

Comportamiento de Láminas de Hormigón: El Mercado de Abastos de Algeciras



Trabajo fin de estudios
Diciembre 2023

Universidad Politécnica de
Cartagena

Alumna: Sara Romero López

Profesor: Carlos José Parra
Costa

*Imagen 1 Vista aérea del Mercado
de Algeciras*

A mi padre.

Resumen

Las estructuras laminares de hormigón tuvieron un gran desarrollo durante el siglo XX, la evolución del hormigón armado como material de construcción llevó al desarrollo de nuevos tipos estructurales. A pesar de la dificultad para calcular estructuras con geometrías complejas en la época, muchos arquitectos e ingenieros de todo el mundo desarrollaron teorías del funcionamiento de láminas delgadas de hormigón y su puesta en práctica, aprovechando las ventajas que ofrecen como sistema de cubrición para grandes luces. Una de las figuras más importantes en el desarrollo de estas estructuras fue el ingeniero Eduardo Torroja Miret quien, junto a Manuel Sánchez Arcas, proyectó y construyó el Mercado de abastos de Algeciras. Este edificio fue uno de los primeros que se construyó en España empleando el uso de las estructuras laminares para cubrir una luz de más de cuarenta metros con un espesor mínimo.

Palabras clave: Estructura laminar, Mercado, Algeciras, Eduardo Torroja, Cubierta laminar, Hormigón, Edificio singular.

Abstract

Thin concrete shells constructions was developed greatly during the 20th century, as the evolution of reinforced concrete as a building material led to the development of new structural model and patterns. Despite the difficulty of calculating structures with complex geometries at the time, many architects and engineers around the world developed theories of the operation of thin concrete slabs and their implementation, taking advantage of the benefits they offer as a covering system for large spans. One of the most important figures in the development of these structures was the engineer Eduardo Torroja Miret who, together with Manuel Sánchez Arcas, designed and built the Algeciras Food Market. This building was one of the first to be built in Spain employing the use of shell structures to cover a span of more than forty meters with a minimum thickness.

Key words: Laminar structure, Food Market, Algeciras, Eduardo Torroja, Laminar cover, Concrete, Singular building.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
Objetivos.....	9
Metodología	9
ESTRUCTURAS LAMINARES.....	10
Introducción	11
Origen de las estructuras laminares.....	13
Funcionamiento de la estructura laminar	15
Eduardo Torroja: Figura del desarrollo de las estructuras laminares	18
ESTADO DEL ARTE: MERCADO DE ALGECIRAS.....	20
Contexto histórico del mercado de Algeciras.....	21
Contexto constructivo del mercado	23
Análisis arquitectónico y funcional.....	25
ESTRUCTURA DEL MERCADO	27
Características geométricas.....	28
Materialidad y construcción	29
Comportamiento estructural.....	30
Planteamiento de variables geométricas	32
DISCUSIÓN.....	34
CONCLUSIONES.....	42
BIBLIOGRAFÍA	46

INTRODUCCIÓN

Objetivos

El presente Trabajo Fin de Grado tiene por objeto comprender en profundidad del sistema estructural del mercado de Algeciras, analizando cómo podrían variar los esfuerzos producidos en la lámina al modificar algunas de sus características geométricas.

Para ello se introducen las estructuras laminares analizando su origen, evolución y funcionalidad, así como los aspectos técnicos relacionados con la construcción, aprovechamiento del material o transmisión de esfuerzos.

A continuación, se hace una aproximación al contexto histórico, social y cultural en el que se inserta el edificio, suponiendo un hito y un gran avance en la nueva tipología de estructuras laminares de hormigón.

Finalmente se enfoca en la vida y obra de Eduardo Torroja para comprender las motivaciones y aspectos principales que dieron al mercado su forma final, adentrándose en el estudio detallado de todos los elementos que componen el edificio y su función estructural. En base a este estudio planteamos las hipótesis de cómo influyen en la estructura los posibles cambios geométricos de la cúpula, que explican su funcionamiento y las decisiones adoptadas en la solución final.

Metodología

Búsqueda de información mediante la consulta de otros trabajos de investigación, revistas y páginas web que permitan establecer un marco teórico y un estado del arte sobre la obra objeto de estudio, como punto de partida para la comprensión de su geometría y el análisis de las posibles variables de la misma.

Análisis del funcionamiento mecánico y su influencia sobre la forma, así como de los procedimientos para generar geometrías optimizadas de estructuras laminares de hormigón armado.



Imagen 2 Mercado de Algeciras

ESTRUCTURAS LAMINARES

- Introducción
- Origen de las estructuras laminares
- Funcionamiento de la estructura laminar
- Eduardo Torroja: Figura del desarrollo de las estructuras laminares

Introducción

Las estructuras laminares, construcciones delgadas o cáscaras, son superficies finas y curvadas de poco grosor en comparación con las dimensiones generales de la estructura. Estas superficies, debido a su forma, son capaces de soportar tanto las cargas de peso propio como las cargas externas a través de esfuerzos normales de compresión y/o tracción, así como esfuerzos tangenciales uniformes a lo largo de su espesor.

Su alta eficacia se origina en su curvatura y alabeo, lo que posibilita la optimización de su capacidad de resistencia mediante el uso eficiente de sección, material y peso. Estas construcciones se destacan como las más eficaces en relación a su comportamiento estructural.

La geometría de las láminas influye directamente en la forma en que éstas trabajan, aunque cada caso es objeto de estudio particular, se pueden agrupar según la forma de curvarse en dos grandes grupos: de simple y doble curvatura.

Las superficies de simple curvatura son las que se pueden definir mediante una única curvatura o radio en una dirección. Pueden generarse mediante rotación, de una recta generatriz entorno a un eje coplanario como un cilindro, o por traslación de una curva plana a lo largo de una recta directriz perpendicular al plano de dicha curva, cómo una bóveda de cañón.

Un ejemplo de estructura basada en superficies de simple curvatura lo encontramos entre las obras más importantes de Eduardo Torroja, la cubierta del Frontón de Recoletos (Imagen 3) se compone de dos láminas cilíndricas de hormigón armado que salvan una luz de 55 metros, ya que se apoya en sus extremos transversales, haciendo que funcione como una viga de gran canto.

Introducción

Origen de las estructuras laminares

Funcionamiento de la estructura laminar

Eduardo Torroja: Figura del desarrollo de las estructuras laminares



Imagen 3 Vista interior del Frontón de Recoletos

Introducción

Origen de las estructuras laminares

Funcionamiento de la estructura laminar

Eduardo Torroja: Figura del desarrollo de las estructuras laminares

Por otro lado, las superficies de doble curvatura no se pueden definir mediante un único radio o en una única dirección, ya que se componen por diferentes curvaturas en diferentes direcciones. Dentro de este grupo podemos distinguir dos tipos:

Sinclásticas: Son las superficies que se curvan en el mismo sentido en dos ejes perpendiculares, como una semiesfera. La cúpula del edificio objeto de estudio de este trabajo, el Mercado de Algeciras (Imagen 9), es un buen ejemplo de una superficie sinclástica dentro de las estructuras laminares.

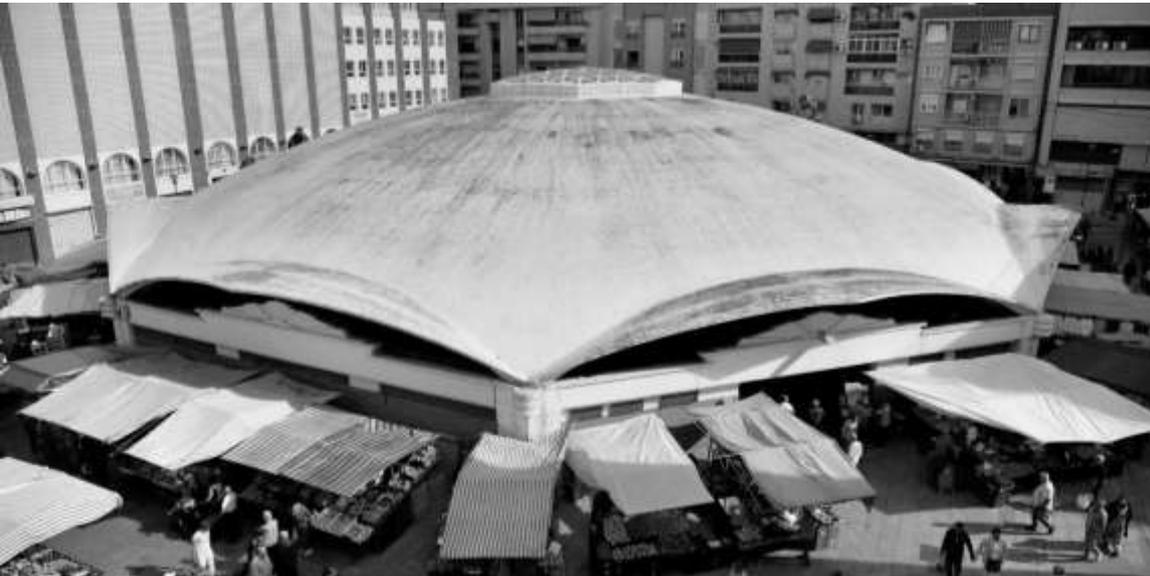


Imagen 5 Vista aérea del Mercado de Algeciras

Anticlásticas: Se caracterizan por curvarse en direcciones opuestas según ejes perpendiculares, pertenecen a este tipo los paraboloides hiperbólicos. Eduardo Torroja empleó este tipo de superficies para construir la marquesina de las gradas en el Hipódromo de la Zarzuela (Imagen 6), proyectando una lámina de hormigón de espesor mínimo que se curva en direcciones opuestas según dos ejes perpendiculares desde el apoyo de la misma. El hipódromo consiste en una estructura de bóvedas semicilíndricas alineadas que vuelan sobre la tribuna, construido en hormigón armado con un espesor mínimo, es la obra de mayor reconocimiento de Eduardo Torroja.

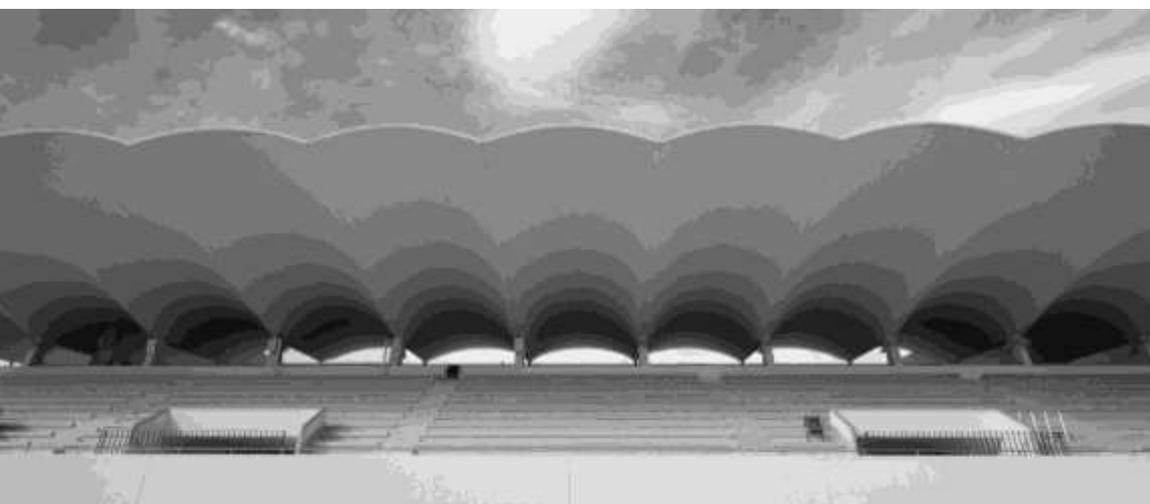


Imagen 4 Vista del Hipódromo de la Zarzuela

Origen de las estructuras laminares

Las estructuras laminares que conocemos en la actualidad son el resultado de la evolución de las cúpulas y bóvedas tradicionales. Estos sistemas estructurales nacen con la necesidad de cubrir un espacio para protegerse de las adversidades atmosféricas, así la forma geométrica de la cúpula responde a la manera más sencilla e intuitiva de realizar una cubierta con materiales primitivos, como piedras que podían disponerse por hiladas voladas unas sobre otras, cerrando el espacio a medida que aumenta la altura. Este sistema constructivo nace con el arco que, al repetirse a lo largo de una recta perpendicular a su plano da lugar a la bóveda de cañón, sobre la que

Origen de las estructuras laminares

Funcionamiento de la estructura laminar

Eduardo Torroja: Figura del desarrollo de las estructuras laminares

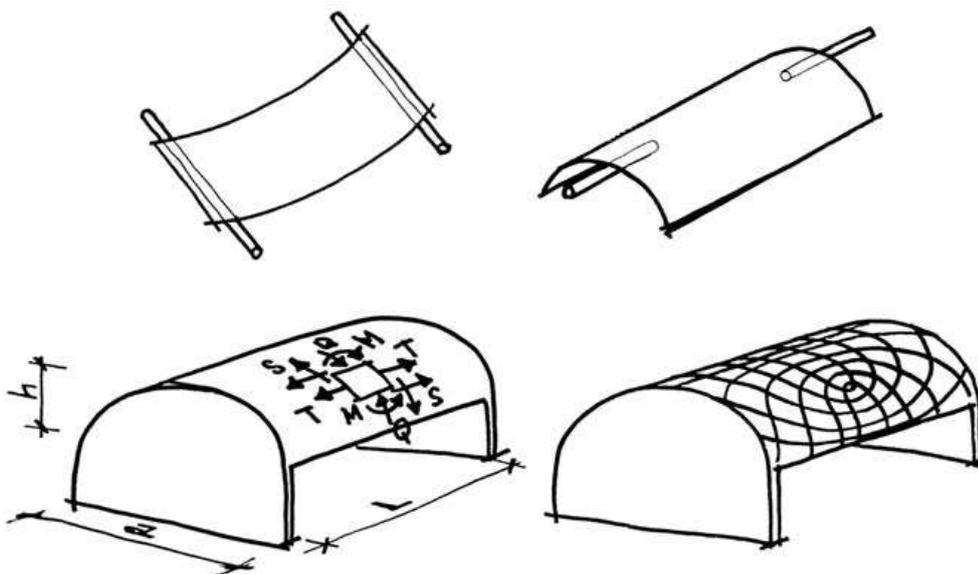


Imagen 6 Láminas cilíndricas

Las estructuras basadas en superficies curvas han ido evolucionando a medida que han evolucionado los materiales y sistemas constructivos. La primitiva piedra fue evolucionando a sillería y luego a ladrillos, que permitían controlar la curvatura de las superficies con mayor precisión y hacerlas más ligeras al estudiar la manera en que se transmiten las cargas, pudiendo concentrarlas en elementos lineales, como los nervios de las bóvedas góticas. Otros materiales como la madera, y posteriormente el hierro, con buena resistencia a tracción, permitieron la evolución y desarrollo de estructuras curvas más complejas.

