerzos, con esto se obtiene una notable disminución del espesor de la superficie de la cubierta así como la sección de los soportes, debido a la diferencia de resistencia del hormigón a flexotracción respecto de la resistencia característica a compresión.

En cuanto a las reacciones exteriores en los apoyos sobre el suelo, la cimentación de la estructura, supone del mismo modo mejorar su comportamiento frente a vuelco y flexión dado que se han reducido los esfuerzos de este tipo.



66: Fotografía del mercado

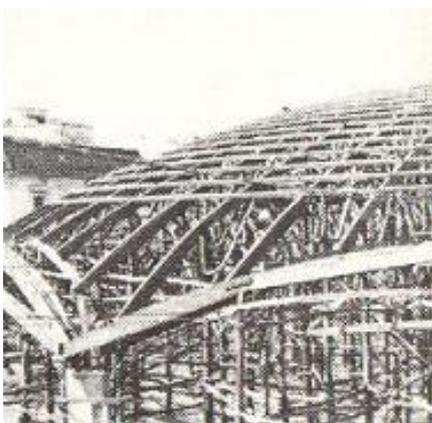
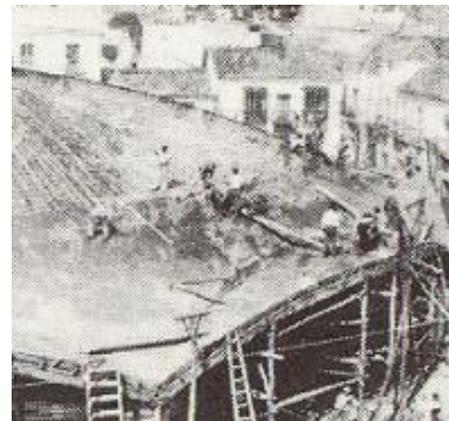
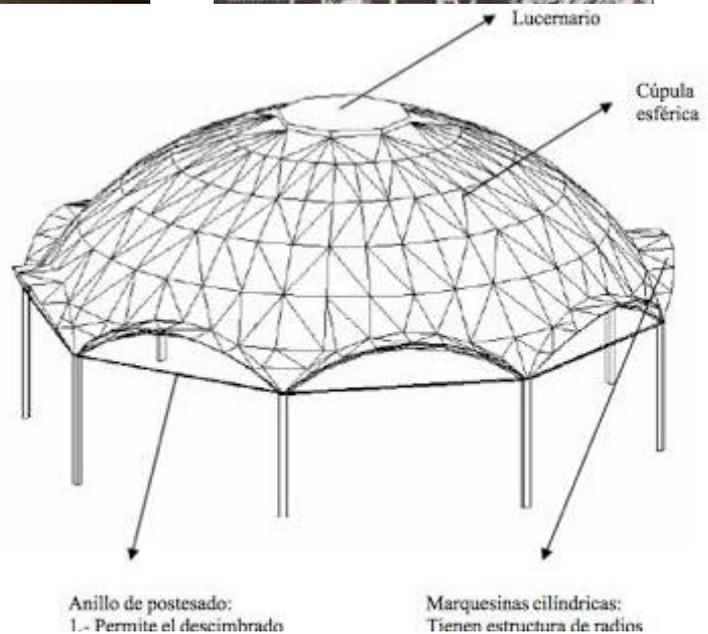


Figura 67: Cimbra de la cúpula.

Figura 68: Hormigonado cúpula.

Figura 69: Modelo tridimensional.



7. CONCLUSIONES

A modo de conclusión del trabajo realizado, se realiza un pequeño resumen, se ha observado una mayor complejidad de diseño y cálculo en los sistemas como los arcos, y las cúpulas; además de una capacidad limitada en cuanto a su uso, ya que en ambos casos, su limitada resistencia a cargas puntuales impide su uso más allá de las cubiertas, salvo que se combine con otros sistemas, y siempre conllevando un cálculo muy complejo y elaborado.

Los cables al igual que los anteriores tienen una utilidad limitada en cuanto al campo de edificación, más allá de complementar los sistemas estructurales más usuales a fin de conseguir la longitud de vano requerida. Por otro lado este sistema es más adaptable y por tanto su uso más efectivo.

Por último las cerchas parecen el sistema, hoy por hoy, más adecuadas para dar solución a las estructuras de edificación que requieran de grandes luces. No obstante, el uso previsto para la construcción condicionará absolutamente la elección puesto que la simplicidad de cálculos y de ejecución debido a las mejoras técnicas de que se dispone hoy en día hacen a los arcos, los cables y las cúpulas, también una buena solución para dar cubierta a los espacios diáfanos.