Origen de las estructuras laminares

Funcionamiento de la estructura laminar

Eduardo Torroja: Figura del desarrollo de las estructuras laminares

El desarrollo del hormigón armado como material de construcción supone un gran impulso en el desarrollo de las superficies curvadas, permitiendo realizar estructuras con geometrías complejas, ya que resulta ser el material óptimo para transmitir las tensiones que se producen en la lámina gracias a la alta resistencia a compresión del hormigón combinada con la resistencia a tracción del acero.

Más allá del desarrollo del hormigón armado, lo que potenció el uso de las estructuras laminares fue el concepto de catenaria y funicular de cargas. La catenaria representa la curva que forma una cadena, de peso uniforme en todo su espesor, al sujetarse por los extremos. La principal cualidad de esta curva es que coincide con la parábola que trazan los vectores que indican el camino que siguen las fuerzas desde el centro hasta los soportes, esto hace que todo el elemento esté traccionado y no existan esfuerzos de flexión. Si a esa cadena se le aplican fuerzas en el mismo sentido que su propio peso, se deformará y trazará lo que conocemos como funicular de cargas. La aplicación de estos conceptos bidimensionales a las geometrías superficiales dio pie al desarrollo de las estructuras laminares.

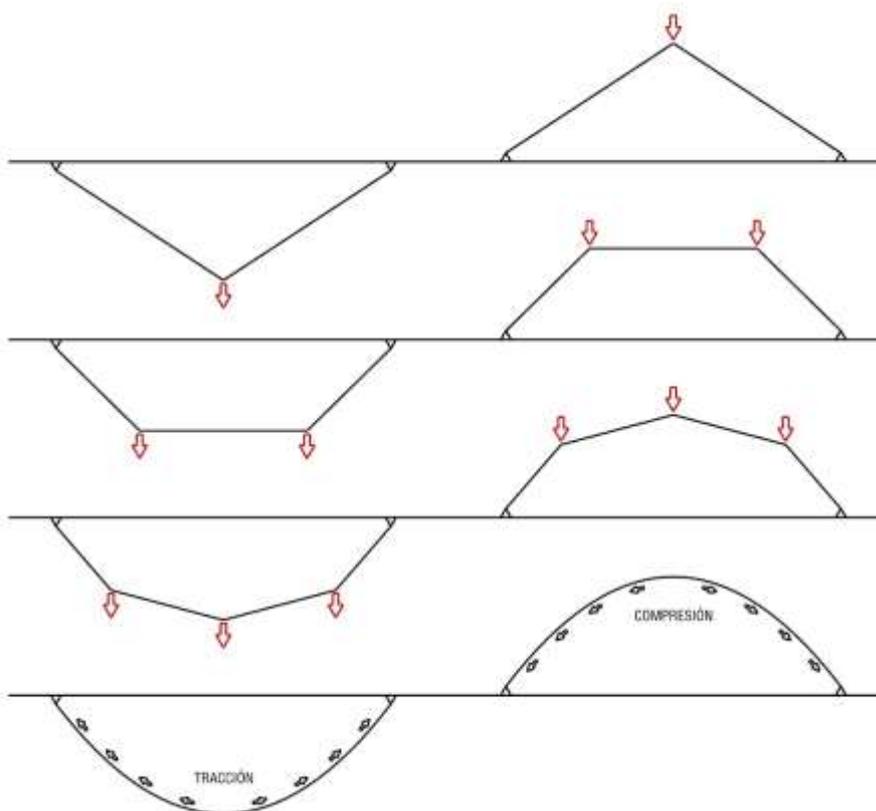


Imagen 7 Esquema de Catenaria y Funicular

Las láminas delgadas vivieron su edad dorada en la primera mitad del siglo XX en distintos países de Europa como Alemania y llegaron a España gracias al auge de la investigación en construcción y la difusión por parte de los ingenieros y arquitectos de la época. Hasta la primera mitad de siglo se desarrolla y extiende la teoría sobre el concepto estructural de la lámina y se realizan las primeras construcciones, pero es en la segunda mitad cuando se produce un mayor desarrollo gracias al trabajo de arquitectos como Pier Luigi Nervi, Eero Saarinen u Oscar Niemeyer. Uno de los mayores exponentes en el desarrollo de esta tipología fue Félix Candela, quien desarrolló sobre todo las estructuras de cáscara a partir del uso del paraboloide hiperbólico para la formación de superficies de doble curvatura, alcanzando espesores mínimos de entorno a 4cm.

Funcionamiento de la estructura laminar

Las estructuras laminares funcionan por su forma curvada, distribuyendo las cargas de manera uniforme por la superficie en lugar de concentrarlas en un punto. El objetivo de esta tipología estructural es optimizar su resistencia y estabilidad mediante su forma geométrica, de manera que la capacidad resistente del material empleado sea irrelevante para su construcción. Se trata de obtener la máxima rigidez a igualdad de material mediante el diseño geométrico. Mientras que las vigas trabajan a flexión, es decir, están comprimidas y traccionadas, el objetivo de las láminas es que trabajen sólo a compresión.

El proceso de diseño de estas estructuras requiere de un gran conocimiento de la técnica, pero también de la capacidad intuitiva para entender cuál es la forma óptima que permite trasladar las cargas de la manera más natural, permitiendo cubrir superficies de grandes luces con el mínimo material.

En definitiva, las estructuras laminares consisten en materializar las líneas que siguen los esfuerzos a lo largo de una superficie, adaptando la forma final a la directriz que sigue la fuerza que ejerce un elemento sobre otro hasta llegar al apoyo.

Las láminas están presentes en la naturaleza en forma de catenaria, el arco invertido que forma una liana o la membrana que conforma una telaraña son elementos que se sostienen conformando una curva debida a su propio peso en la que las cargas se transmiten siguiendo la misma curvatura que conforman. Este concepto permite que una superficie con el mínimo espesor sea estable gracias a que dispone del material imprescindible para que cada punto de la superficie transmita su peso al siguiente, dispuesto en la trayectoria exacta en la que ese esfuerzo requiere ser transmitido, desde el centro hasta los apoyos, mediante esfuerzos uniformes de tracción en todo su espesor.

Si invertimos el concepto de catenaria según el eje X la carga de peso propio sigue la misma dirección y la línea que define la forma en que los esfuerzos se transmiten a lo largo de la curva es igual, pero de sentido contrario, es decir, la tracción a la que estaba sometida la catenaria se convierte en esfuerzo de compresión. Entonces podríamos hablar de materiales óptimos en su resistencia a compresión, como el hormigón, pero lo que permite reducir tanto el espesor y optimizar la rigidez del conjunto es la forma geométrica que ofrece el máximo aprovechamiento del material, con independencia de su capacidad resistente.

Pero el arco catenario no deja de ser un elemento bidimensional y es la forma en que este se desplaza a lo largo del espacio lo que constituye la superficie que permite cubrir un espacio. Ya sea partiendo del concepto de catenaria o empleando el conocido arco de medio punto, la forma en que lo desarrollamos a lo largo del espacio influye en la estabilidad que el resultado podrá ofrecernos. Así, podemos distinguir dos tipos de superficie: de simple o doble curvatura.

En las superficies de simple curvatura cada punto de la superficie queda definido por la intersección entre una línea curva y una recta. El esfuerzo generado en cada punto será transmitido a través del arco hasta los apoyos y la sucesión de arcos mejorará la estabilidad del conjunto permitiendo la transmisión de esfuerzos también en el sentido longitudinal, pero generando a cambio esfuerzos de flexión en la superficie.

Origen de las estructuras laminares

Funcionamiento de la estructura laminar

Eduardo Torroja: Figura del desarrollo de las estructuras laminares

Por otro lado, las superficies de doble curvatura, como una semiesfera, son las que definen sus puntos mediante la intersección de dos curvas en distinta dirección. En una cúpula semiesférica cada punto quedará definido por la curva que se repite de manera radial, también conocida como meridiano, y por la curva que define el contorno en planta, o paralelo, de manera que el esfuerzo que este punto transmite al resto de la superficie sigue la directriz del arco meridiano, pero estando arriostrado por los paralelos que unen y rigidizan el conjunto. Así, las superficies de doble curvatura ofrecen una mayor resistencia a pandeo que las de simple curvatura, ya que éstas no disponen de una curva que arriestre y minimice las deformaciones laterales. Por ello las superficies de doble curvatura ofrecen mayor estabilidad, permitiendo reducir el espesor al máximo.

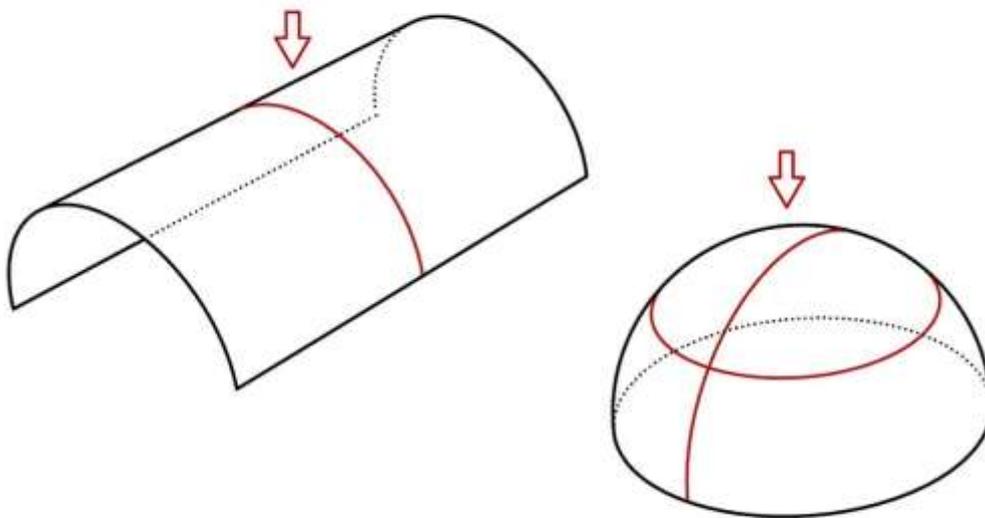


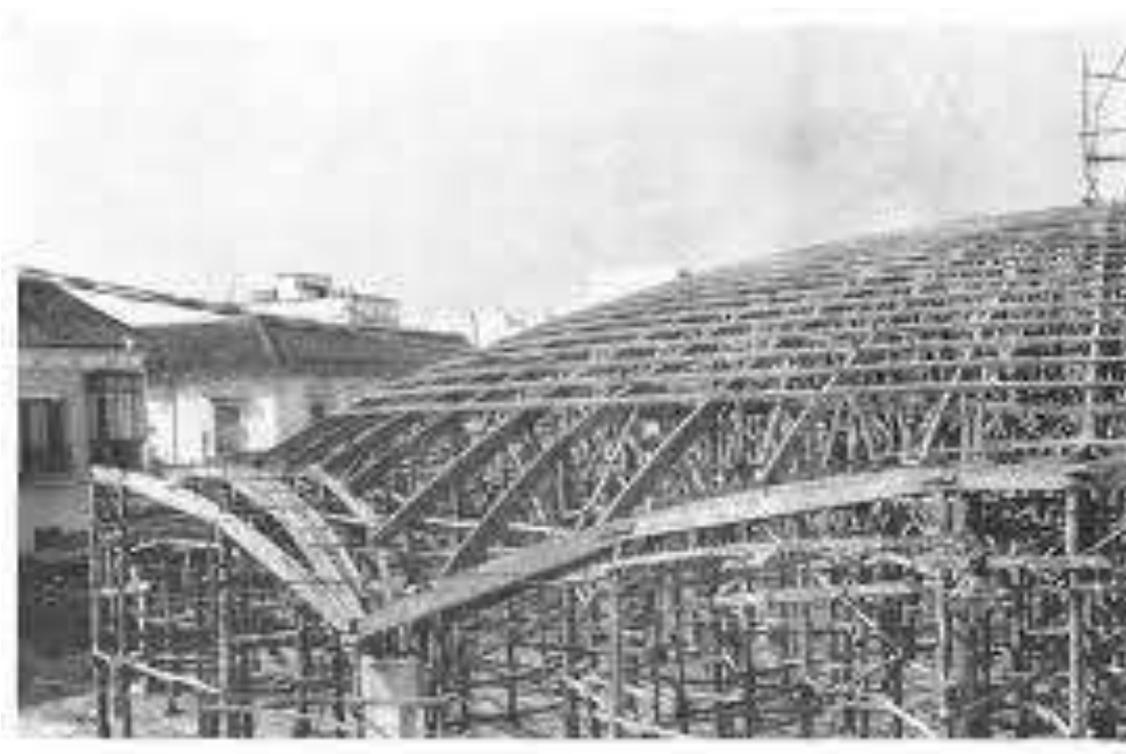
Imagen 8 Superficie de simple y doble curvatura

De esta manera es posible construir estructuras superficiales de grandes dimensiones y el espesor mínimo necesario para soportar las cargas a las que está sometida la estructura. Es el peso propio de la estructura el que define la geometría de la misma mediante el trazado de las fuerzas que genera, indicándonos dónde es necesario disponer material. Pero más allá del peso propio, la estructura debe responder a otras necesidades que suponen condicionantes en su diseño, como las cargas variables de viento, nieve o temperatura. El objetivo en estas estructuras es que trabajen a compresión todo lo posible pero habitualmente encontramos que los valores de compresión varían, disminuyendo desde los paralelos superiores hacia los inferiores, pudiendo estar los últimos sometidos a esfuerzos de tracción que hay que controlar para evitar que la cáscara se abra. En A menudo las láminas tienen un espesor variable que aumenta hacia los apoyos, debido a que estos inducen un momento en la estructura, y otros elementos que permiten compensar el empuje horizontal que pueda producirse en la base de la superficie, gracias a la flexibilidad formal que ofrece el material como decía

En la actualidad se siguen desarrollando estructuras laminares de hormigón armado y otros materiales tradicionales, aunque en menor medida. Cobran mayor protagonismo en la aplicación de este concepto estructural los materiales textiles y poliméricos que han ido evolucionando en los últimos años, optimizando sus características resistentes y su respuesta a las adversidades atmosféricas.

En estas estructuras, que se asemejan más a la manera en que transmite los esfuerzos una membrana, el pretensado se ha vuelto fundamental debido a su nula rigidez a flexión, siendo de gran importancia el estudio de los patrones de corte del material textil ya que

La dificultad para construir superficies curvadas con hormigón armado reside en el encofrado. Construir con este material implica la necesidad de construir una cimbra que moldeé el hormigón con la forma deseada y sea capaz de resistir los empujes que éste ejerce hasta su fraguado, similar a un líquido. Así las grandes ventajas económicas que ofrece el hormigón armado para la construcción de estos tipos estructurales están limitadas por lo costosa o compleja que pueda resultar la realización del encofrado.



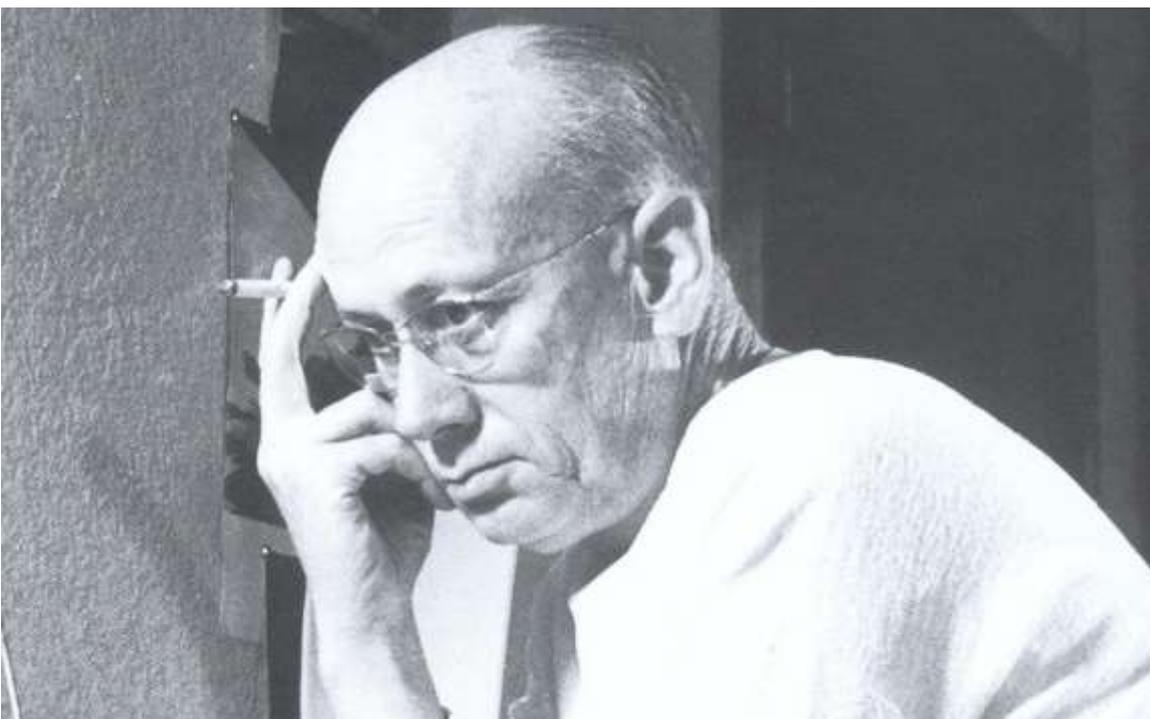
*Imagen 9 Encofrado del
Mercado de Algeciras*

Eduardo Torroja: Figura del desarrollo de las estructuras laminares

Eduardo Torroja Miret nació en Madrid en 1899, fue un destacado ingeniero civil, proyectista, científico, investigador y docente que hizo contribuciones significativas al campo de la ingeniería estructural y la construcción. Fue pionero en el desarrollo de las estructuras laminares y en el uso del hormigón armado y pretensado.

Hijo de Eduardo Torroja Caballé, arquitecto y matemático, continuó la tradición científica de la familia licenciándose como ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en la Escuela Especial de Madrid, en 1923. Contrajo matrimonio con Carmen Cavanillas Prosper en 1926, con quien tuvo cuatro hijos, entre ellos José Antonio Torroja Cavanillas, Ingeniero de caminos también.

Su pensamiento se caracterizó por una profunda comprensión de la relación entre la forma, la función y la ingeniería, su innovación en el uso de materiales y su búsqueda de soluciones estructurales simples y eficientes. Puso la técnica al servicio de la imaginación, llevando al límite las posibilidades constructivas de la época mediante un profundo entendimiento de las formas geométricas y su papel en las estructuras. Para



*Imagen 10 Eduardo
Torroja Miret*

Introducción

Origen de las estructuras
laminaresFuncionamiento de la
estructura laminar**Eduardo Torroja: Figura
del desarrollo de las
estructuras laminares**

En su libro “Razón y ser de los tipos estructurales” plasmó parte de su amplio conocimiento teórico, pero sobre todo indagó en la importancia de la intuición en el proceso de diseño estructural, buscando siempre la respuesta más natural y eficaz a las necesidades de cada proyecto. Sus obras esconden siempre una profunda reflexión que aúna arte con técnica ofreciendo un resultado aparentemente sencillo, con una geometría liviana y grácil que responde con gran eficacia a las funciones necesarias. Siempre impresionan con su volumen y dimensiones, pero las geometrías tan puras y limpias que emplea se vuelven cada vez más complejas a medida que te adentras en la comprensión de su funcionamiento y concepción, entendiendo a cada paso que no hay un solo elemento dejado al azar, que todo en su obra tiene razón de ser.

Entre sus grandes obras se puede destacar el Hipódromo de la Zarzuela, el frontón de Recoletos, ambos ubicados en Madrid, o el Mercado de abastos de Algeciras, en Cádiz, que consta de una gran cúpula construida también en hormigón, dejando constancia del amplio conocimiento y capacidad de análisis que tenía el ingeniero en el uso de este material y los fenómenos tensionales que se producían en él, independientemente de la forma geométrica adquirida.



*Imagen 11 Exposición del
Museo Eduardo Torroja*



Imagen 12 Interior del Mercado de Algeciras

ESTADO DEL ARTE: MERCADO DE ALGECIRAS

- Contexto histórico del mercado de Algeciras
- Contexto constructivo del mercado
- Análisis arquitectónico y funcional

Contexto histórico del mercado de Algeciras

El mercado se ubica en Algeciras, ciudad perteneciente a la provincia de Cádiz. Ubicada en una pequeña bahía que lleva su nombre y se abre al estrecho de Gibraltar, Algeciras se encuentra en un enclave estratégico del Mediterráneo. Por ello, los romanos establecieron allí el primer asentamiento de la ciudad llamada “Iulia Traducta”, que fue abandonada y refundada por los árabo-bereberes bajo el nombre de Al-Ŷazīra al-Jadrā, que significa “Isla verde” y es de donde proviene el nombre actual. Los mismos árabes fueron quienes la destruyeron años después por no poder asegurar su posesión de la plaza ante los castellanos. Algeciras quedó prácticamente deshabitada hasta que, unos siglos después, una parte de los habitantes de Gibraltar se trasladaron a ella como consecuencia de la toma del peñón por parte de Inglaterra. Así resurgió esta ciudad que supuso un importante puerto comercial debido a su ubicación privilegiada en la costa del Mediterráneo.

Debido a la importante actividad comercial de la ciudad emergían en ella numerosos locales destinados al comercio de distintos productos vinculados a la costa por el transporte marítimo y la actividad pesquera. Esto agrupaba los espacios de comercio en las proximidades del puerto, en el que se emplazaba la pescadería, que suponía uno de los puntos principales para el desarrollo de la actividad. El crecimiento y desarrollo de la ciudad hicieron imprescindible la evolución de estos espacios hacia el siglo XIX, planteando la necesidad de construir un mercado de abastos, que finalmente se ubicó en la Plaza baja, que pasó a llamarse Plaza de Nuestra Señora de la Palma, enclave del actual edificio del mercado.

La configuración del mercado proyectado en 1822 consistía en la distribución de los puestos de venta en el perímetro de la plaza, algunos de carácter permanente construidos con mampostería, y otros que iban surgiendo en distintos puntos del espacio central que quedaba liberado, con carácter temporal, pero que impedían el correcto funcionamiento del espacio para las tareas del comercio.

Contexto histórico del mercado de Algeciras

Contexto constructivo del mercado

Análisis arquitectónico y funcional



Imagen 13 Vista de Algeciras desde el mar

**Contexto histórico del
mercado de Algeciras**

Contexto constructivo del
mercado

Análisis arquitectónico y
funcional



*Imagen 14 Vista aérea de
Algeciras*

Hacia 1862 el mercado se transformaba en un local de planta cuadrangular en el que los puestos se organizaban por galerías, durante los años posteriores sufrió pequeñas remodelaciones, ampliaciones y reparaciones, la última en 1930 para, finalmente ceder su ubicación al actual Mercado Ingeniero Torroja tres años después.

Este nuevo edificio ocupaba el centro de la plaza con una planta octogonal que, insertada en el perímetro más o menos rectangular de la plaza, dejaba algunos espacios libres en la misma donde podían ubicarse los puestos temporales en los días de mercado, ampliando así el número de puestos fijos con los que cuenta el mercado.



*Imagen 15 Puestos exteriores
del Mercado de Algeciras*

Contexto constructivo del mercado

Desde principios del siglo XX se emplean las láminas de hormigón armado para la construcción de cubiertas en Francia y Alemania, explicando el comportamiento de este tipo estructural en trabajos y conferencias de ingeniería, sobre todo a partir de los años veinte.

El primer proyecto basado en una estructura laminar de hormigón que se construyó fue la cúpula de la fábrica Schott de Jena en 1924, con una luz de 40,00 m y 6 cm de espesor. En la memoria del proyecto del mercado, Eduardo Torroja hace referencia a dicha cúpula, ya que los ingenieros y arquitectos españoles tenían acceso al estudio del análisis estructural de esta tipología que estaba teniendo lugar en otros países. Aun así, la construcción del mercado de Algeciras introdujo algunas novedades en las estructuras laminares de la época y fue el primer edificio de estas características construido en España.

Los avances constructivos y estructurales que se desarrollaban en la época planteaban que los mejores sistemas para cubrir grandes luces eran las superficies de simple o doble curvatura que empezaban a extenderse en el campo de la ingeniería gracias al desarrollo de las estructuras laminares de hormigón armado, material que había ganado protagonismo en los últimos años debido a su alta resistencia, su flexibilidad constructiva y bajo coste.

Se buscaba reducir al máximo el espesor de las láminas estructurales con el objetivo de hacer despreciables los esfuerzos de flexión que se producen en ella y obtener así un elemento lo más parecido a una membrana rígida.

Contexto histórico del
mercado de Algeciras

**Contexto constructivo del
mercado**

Análisis arquitectónico y
funcional



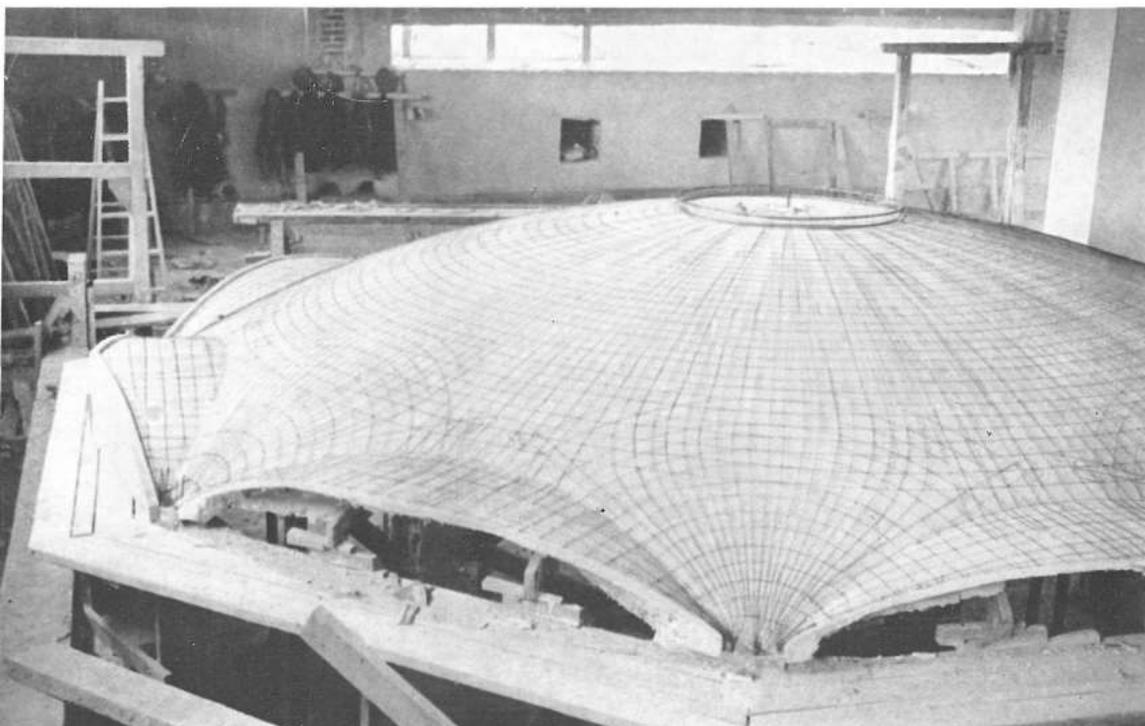
*Imagen 16 Construcción de la
cúpula de Jena*

Contexto constructivo del mercado

En España la investigación en la construcción estaba ligada a la obra civil desde finales del S.XIX y a principios del S.XX, cuando ingenieros como Eduardo Torroja tomaron la iniciativa.

Este equipo de ingenieros comprendía que hacía Falta en España una investigación técnica que se llevara a la práctica, además de la teórica, y aprovechando el impulso de la construcción de la ciudad universitaria de Madrid en los años 30, formaron ese grupo con la finalidad de realizar esa investigación y difundir el conocimiento adquirido mediante conferencias, seminarios y artículos, mejorando así las técnicas constructivas del país. Durante esa época aparecen revistas como la de "Hormigón y acero" que trataban de divulgar los avances técnicos y científicos que se estaban dando como resultado del impulso que tuvo la investigación científica durante el periodo de entreguerras.

El mercado surge en un momento de auge en las técnicas constructivas, no solo del país, si no, también en el resto de Europa. Nace de un profundo conocimiento de la técnica de la época y de la investigación de las obras e innovaciones que se estaban llevando a cabo en otros países. Eduardo Torroja se interesa por las novedades introducidas en el mundo de la construcción, las estudia en profundidad y las lleva al límite, aportando construcciones únicas y completamente novedosas, como es el caso del Mercado.