En cuanto a la combinación de los sistemas propuestos, se pueden alcanzar gran variedad de soluciones, es decir, individualmente, las cerchas quizás sean las más adecuadas para estructuras en las que se prevea un uso, mientras que los arcos, los cables y las cúpulas por sí mismas son más propias de cubiertas; cuestión, como se comenta, que puede ser en parte solucionada, gracias a la combinación de dos o más de estos sistemas. Como podría ser el caso del Mercado de Abastos de Algeciras, en el que se emplea una cúpula como cubierta, pero que para aumentar la luz interior y disminuir la sección de la misma se complementa con unos tirantes perimetrales.

8. BIBLIOGRAFÍA

8.1. Libros:

- [1] Basset, L.; Abdilla E. “Modelos estructurales y diseño estructural”, Servicio de Publicaciones SPUPV-93.268.
- [2] Schodek, Daniel L.. “Structures”, Pearsons Education, Inc., New York,2008
- [3] Heino Engel. “Sistemas de estructuras”, Editorial Gustavo Gili S.L., Barcelona, 2006.
- [4] Schierle G.G.: architectural structures
<http://us.cdn.persianguig.com/dl/0NSoKs/Architectural%20Structures.pdf>
- [5] M. Salvadori, M. Levy.- Structural Design in Architecture, Prentice Hall, 1981.
- [6] W. Schueller.- Horizontal-Span Building Structures, J. Wiley & Sons, 1983.
- [7] Monfort, José; “Estructuras metálicas para edificación”; Universidad Politécnica de Valencia, 2006.

8.2. Artículos:

- [8] Fernández, Cesar; Casañas, Virginia. “Cables y arcos”, en www.fadu.edu.uy
- [9] VVAA. Cátedra de Ingeniería Rural, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real.
- [10] Basset Salom, Luisa; Guardiola Vállora, Arianna; “Celosías”, Escuela Superior de Arquitectura de Valencia en www.riunet.upv.es
- [11] Huerta, Santiago. “ Arcos, bóvedas y cúpulas”. Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Madrid.
- [12] Basset Salom, Luisa; “Estructuras laminares”, Escuela Superior de Arquitectura de Valencia en www.riunet.upv.es
- [13] Villafañe, Elbio; “Estructuras laminares. Teoría y aplicaciones”; Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería.

8.3. Referencias electrónicas:

- [14] www.es.wikipedia.org [18 de Junio de 2017]
- [15] www.megaconstrucciones.net [29 de Junio de 2017]
- [16] www.ingeniero-de-caminos.com [21 de Junio de 2017]
- [17] www.algargosarte.blogspot.com.es/2014/09/la-catedral-gotica-edificio-emblematico.html [18 de Junio de 2017]
- [18] <http://www.plataformaarquitectura.cl/> [24 de Junio de 2017]
- [19] <http://www2.aq.upm.es/dcta/bovedas/> [21 de Junio de 2017]
- [20] www.casabatllo.es [22 de Junio de 2017]
- [21] <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com.es> [25 de Junio de 2017]
- [22] <http://www.tectonicablog.com/> [16 de Junio de 2017]
- [23] AYUNTAMIENTO DE ALGECIRAS; <http://www.algeciras.es> [26 de Junio de 2017]
- [24] blogs.upv.es [18 de Junio de 2017]

8.4. Listado de Figuras:

Figura 1: Graneros del Ramesseum, templo de Ramsés II. Orilla occidental de Luxor-Sheikh Abd [14]

Figura 2: Sección del Panteón de Agripa [14]

Figura 3: Dibujo sistema estructural del Panteón [16]

Figura 4: Ejemplo de los tipos de arcos góticos existentes (izquierda) [17]

Figura 5: Ejemplo del arco romano de medio punto (derecha) en el que se pueden apreciar las dovelas, la calve central y la disposición de lo almohadón como inicio del arco en la imposta. 13[20]

Figura 6: Casa Batlló de Antoni Gaudí ubicada en el Passeig de Gràcia de Barelona. [20]

Figura 7: Línea de empujes y descomposición de las fuerzas en el c.d.g. de cada dovela. [16]

Figura 8: Esquema de las acciones (peso propio) y de las reacciones que se generan. [16]

Figura 9: Esquemas basados en los que aparecen en Abdilla y Basset [1]

Figura 10: Desplazamiento que experimenta un peso G sobre el que actúa una fuerza horizontal F , generando un momento de segundo orden al desplazar el punto de aplicación del peso G respecto del c.d.g. del soporte. [7]

Figura 11: Esquema deformación arco sobre soportes verticales. [7]

Figura 12: Ejemplo de arriostramiento y estabilización de arcos. [1]

Figura 13: Detalle lucernario de la catedral. [18]

Figura 14: Interior de la catedral, sucesión de arcos paralelos. [18]

Figura 15: Sección transversal de la catedral. [18]

Figura 16: Planta baja de la catedral. [18]

Figura 17: Pasillo lateral de la catedral. [18]