*Imagen 17 Maqueta del Mercado
de Algeciras*

Análisis arquitectónico y funcional

El proyecto planteado por Eduardo Torroja y Manuel Sánchez consiste en un espacio diáfano, sin apoyos intermedios, que permite la libre configuración de los puestos de venta en el interior. El espacio queda delimitado por un perímetro octogonal de 18,20 m de lado, inscrito en una circunferencia de 23,88 m de radio, la forma octogonal permite disponer de cuatro entradas enfrentadas dos a dos en dos calles perpendiculares que facilitan el acceso al recinto desde todos los puntos de la plaza, así como liberar espacio en dicha plaza mediante los “chaflanes” que conforman los lados del octógono hacia las esquinas de la plaza, de forma más o menos cuadrada.

La distribución de los puestos de venta en el interior del mercado se organiza en tres anillos concéntricos, uno ubicado en el perímetro del octógono con 36 puestos fijos y otros 64 puestos móviles que se proyectan en dos anillos ubicados en el centro del mercado. Esta distribución permite la circulación por dos calles circulares y otras dos perpendiculares, de manera que pueda accederse cómodamente a todos los locales de venta. En el centro de la plaza se ubica una fuente, coincidente con el lucernario ubicado en la parte alta de la cúpula que cubre todo el espacio.

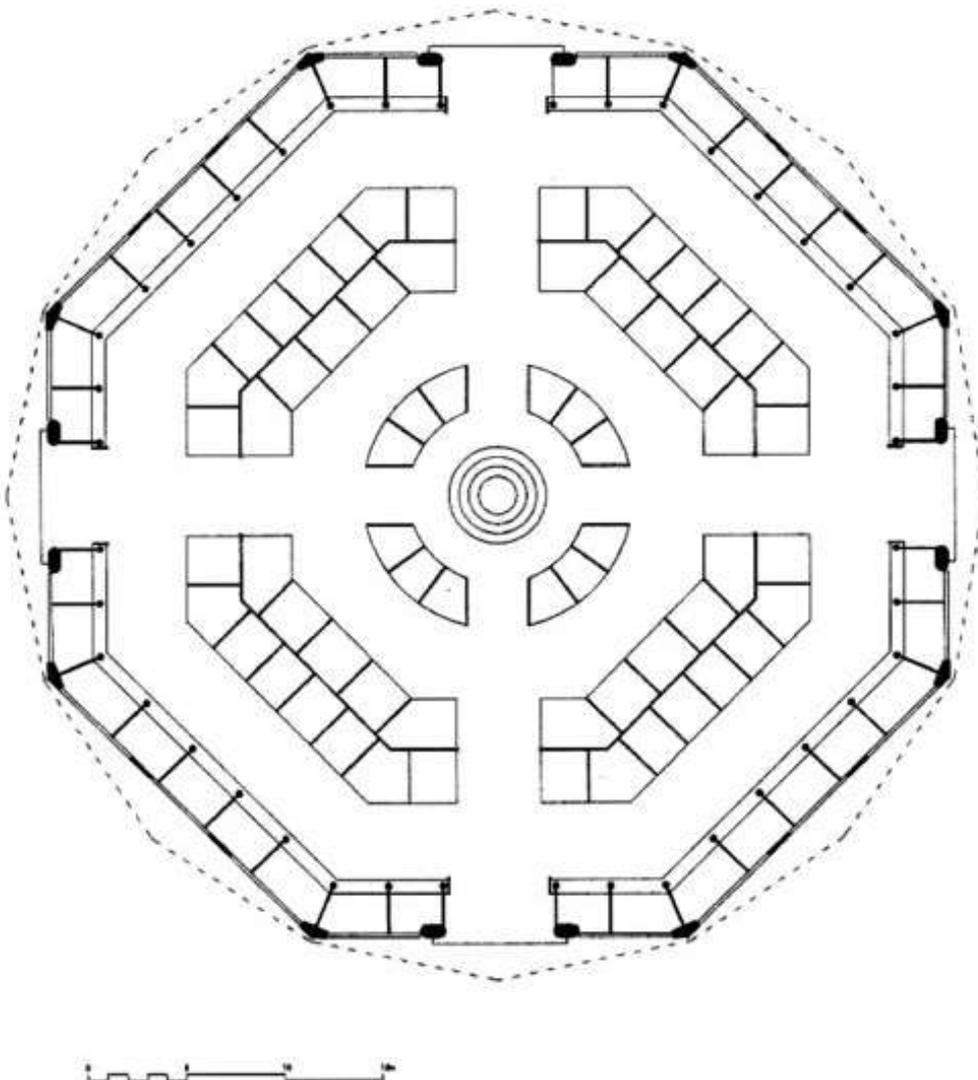


Imagen 18 Planta del Mercado de Algeciras

Contexto histórico del
mercado de Algeciras

Contexto constructivo
del mercado

Análisis arquitectónico y funcional

La cubierta proyectada es una cúpula de hormigón armado de 6 cm de espesor que aumenta hasta 50 cm hacia los apoyos, los cuales se sitúan en los ocho vértices del octógono inscrito en la circunferencia que delimita la cúpula. Dicha circunferencia se corta por la intersección de la cúpula con ocho segmentos de bóveda cilíndrica dispuestos en voladizo que van de soporte a soporte y sirven para cubrir los accesos del mercado. En la parte central de la cúpula se construye un lucernario mediante una estructura de triángulos prefabricados de hormigón armado que sirven para apoyar los vidrios que permiten el paso de luz natural al interior del mercado.

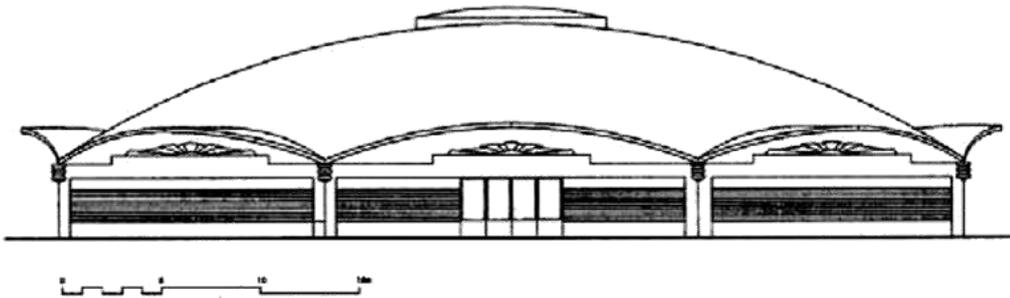


Imagen 19 Alzado del Mercado
de Algeciras

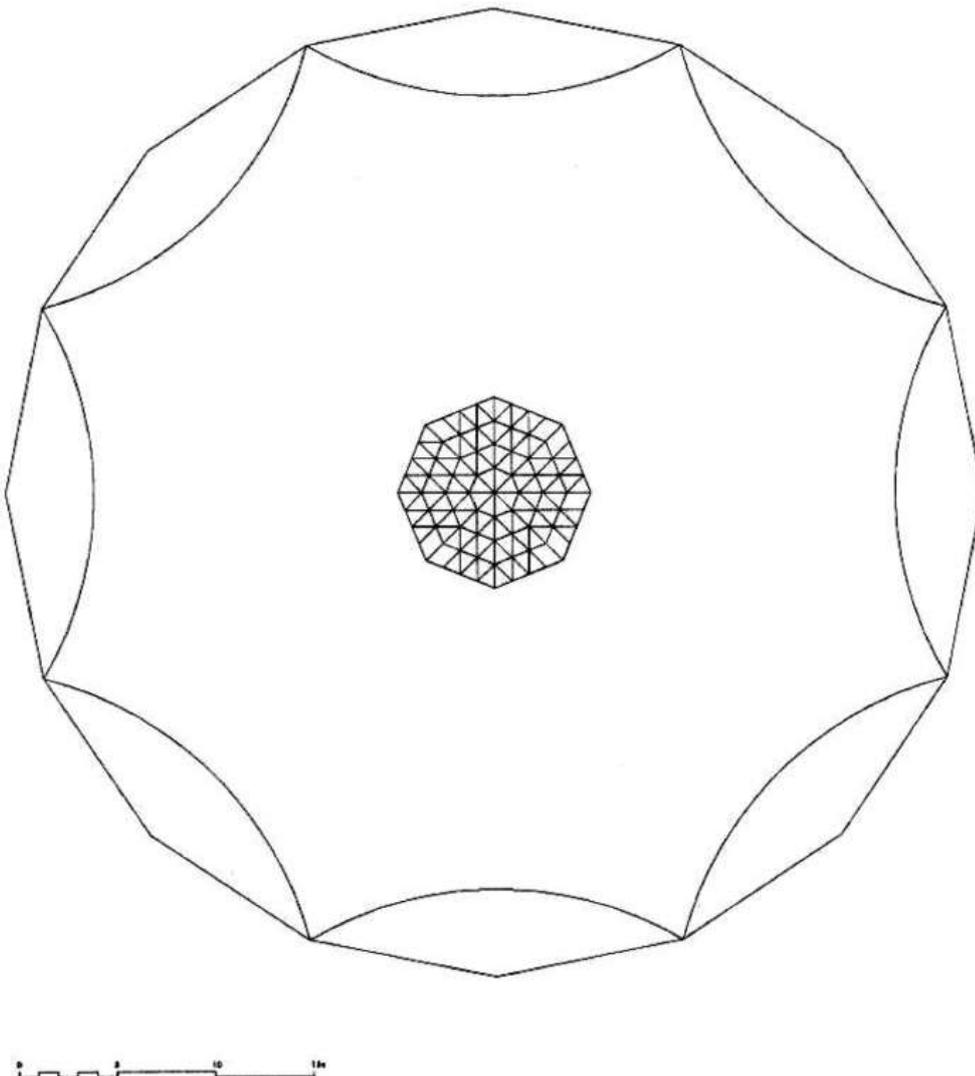


Imagen 20 Planta de cubiertas
del Mercado de Algeciras



*Imagen 21 Vista interior del
Lucernario del Mercado de
Algeciras*

ESTRUCTURA DEL MERCADO

- Características geométricas
- Materialidad y construcción
- Comportamiento estructural
- Planteamiento de variables geométricas

Características geométricas

El elemento principal del proyecto es la cúpula que cubre el espacio del mercado, es lo que dota al edificio de su imagen característica y permite salvar una gran luz sin necesidad de apoyos intermedios. El paso de la forma circular de la cúpula al perímetro octogonal de la planta del edificio se realiza mediante la intersección de ocho secciones de bóveda cilíndrica en voladizo que conforman el perímetro de la cúpula mediante ocho arcos que unen los pilares que soportan la cubierta haciendo que el conjunto de elementos geométricos que la conforma parezca un cascarón compacto depositado sobre los pilares, casi como si flotara. En un sentido formal, el resto de la estructura la componen ocho pilares unidos por ocho vigas bajo las que se dispone el cerramiento, el cual no tiene carácter estructural.

Características geométricas

Materialidad y construcción

Comportamiento estructural

Planteamiento de variables geométricas

La cúpula es un casquete esférico delimitado por dos anillos. El anillo inferior sirve para atar las cabezas de los pilares en los que se apoya la cubierta y compensar los esfuerzos de tracción que se producen en la parte baja de la cúpula. Superiormente la lámina se limita por un anillo de 9, m de diámetro que sirve de base para apoyar los triángulos de hormigón prefabricado que sostienen los vidrios que conforman el lucernario central.



Imagen 22 Vista interior del Mercado de Algeciras

Materialidad y construcción

El material principal empleado en el mercado de abastos es el hormigón armado, presente en la estructura compuesta por la cúpula y los pilares, para las vigas que zunchan las cabezas de los pilares se emplea hormigón postesado con redondos de 30 mm. Para el lucernario se emplean piezas de hormigón prefabricado que hacen de subestructura para la colocación del vidrio. Los lados del octógono se cierran con muro de ladrillo visto hasta la altura de las vigas que conforman el anillo inferior de atado de la cúpula, mientras que entre estas vigas y el arco formado por la intersección de la cúpula con las bóvedas en voladizo se dispone una celosía metálica que deja pasar el aire favoreciendo la ventilación del mercado.

Se quiso emplear el material al natural, aplicando tan solo una capa de pintura para algunos elementos, de manera que los únicos revestimientos que se emplean en el mercado son para los puestos de venta. El azulejo fue el material empleado para revestir los paramentos de los puestos fijos, y la piedra artificial para los mostradores. El pavimento de las zonas de circulación interior era igual que el de la plaza, dando continuidad al espacio y favoreciendo el carácter abierto y permeable del edificio. Por el mismo motivo los cuatro accesos no tienen un elemento de cierre, quedando el mercado abierto de manera permanente ya que los vendedores recogían todo al terminar la jornada, facilitando también las tareas de limpieza. La materialidad empleada mejora técnica y estéticamente el conjunto

Características
geométricas

**Materialidad y
construcción**

Comportamiento
estructural

Planteamiento de
variables geométricas

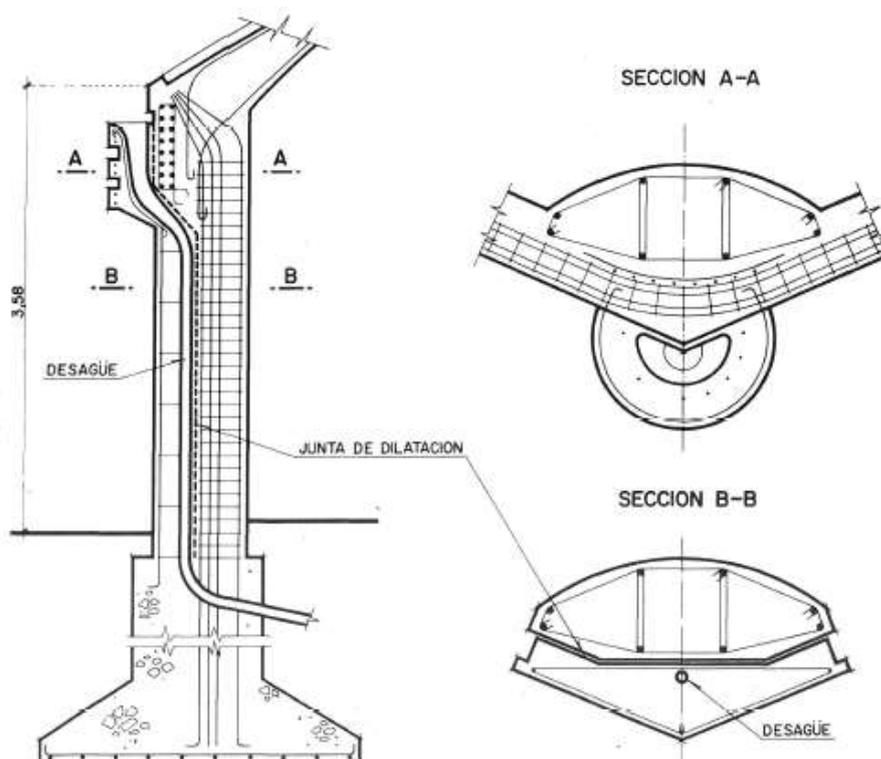


Imagen 23 Detalle constructivo de los pilares del Mercado de Algieras

Comportamiento estructural

La cubierta está sometida mayormente a esfuerzos de compresión que tienen su máximo valor en la coronación y disminuyen hacia los apoyos apareciendo tracciones en la zona baja del cascarón. Las bóvedas en voladizo rigidizan la cúpula y contribuyen a redirigir los haces de isostáticas hacia los pilares, que están arriostrados en su extremo superior por las vigas situadas bajo los voladizos. Estas vigas conforman un anillo octogonal de hormigón postesado con 16 redondos de 30 mm que compensa las tracciones de la cúpula comprimiendo su perímetro inferior, lo que produce un ligero levantamiento de la cúpula que la despega del encofrado y contribuye a que la cúpula funcione como una lámina según explica

Características
geométricas

Materialidad y
construcción

**Comportamiento
estructural**

Planteamiento de
variables geométricas

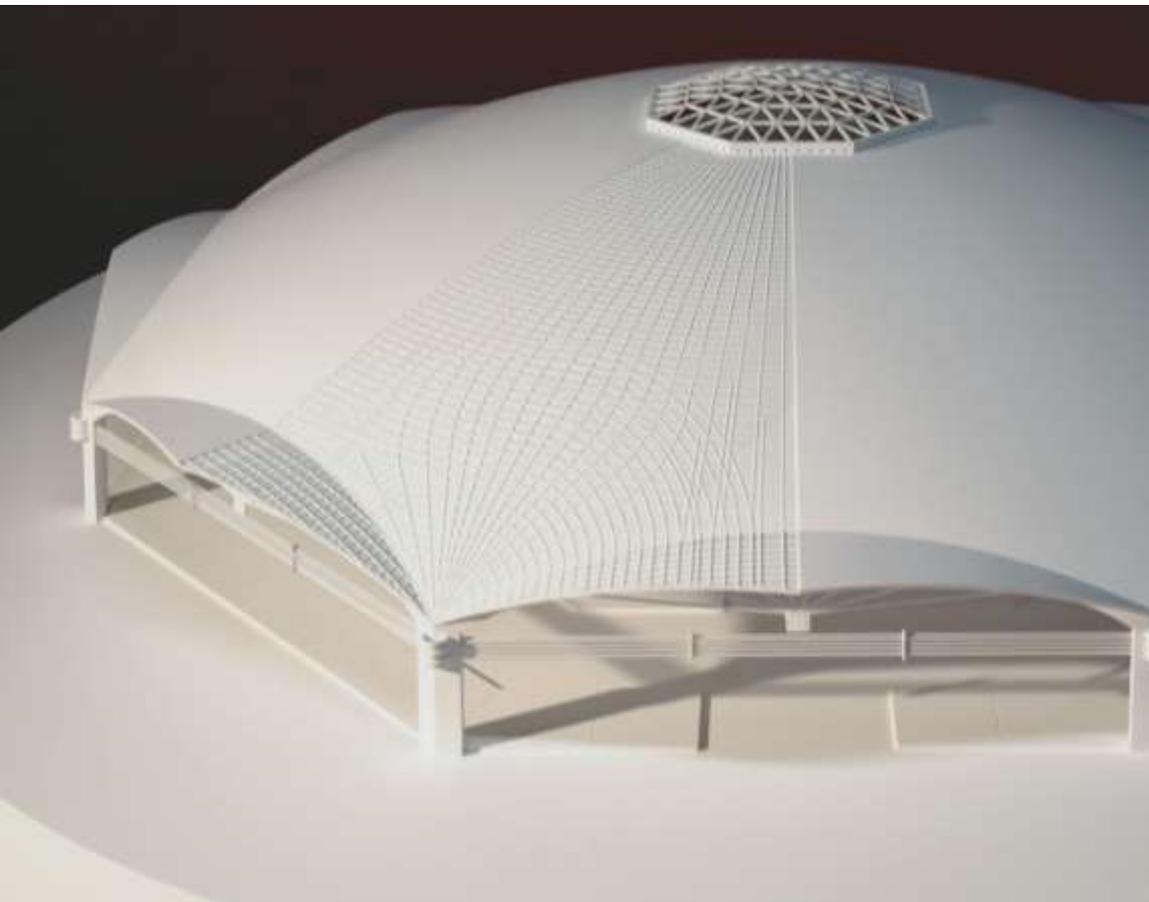


Imagen 24 Maqueta del Mercado para la exposición del Museo Eduardo Torroja

En la parte superior, la cúpula está limitada por un anillo refuerzo inscrito en una circunferencia de 9 m de diámetro. Este anillo dibuja el perímetro del lucernario central y sirve de apoyo a las piezas prefabricadas de hormigón armado que conforman la celosía del mismo, transmitiendo las cargas del lucernario a la cúpula.

Características geométricas

Materialidad y construcción

Comportamiento estructural

Planteamiento de variables geométricas

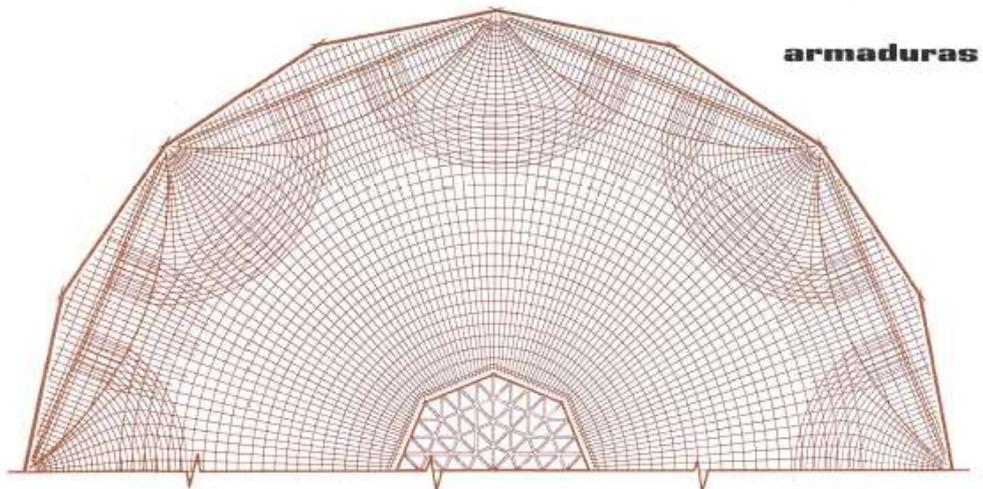
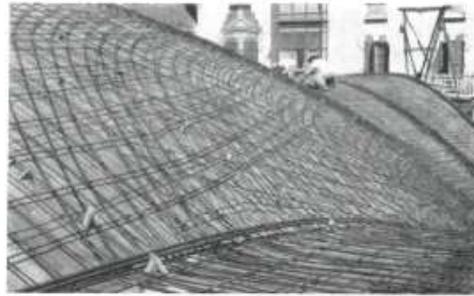
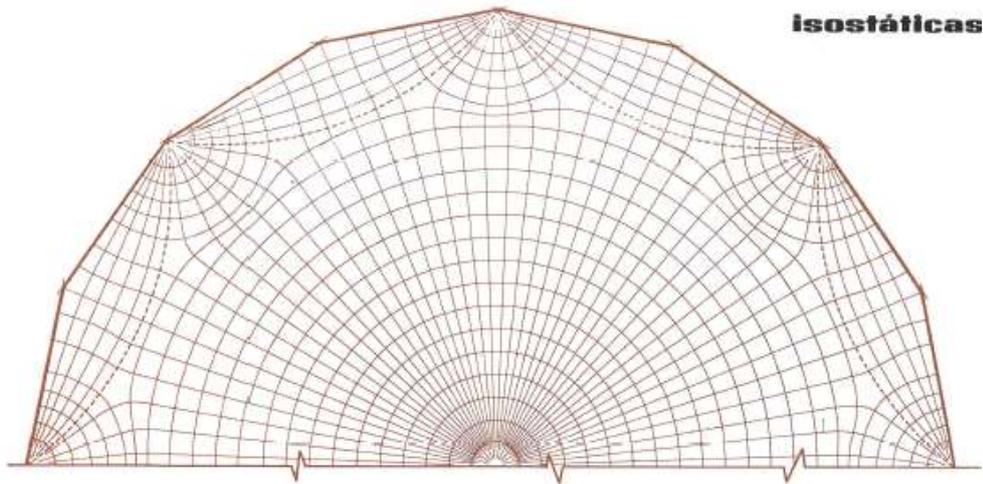


Imagen 25 Armaduras de la cúpula del Mercado de Algeciras

La armadura se dispone siguiendo las isostáticas de tracción, prolongándose en los voladizos para garantizar el comportamiento conjunto de los elementos. Es la forma geométrica de la estructura la que determina la disposición de los materiales resistentes, aprovechando al máximo sus capacidades y ofreciendo la solución más eficiente, como

Planteamiento de variables geométricas

El mercado de Algeciras se compone de varios elementos que influyen en la manera en que trabaja su estructura, modificando su comportamiento para favorecer la estabilidad del conjunto. La geometría es un aspecto fundamental en las estructuras laminares, ya que influye directamente en la manera en que ésta se comporta. Estudiamos distintas posibilidades formales partiendo de las dimensiones y curvatura de la cúpula del mercado para comprender cómo varía la estructura al modificar su geometría, a igualdad de materialidad y solicitaciones.

Características geométricas

Materialidad y construcción

Comportamiento estructural

Planteamiento de variables geométricas

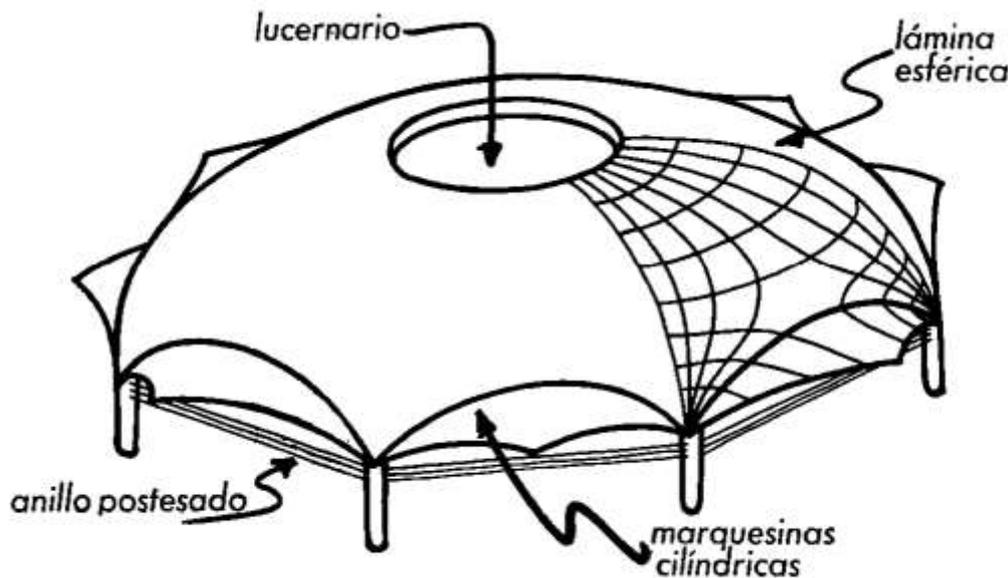
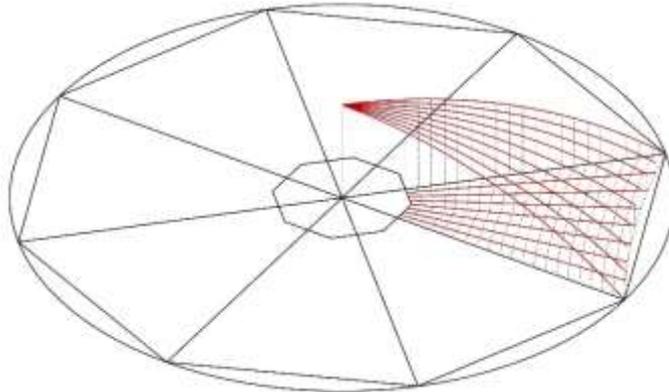


Imagen 26 Esquema del Mercado de Algeciras

Para ello se realizan varios modelados 3D con el programa Rhinoceros 7, que completaremos con AutoCAD 2021 y, a continuación, exportaremos y analizaremos con el programa SAP2000 25. El programa de cálculo emplea el método de los elementos finitos, para ello necesitamos dividir la superficie de la cubierta en elementos de menor tamaño que estén interconectados, en la zona donde cambia la sección se usa un mayor número de elementos de pequeño tamaño para minimizar los errores del MEF. Los elementos se unen en los vértices compatibilizando sus deformaciones. El análisis se hará considerando la normativa actual del código estructural 21 empleando los materiales más parecidos a los que utilizó Eduardo Torroja, de entre los que la normativa admita y el programa disponga, alterando si es necesario algunas de sus propiedades.

Las cargas aplicadas serán las correspondientes al peso propio de la estructura, se trata de la carga más determinante ya que es una estructura pesada de hormigón armado. El programa SAP2000 introduce esta carga de manera automática en función del peso específico y el volumen. El peso específico considerado es de 2500 kg/m³ y para el volumen hemos tratado de ajustarnos todo lo posible a las dimensiones y volumetría del edificio real y el espesor lo plantearemos uniforme en las hipótesis de los primeros modelos y, posteriormente, se modeliza con espesor variable para aproximarnos al máximo a la realidad.

Para la modelización de la estructura se trazan las líneas principales del edificio a partir de los planos, dibujamos el octógono que define el perímetro del mercado, así como la circunferencia en la que este se inscribe y las diagonales que unen los pilares y nos permiten extraer una fracción, que será la proyección del octante en planta. La geometría que obtenemos en planta es un triángulo que dividiremos formando una retícula.