Figura 18: Sección longitudinal de la catedral. [18]

Figura 19: Anfiteatro Flavio. [14]

Figura 20: Gran Puente de Akashi kaikyō, en Kobe-Awaji, Japón.[14]

Figura 21: Reacciones que se generan al aplicar unas fuerzas en el extremo de un cable.[8]

Figura 22: Reacciones que se generan al utilizar dos cables para soportar un peso. [8]

Figura 23: Esquemas de la forma que adopta un cable con diferentes cargas.[8]

Figura 24: Esquema de la adaptación del cable a la carga aplicada.[1]

Figura 25: Esquema explicativo del aumento de la fuerza horizontal transmitida.[8]

Figura 26: Sistemas de arriostramiento y estabilización del cable. [8]

Figura 27: Esquema de las diferentes soluciones posibles para estabilizar los cables ante las fuerzas de presión y succión que puede generar el viento en las cubiertas. [1]

Figura 28: Maqueta del aspecto exterior del estadio principal.[21]

Figura 29: Maqueta de la estructura del estadio principal.[21]

Figura 30: Secciones transversal y longitudinal del estadio. [21]

Figura 31: Modelo tridimensional. [21]

Figura 32: Ejemplo del método constructivo mediante cimbra empleada habitualmente en la construcción de estructuras de grandes luces, durante la época romana, gótica, etc. [17]

Figura 33: Imagen de la Torre Eiffel, y del entramado de celosías empleado en su construcción. [14]

Figura 34: Ejemplos de los primeros diseños de las celosías con la aparición del acero. [10]

Figura 35: Deformación celosía con nudos articulados. [10]

Figura 36: Deformación de la celosía con nudos rígidos. [10]

Figura 37: Nudo articulado en una viga continua.

Figura 38: Unión viga-soporte articulada, del cordón superior de una celosía. Ejecutada mediante tornillos dispuestos en los 2/3 centrales del alma del soporte.

Figura 39: Unión celosía-soporte rígida, la soldadura incluye toda el alma del cordón superior, así como las alas del perfil.

Figura 40: Sección transversal del cordón superior de una celosía, eje de simetría común a todos los elementos.

Figura 41: Esquema pandeo. [7]

Figura 42: Modelo tridimensional de un sistema porticado arriostrado en el plano del pórtico y en el plano transversal.

Figura 43: Pandeo de la celosía en el plano del pórtico.

Figura 44: Pandeo de la celosía en el plano transversal sin arriostramiento, longitud de pandeo = luz de vano.

Figura 45: Pandeo de la celosía en el plano transversal con arriostramiento.

Figura 46: Posibles de acero conformado en frío.

Figura 47: Diagramas de deformación de un soporte empotrado-libre y empotrado-apoyado.

Figura 48: Arriostramiento tipo cruz de San Andrés.

Figura 49: Vista de la estructura desde el interior durante la construcción. [22]

Figura 50: Perspectiva exterior de la estructura ejecutada.[22]

Figura 51: Imagen del interior una vez finalizada la estructura, que da una idea de la altura que alcanza la celosía sin ser necesario a su vez el uso de perfiles metálicos de gran área.[22]

Figura 52: Vista de uno de los puntos de apoyo para transmitir las cargas de la celosía hasta la cimentación. [22]

Figura 53: Panteón de Agripa, Roma, 125 d.C. [14]

Figura 54: Axonométrico Iglesia de Santa Sofía.[14]

Figura 55: Robert Maillard, 1940, Cement Hall, Zurich [14]

Figura 56: Prueba de carga de ua estructura con escaso espesor, de hormigón armado.

Figura 57: Esquemas de la tipología de superficies. [13]

Figura 58: Descomposición de los esfuerzos a los que está sometido un diferencial de superficie. [13]

Figura 59: Restaurante “Los Manantiales”, 1957, Ciudad de México, Félix Candela. [14]

Figura 60: Hipódromo de la Zarzuela, Eduardo Torroja, Carlos Arniches y Martín Domínguez. [14]

Figura 61: Mercado de Algeciras, de E. Torroja, se pueden apreciar los elementos longitudinales que actúan como tirantes soportando los empujes horizontales que la cúpula le transmite a los soportes. (Ver ANEXO I, Ficha IV). [23]

Figura 62: Mecanismo portante de las cúpulas semiesféricas [12]

Figura 63: Deformación provocada al aplicar una carga externa sobre la cúpula en su eje de simetría [12].

Figura 64: Vista interior del mercado de Algeciras . [14]

Figura 65: Vista aérea del Mercado del Algeciras. [14]

Figura 66: Fotografía del mercado [14]

Figura 67: Cimbra de la cúpula. [14]

Figura 68: Hormigonado cúpula. [14]

Figura 69: Modelo tridimensional [24]