Características
geométricas

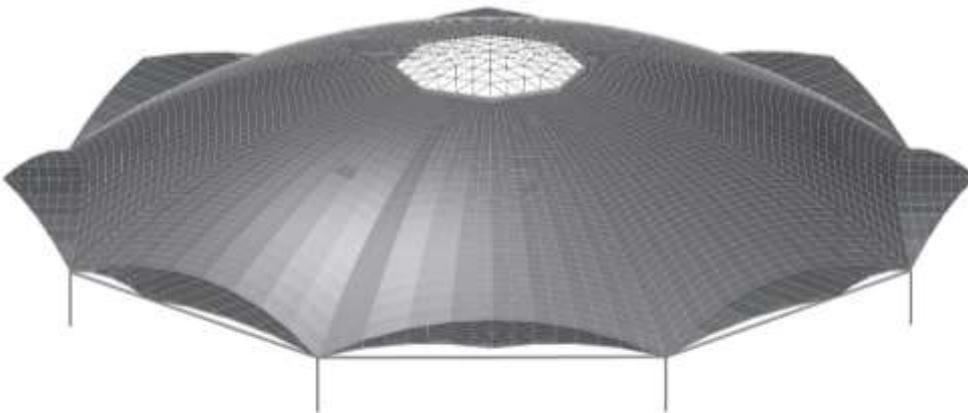
Materialidad y
construcción

Comportamiento
estructural

**Planteamiento de
variables geométricas**

*Imagen 28 Esquema de proceso
de modelado*

Del alzado obtenemos la línea curva que dibuja la cúpula, desde los apoyos hasta la coronación, rotamos esta curva al plano perpendicular a la planta del octante y lo copiamos en cada eje longitudinal de la retícula. Trazando una línea vertical desde cada punto en el que se intersecan los ejes de la retícula, hasta donde se encuentra con el arco rotado y obtenemos una nube de puntos que, uniéndolos, nos permite completar la superficie del octante mediante pequeñas superficies cuadradas o triangulares, interconectadas en todo su perímetro.



*Imagen 29 Modelo 3D del
Mercado de Algeciras*



*Imagen 27 Modelo 3D
renderizado del Mercado de
Algeciras*



Imagen 30 Fotografía antigua de la plaza del mercado de Algeciras

ANÁLISIS DE RESULTADOS

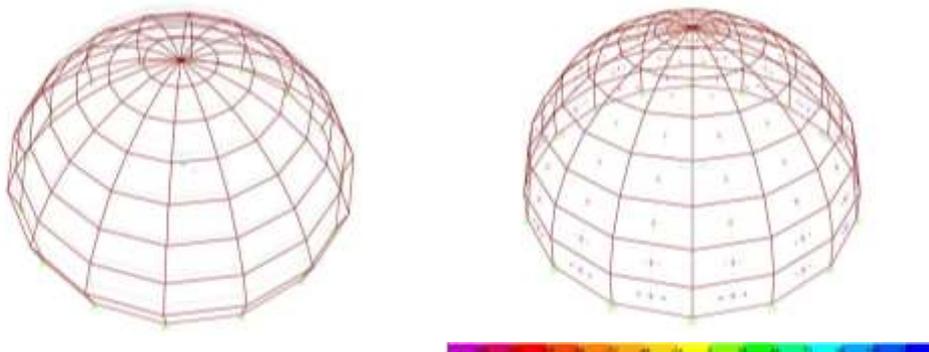
Cúpula semiesférica:

Para entender el comportamiento de una lámina se comienza estudiando cómo responde una cúpula semiesférica con el diámetro de la cúpula del mercado, de 47,8 m y un espesor medio de 30 cm. Aunque se parte de un modelo simplificado, permite introducir una serie de conceptos que se utilizarán más adelante.



Figura 31 (izq):
Deformada (N, mm, C)

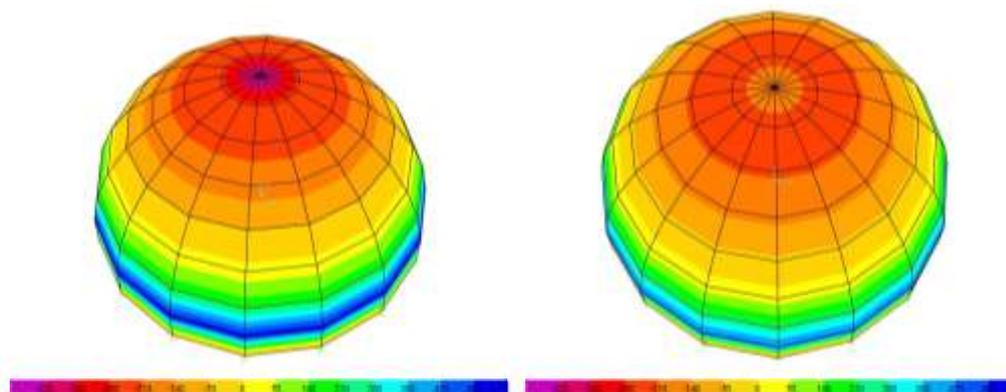
Figura 32 (dcha):
Tensión máxima (KN, m, C)



En el diagrama de esfuerzos máximos (Figura 31) se puede observar que la cúpula está comprimida hasta la mitad de su altura y desde ahí hasta el anillo más próximo a la base sufre esfuerzos de tracción. Esto se traduce en una deformación en la coronación en la dirección de Y, es decir, la cúpula se “aplata” en la zona central y se abre horizontalmente en la zona de los riñones.

Figura 33 (izq):
Tensión en la cara superior
en dirección de los
paralelos (N, mm, C)

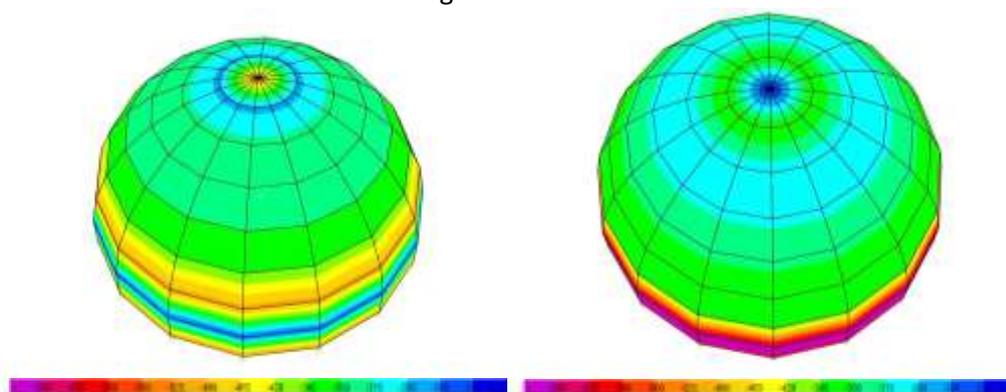
Figura 34 (dcha):
Tensión en la cara inferior
en dirección de los
paralelos (N, mm, C)



En el diagrama de tensiones en la dirección de los paralelos (Figura 33) podemos observar que las mayores compresiones se dan en la coronación y que las tracciones aparecen hacia el cuarto anillo que se sitúa a unos 6 m de altura desde la base, alcanzando el valor máximo en el segundo anillo.

Figura 35 (izq):
Tensión en la cara superior
en dirección de los
meridianos (N, mm, C)

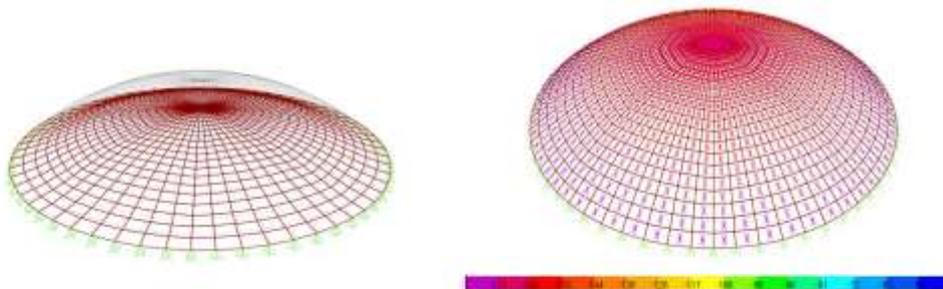
Figura 36 (dcha):
Tensión en la cara inferior
en dirección de los
meridianos (N, mm, C)



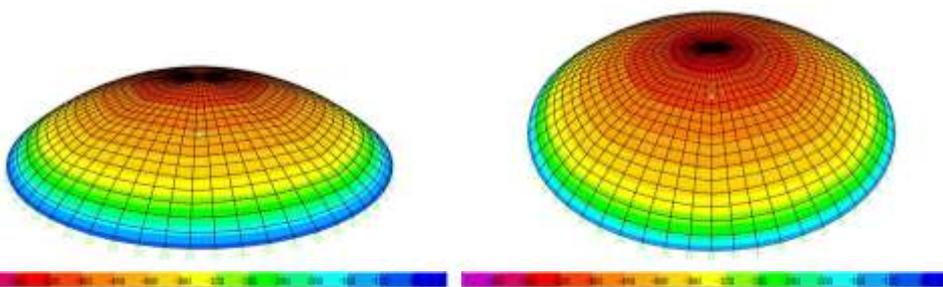
Los meridianos se encuentran completamente comprimidos. Dado que no se permite el desplazamiento horizontal, los apoyos actúan como un zuncho perfecto impidiendo la aparición de tracciones en el anillo inferior, con un empuje hacia el interior de la cúpula de 127.37 kN que permite entender la apertura de la lámina.

Cúpula rebajada:

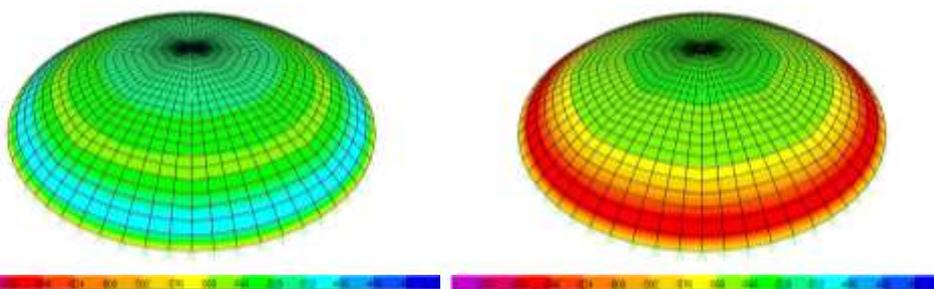
El segundo modelo se realiza con el diámetro perimetral y el radio de curvatura del mercado. Puede entenderse como un casquete esférico resultante de extraer del modelo anterior la parte de la cúpula que se encuentra completamente comprimida, que se corresponde con el modelo que empleó Torroja en el dimensionamiento.



Las tensiones obtenidas son de compresión en la totalidad de la superficie, sin embargo, observamos que la deformación en la parte superior aumenta (Figura 37) con respecto al modelo anterior, debido a la total compresión del elemento.



En la distribución de tensiones vemos que el elemento está mucho más comprimido en su totalidad que el anterior, lo que justifica la deformación de la clave. En la dirección de los paralelos se observan importantes tensiones de compresión, tanto en la cara superior como en la inferior.



Al igual que en los paralelos, en los meridianos solo se encuentran fuerzas de compresión en ambas caras con un valor máximo de 171,59 kN. Las tensiones de compresión obtenidas son muy pequeñas en comparación con la resistencia a compresión del hormigón, con valores que no superan los 0.7 MPa. Las reacciones en los apoyos varían respecto del anterior modelo, aumentando considerablemente la fuerza horizontal que se necesita para compensar el empuje que ejerce la cúpula como consecuencia de su perfil rebajado, con un valor de 325.39 kN respecto de los 127.37 kN de la cúpula anterior.

Este es un modelo más refinado donde el aumento en el número de apoyos contribuye a mejorar el comportamiento al repartirse la carga de forma más uniforme mejorando el efecto de zunchando. Es decir, al reducir el número de puntos de apoyo como ocurre cuando se apoyan láminas en pocos puntos el comportamiento de la lámina puede empeorar.

Cúpula con hueco de lucernario y arco de marquesina:

Sobre el modelo anterior se introducen los huecos correspondientes al lucernario de la coronación y al arco de descarga que se genera por la intersección de las marquesinas, pasando del apoyo total de la base de la cúpula, a 8 apoyos puntuales.

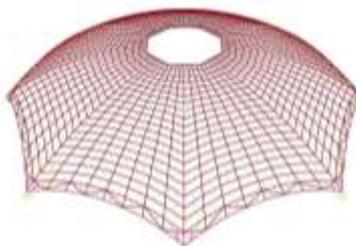
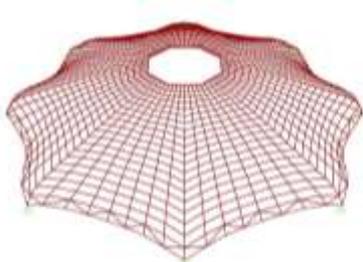


Figura 43 (izq):
Deformada (KN, m, C)

Figura 44 (dcha):
Tensión máxima (KN, m, C)

Se aprecian deformaciones significativas que se concentran entorno a los apoyos (Figura 43) como consecuencia de las flexiones secundarias que se generan en los arcos que los unen, dichas flexiones se deben a que se concentra la carga en ocho apoyos puntuales en lugar de distribuirla como en el modelo anterior, produciendo una modificación significativa en el comportamiento global de la estructura. El hueco central, sin embargo, no supone un cambio significativo en el comportamiento de la cúpula, al situarse en la zona de los paralelos comprimidos.

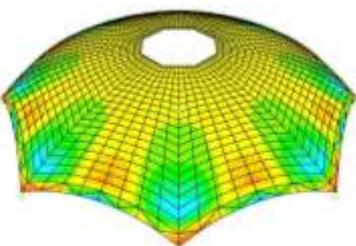
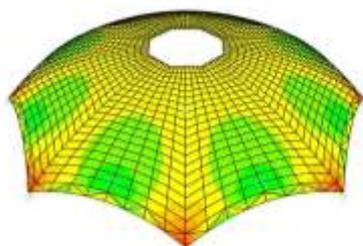


Figura 45 (izq):
Tensión en la cara superior
en dirección de los
paralelos (KN, m, C)

Figura 46 (dcha):
Tensión en la cara inferior
en dirección de los
paralelos (KN, m, C)

En la dirección de los paralelos aparecen tensiones de tracción, especialmente en la cara inferior (Figura 46) de las zonas de apertura de los arcos. La zona entorno al hueco del lucernario está casi totalmente comprimida, aunque aparecen pequeñas tensiones de tracción, aunque no afectan al equilibrio global de la estructura.

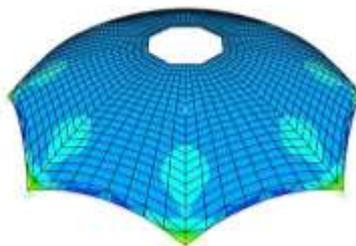
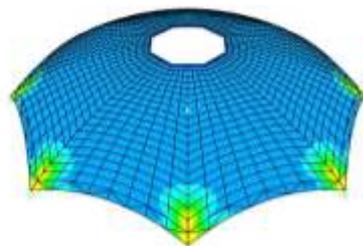


Figura 47 (izq):
Tensión en la cara superior
en dirección de los
meridianos (KN, m, C)

Figura 48 (dcha):
Tensión en la cara inferior
en dirección de los
meridianos (KN, m, C)

En la zona de los meridianos la situación se ha modificado significativamente en relación a los esquemas anteriores y aparecen tracciones importantes en la cara inferior (Figura 48). Estas tracciones podrían compensarse variando el espesor de la cúpula para aumentarlo hacia los apoyos.

Cúpula con marquesinas:

En este cuarto modelo se introducen las secciones de bóveda cilíndrica que conforman las marquesinas en voladizo.

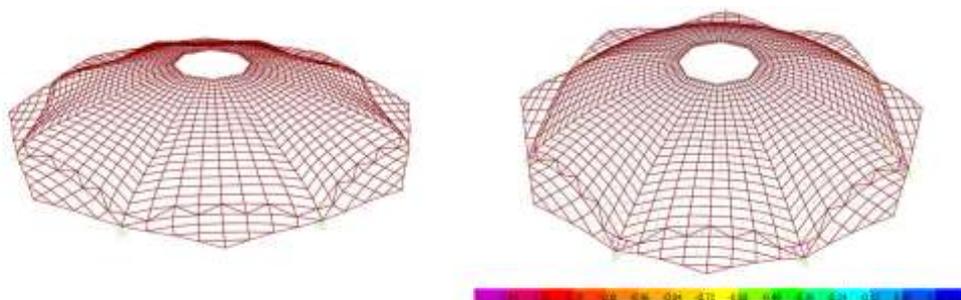


Figura 49 (izq):
Deformada (KN, m, C)

Figura 50 (dcha):
Tensión máxima (KN, m, C)

Aunque intuitivamente sería lógico pensar que las marquesinas contribuirán a rigidizar los arcos entre los apoyos, el análisis ofrece un resultado diferente, ya que sigue generándose una flexión muy grande en esa zona (Figura 50). Reduce la deformación vertical (Figura 49), aunque mínimamente, debido a que tracciona un poco más la zona, si bien la mayor rigidez podría contribuir a un mejor comportamiento al pandeo de la lámina.

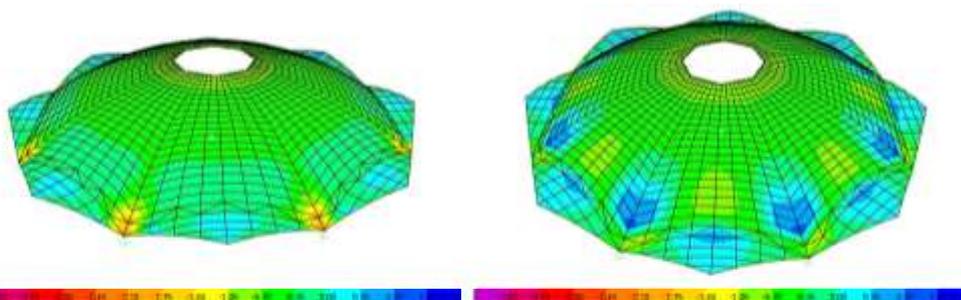


Figura 51 (izq):
Tensión en la cara superior
en dirección de los
paralelos (KN, m, C)

Figura 52 (dcha):
Tensión en la cara inferior
en dirección de los
paralelos (KN, m, C)

En la dirección de los paralelos seguimos teniendo compresiones, aunque empiezan aparecer tracciones en la cara inferior (Figura 52), que se concentran en la zona de los apoyos. También se obtienen esfuerzos de tracción en ambas caras en la zona de la marquesina debido a que cargas que bajan por los meridianos se redirigen hacia los apoyos provocando que este elemento trabaje a flexión.

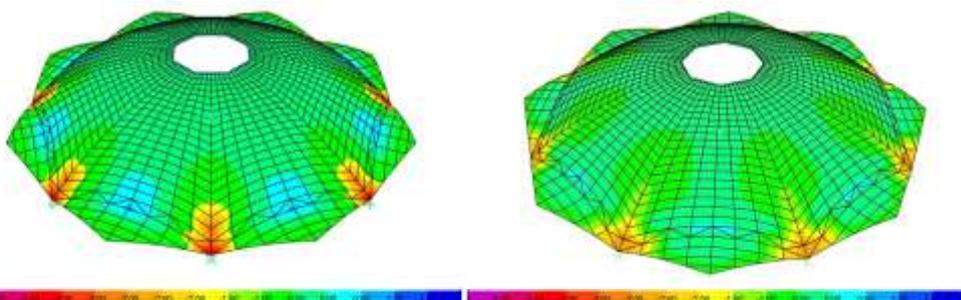


Figura 53 (izq):
Tensión en la cara superior
en dirección de los
meridianos (KN, m, C)

Figura 54 (dcha):
Tensión en la cara inferior
en dirección de los
meridianos (KN, m, C)

En la dirección de los meridianos empiezan a aparecer tracciones en la cara inferior (Figura 54) siendo necesario aumentar el canto para que las resultantes queden contenidas en el plano. Aunque aparecen pequeños esfuerzos de tracción en el contorno del lucernario, estos no afectan significativamente a la distribución de tensiones.

Cúpula con marquesinas y pilares.

Respecto del modelo anterior, en este se introducen los pilares, que se realizarán mediante empotramientos, en lugar de apoyos como en el resto de los casos. También se modifica el espesor de la cúpula, que va desde 9 cm en la zona superior hasta 50 cm en la base.

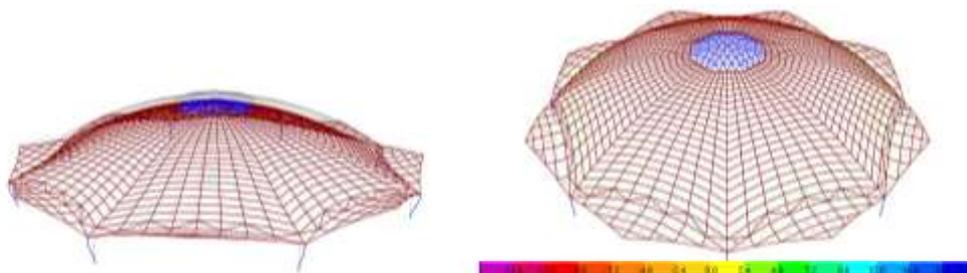


Figura 55 (izq):
Deformada (KN, m, C)

Figura 56 (dcha):
Tensión máxima (KN, m, C)

La introducción de los pilares altera de manera considerable el comportamiento de la estructura, la cúpula se deforma más que en los casos anteriores (Figura 55) debido a que el pilar acompaña esa deformación, permitiendo a la cubierta abrirse más en su parte baja.

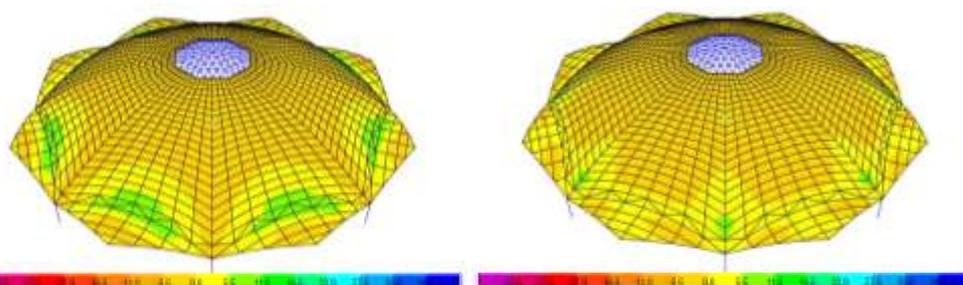


Figura 57 (izq):
Tensión en la cara superior
en dirección de los
paralelos (KN, m, C)

Figura 58 (dcha):
Tensión en la cara inferior
en dirección de los
paralelos (KN, m, C)

Las fuerzas de tracción en la zona de las marquesinas aumentan drásticamente, pasando de los 98 kN del modelo anterior a 2538 kN. Aunque el aumento de sección contribuye a reducir las zonas traccionadas, la zona entre los apoyos sigue teniendo fuertes tracciones en la cara superior (Figura 57) en la dirección de los paralelos.

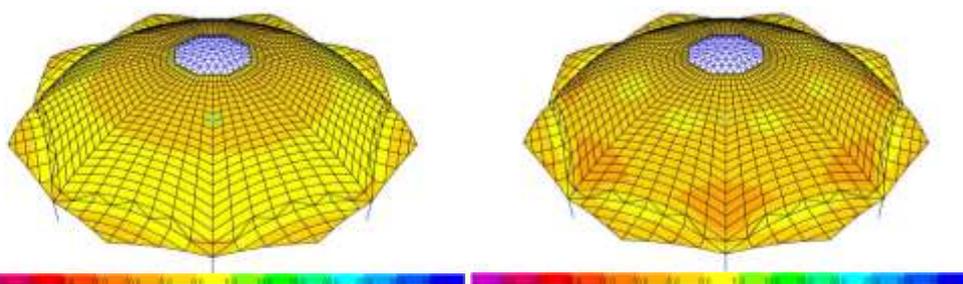


Figura 59 (izq):
Tensión en la cara superior
en dirección de los
meridianos (KN, m, C)

Figura 60 (dcha):
Tensión en la cara inferior
en dirección de los
meridianos (KN, m, C)

En la dirección de los meridianos aparecen tracciones que, aunque son de pequeña magnitud, tienen importancia por ocupar gran parte de la superficie de la cúpula.

En los pilares obtenemos un axil de compresión de 2573.48 kN y un cortante de 393.75 kN/m, que podría mejorarse arriostrándolos en su extremo superior.

Cúpula con marquesina, pilares y anillo postesado:

En el último modelo se introduce el anillo postesado que une las cabezas de los pilares. para determinar la fuerza de postesado del anillo se obtiene el cortante total en el pilar, que proviene del empuje de la cúpula, y se descompone en las fuerzas de tracción que habría que aplicar como tesado en el octógono.

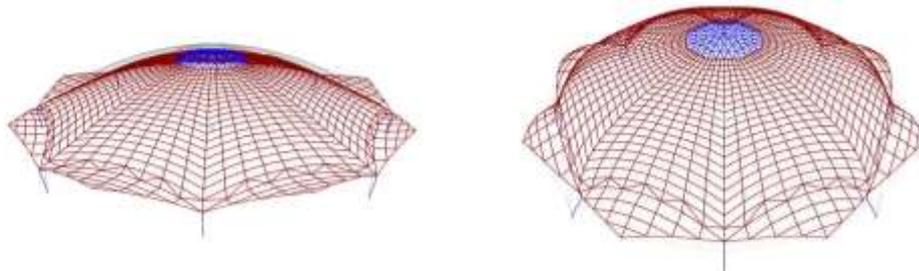


Figura 61 (izq):
Deformada (KN, m, C)

Figura 62 (dcha):
Tensión máxima (KN, m, C)

Se observa que la deformación produce un levantamiento de la cúpula y compensa la deformación horizontal que sufrían las cabezas de los pilares (Figura 61).

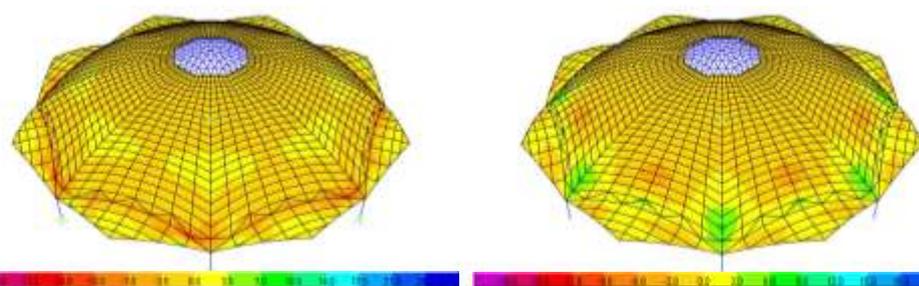


Figura 63 (izq):
Tensión en la cara superior
en dirección de los
paralelos (KN, m, C)

Figura 64 (dcha):
Tensión en la cara inferior
en dirección de los
paralelos (KN, m, C)

En la dirección de los paralelos, en la cara superior (Figura 63), se observa que disminuyen tanto las tensiones de tracción como las de compresión, aumentando las segundas en el encuentro con la marquesina. En la cara inferior (Figura 64), sin embargo, aumentan las tracciones en la zona de los apoyos y aparecen compresiones mayores sobre las marquesinas.

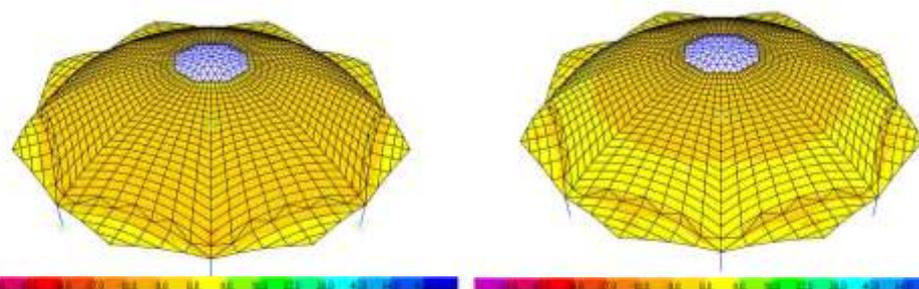


Figura 65 (izq):
Tensión en la cara superior
en dirección de los
meridianos (KN, m, C)

Figura 66 (dcha):
Tensión en la cara inferior
en dirección de los
meridianos (KN, m, C)

En la dirección de los meridianos la cúpula vuelve a estar mayormente comprimida con valores mínimos, las tensiones de compresión son lógicas en este tipo de estructuras.



Imagen 31 Alzado del mercado de Algeciras

CONCLUSIONES

Se empezó estudiando los conceptos básicos con los que se desarrolla el diseño de estructuras laminares de hormigón: el trazado de curvaturas que permitan contener los esfuerzos en su plano y su empleo para trazar superficies que permitan controlar la distribución de las cargas y la manera en que son transmitidas a los apoyos.

El siguiente paso fue comprender el pensamiento de Eduardo Torroja a través de sus principales obras, que permiten apreciar la importancia de la intuición y del dominio de la técnica y las formas geométricas.

A continuación, se indagó en el contexto histórico y constructivo en el que se enmarca el mercado de Algeciras, como paso previo para comprender las cuestiones que motivaron las decisiones que le otorgaron su forma final.

El estudio en profundidad de este edificio icónico comenzó con el análisis arquitectónico y funcional, así como de las características geométricas que le confieren su aspecto único. En él se aúnan técnica y arte para ofrecer la mejor solución a una necesidad, de acuerdo con la idea que tenía Torroja sobre la arquitectura.

A partir de ahí se desarrolló el análisis estructural del mercado como un proceso lineal en el que se estudió la influencia de cada elemento en el comportamiento global de la estructura ante su peso propio, que en trabajos posteriores puede completarse estudiando la respuesta de la estructura a sismo y pandeo.

Se parte de la cúpula elemental en forma de semiesfera perfecta, comprendiendo que la clave del funcionamiento de este tipo estructural reside en distribuir los esfuerzos entre los meridianos que actúan como arcos, pero superan su capacidad estructural al estar arriostrados por los paralelos. La resultante de fuerzas de un arco no queda contenida en el trazado en semicírculo, sino que genera tensiones horizontales que tienden a abrir el arco en su base. En la cúpula esto produce tracciones en los paralelos ubicados por debajo de los 52° , que tratan de contener el empuje horizontal que ejerce el arco meridiano.

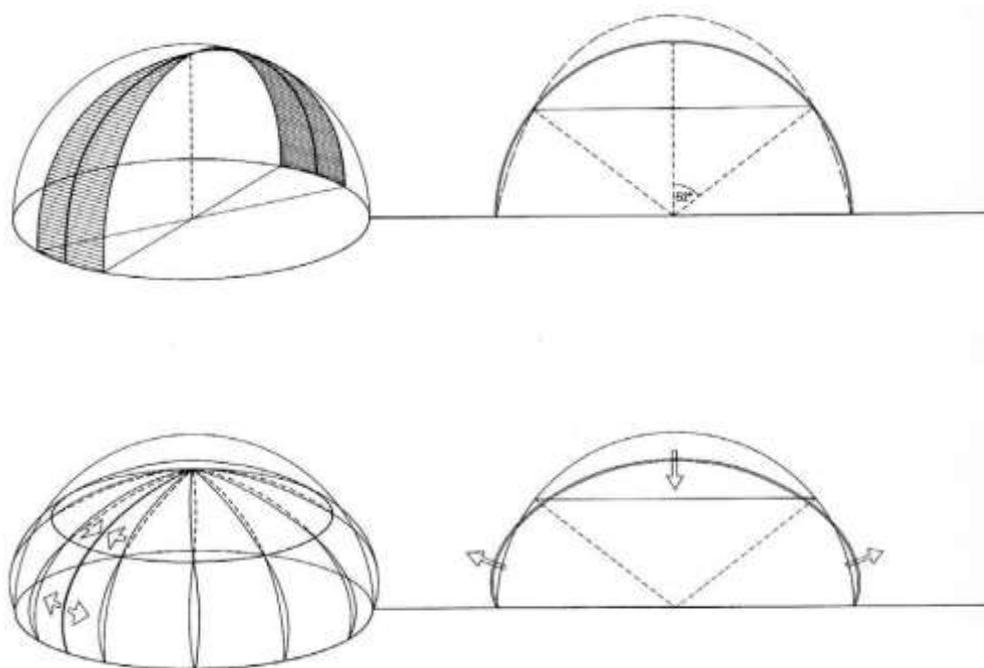


Imagen 32 Esquema funcionamiento de la cúpula

En las estructuras laminares el objetivo es diseñar un completamente comprimido, conteniendo los esfuerzos en la sección y evitando la flexión. Por lo tanto, resulta lógica la decisión de Torroja de construir una cúpula con la geometría del casquete esférico situado por encima de los 52º, es decir, empleando únicamente la parte de la cúpula semiesférica que está completamente comprimida.

La cúpula rebajada concentra los empujes horizontales en la base, el apoyo de la estructura en todo su perímetro hace de zunchos y contiene el elemento impidiendo que se abra. Sin embargo, no es posible apoyar la cubierta en todo su perímetro, sino que hay que disponer un número de apoyos limitado. Concentrar los esfuerzos en unos puntos obliga a las compresiones que transmiten los meridianos a redirigirse hacia los apoyos, generando flexión en las zonas que separan los apoyos. Estos esfuerzos se pueden compensar de diferentes maneras, pero. Las marquesinas en voladizo contribuyen, por su geometría, a redirigir los esfuerzos a los apoyos. Así como la variación del canto de la cúpula, aumentando desde la coronación hasta los apoyos, permite contener la resultante de fuerzas.

Finalmente se introducen los pilares y se comprueba que éstos afectan considerablemente al comportamiento de la estructura, permitiendo la apertura del casquete esférico debido a su deformación. Se aprecia que la solución más intuitiva y lógica es arriostrar las cabezas de los pilares mediante un anillo que compense los empujes del octógono, tal y como hizo Eduardo Torroja.



Imagen 33 Acceso al mercado

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA DOCUMENTAL

LIBROS:

- Torroja Miret, E. (2010). Razón y ser de los tipos estructurales. Consejo superior de investigaciones científicas. Obtenido en <http://fliphtml5.com/ryov/qgcw/basic>
- Aranda Bernal, A. María. Quiles García, F. (1999). Historia urbana de Algeciras. Consejería de obras públicas y transportes de la Junta de Andalucía. Obtenido en <https://rio.upo.es/xmlui/handle/10433/8367>

ARTÍCULOS:

- Artuña Bernardo, Joaquín (2003). "Manuel Sánchez Arcas, Arquitecto" Colección Arquithemas, 12. Consultado en: Archivo digital UPM: https://oa.upm.es/1349/1/ANTUNA_CL_2003_01.pdf
- Basset Salom, Luisa (2013). Estructuras laminares. Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras.
- Mijangos Martínez, Eduardo (2012). Eduardo Torroja, la teoría de la intuición.
- *La catenaria en arquitectura*. (2010) Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, UPM.
- Larripa Artieta, Víctor (2013). "Frontón de Recoletos: La construcción de la metáfora" Proyecto, progreso, arquitectura, N8_Forma y construcción en arquitectura. Universidad de Sevilla. DOI: <http://dx.doi.org/10.12795/ppa.2013.i8.05>
- Parsons, John K. (1979). "Material utilizado en la construcción de estructuras laminares" Informes de la Construcción, 32 (313) DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.1979.v32.i313.2454>
- Torroja, Eduardo (1933). "Mercado de Algeciras" Informes de la construcción, 14 (137) DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.1962.v14.i137.4932>
- Virtudes Azorín, Pepa Cassinello y Juan Monjo (2012). Archivo Eduardo Torroja de la investigación en construcción y de su innovador hábitat (ITCC)

TRABAJOS:

- De los santos, Camila. Martínez, Victor. Estudio del comportamiento estructural de la Basílica San Pío X de Lourdes.

TESIS:

- Antuña Bernardo, Joaquín (2002). Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret.
- Bernabeu Larena, Alejandro (2007). Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea.
- Ramos Casquero, Alejandro (2011). Caracterización estructural de los rellenos en las bóvedas históricas de fábrica.

TFG Y TFM:

- Balleres Cardona, I (2018). Aproximación arquitectónica y análisis estructural del mercado de Algeciras. Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Valencia.
- Di Leo, Valentina (2018/2019). Análisis estructural del Restaurante de los Manantiales. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Esparcia Cañada, Francisco Rubén (2017/2018). Análisis estructural de la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela de Eduardo Torroja mediante SAP2000. Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Valencia.
- Gao, Chenchen (2018). Hipódromo de la Zarzuela. Diseño y construcción de Eduardo Torroja Miret. Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Madrid.
- García, Micaela Alejandra. Gorrachategui, María Macarena (2019/2020). Análisis de la estructura del Oceanográfico de Valencia. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Magnante, Giulia. Análisis de la estructura Palazzetto dello Sport en Roma Ingeniero Pier Luigi Nervi. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Martín Falcón, Alejandro (2018). Estructuras laminares de hormigón armado como método resolutivo frente a grandes luces. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Sevilla.
- Soler Soler, Victor (2019/2020). Estudio, modelización y análisis de la estructura mediante SAP2000 del Palazzetto dello sport de Pier Luigi Nervi en Roma. Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Valencia.
- Triviño Vázquez, Carolina. Cálculo con SAP2000 de estructura laminar con arcos internos. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Granada.
- Vidal Ruiz, Elena (2016/2017). La relación entre la forma y la estructura en la arquitectura y la ingeniería civil. Frei Otto y Emilio Pérez Piñero. Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Valencia.

VIDEOS:

- Computers and Structures, Inc. (2011) SAP2000 – 10 Response Spectrum Analysis: Watcg & Learn. [Youtube] 10 de junio. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=mryl8Jij7F0&list=PLE2E2B0B1D4F25942&index=14> [Consultado: 08-12-2023]
- CSI ETABS-SAP2000-SAFE Tips & Tricks (2020) SAP2000 Concrete Shell Reinforcement Design Watch & Learn. [Youtube] 9 de agosto. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=VFSB1ofhz_w&t=882s [Consultado: 06-12-2023]
- Ctroing Estructuras (2018) SAP2000 – Tutorial 12: Diseñador de secciones. [Youtube] 5 de enero. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=W3vu9owUCoU> [Consultado: 06-11-2023]
- González Angelino, Alí Emiliano. (2020) Estructuras laminares explicadas con pizza. [Youtube]. 26 de septiembre. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=MxYLPYBXis> [Consultado: 10-09-2023]
- Psykodiffeqparty (2022) Buckling of shel SAP2000. [Youtube] 15 de febrero. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=Nd4Y13_5Bf8 [Consultado: 07-11-2023]
- Ter. (2020) Diseñar estructuras... ¿sin cálculos? La magia de la catenaria. [Youtube]. 20 de marzo. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=KXP_kPPc7LY [Consultado: 03-10-2023]
- Ter (2020) Un puente más fino que una cáscara de huevo. [Youtube] 23 de marzo. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=VeahDy7n8I> [Consultado: 27-08-2023]
- Ter (2020) Los edificios más finos del mundo: ¿Por qué no se caen? [Youtube] 18 de marzo. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=UtEOqctVvt4> [Consultado: 27-08-2023]
- Visitas de Obra (2014) Visita al mercado de Algeciras con Rafael López Palanco [Youtube] 8 de julio. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=aa3D35rGcCM> [Consultado: 02-04-2023]

ENLACES WEB:

- Rostislav Lang, Ivan Němec, CSc., Hynek Štekbauser (2017). Requisitos específicos de las estructuras de membranas – dlubal.com. Consultado el 02 de agosto, 2023, en <https://www.dlubal.com/es/soporte-y-formacion/soporte/base-de-conocimientos/001437>

BIBLIOGRAFÍA FOTOGRÁFICA

- Imagen 1 Vista aérea del Mercado de Algeciras** **1**
Autor: José Hevia, Obtenida en:
<https://docomomoiberico.com/edificios/mercado-de-abastos-algeciras/>
- Imagen 2 Mercado de Algeciras** **10**
Autor: Juan Carlos Cazalla Montijano, Obtenida en:
https://www.urbipedia.org/hoja/Mercado_de_Abastos_de_Algeciras
- Imagen 3 Vista interior del Frontón de Recoletos** **11**
Autor: Desconocido, Obtenida en:
<https://www.revistaad.es/arquitectura/articulos/los-frontones-de-zuazo/18206>
- Imagen 4 Vista del Hipódromo de la Zarzuela** **12**
Autor: Ana amado, Obtenida en: <https://www.archdaily.cl/cl/797811/clasicos-de-arquitectura-hipodromo-de-la-zarzuela-carlos-arniches-molto-plus-martin-dominguez-plus-eduardo-torroja>
- Imagen 5 Vista aérea del Mercado de Algeciras** **12**
Autor: Jorge del Águila, Obtenida en:
https://www.europasur.es/algeciras/mercado-ingeniero-torroja-sello-correos_0_1681332491.html
- Imagen 6 Láminas cilíndricas** **13**
Autor: Eduardo Torroja Miret, Obtenida en: Razón y Ser de los tipos estructurales (1957)
- Imagen 7 Esquema de Catenaria y Funicular** **14**
Elaboración propia mediante programa Rhinoceros 7
- Imagen 8 Superficie de simple y doble curvatura** **16**
Elaboración propia mediante programa Rhinoceros 7
- Imagen 9 Encofrado del Mercado de Algeciras** **17**
Autor: Eduardo Torroja Miret, Obtenida en: Informes de la Construcción, Vol. 14, nº 137, enero de 1962.
- Imagen 10 Eduardo Torroja Miret** **18**
Autor: Desconocido, Obtenida en: <https://www.ietcc.csic.es/informacion-general/historia/eduardo-torroja/>

- Imagen 11 Exposición del Museo Eduardo Torroja** 19
Autor: Desconocido, Obtenida en:
<https://www.patrimonionacional.es/actualidad/noticias/inauguracion-museo-torroja-en-el-hipodromo-de-la-zarzuela>
- Imagen 12 Interior del Mercado de Algeciras** 20
Autor: José Hevia, Obtenida en: <https://docomomoiberico.com/edificios/mercado-de-abastos-algeciras/>
- Imagen 13 Vista de Algeciras desde el mar** 21
Autor: Desconocido, Obtenida en: <https://www.shutterstock.com/es/image-photo/aerial-view-port-algeciras-spain-452032831>
- Imagen 14 Vista aérea de Algeciras** 22
Autor: Instituto Geográfico Nacional, Ubicación: Puerto de Algeciras, Obtenida en:
<https://earth.google.com/web/@36.13019504,-5.44623197,13.21259675a,1789.06127961d,35y,0h,0t,0r/data=OgMKATA>
- Imagen 15 Puestos exteriores del Mercado de Algeciras** 22
Autor: Desconocido, Obtenida en:
<https://www.algeciras.es/es/ciudad/interesante/mercado-ingeniero-torroja/>
- Imagen 16 Construcción de la cúpula de Jena** 23
Autor: Desconocido, Obtenida en: <https://planetarium-jena.de/ueber-uns/geschichte/>
- Imagen 17 Maqueta del Mercado de Algeciras** 24
Autor: Eduardo Torroja Miret, Obtenida en: Informes de la Construcción, Vol. 14, nº 137, enero de 1962.
- Imagen 18 Planta del Mercado de Algeciras** 25
Autor: Eduardo Torroja Miret y Manuel Sánchez Arcas, Obtenida en:
https://www.urbipedia.org/hoja/Mercado_de_Abastos_de_Algeciras
- Imagen 19 Alzado del Mercado de Algeciras** 26
Autor: Eduardo Torroja Miret y Manuel Sánchez Arcas, Obtenida en:
https://www.urbipedia.org/hoja/Mercado_de_Abastos_de_Algeciras
- Imagen 20 Planta de cubiertas del Mercado de Algeciras** 26
Autor: Eduardo Torroja Miret y Manuel Sánchez Arcas, Obtenida en:
https://www.urbipedia.org/hoja/Mercado_de_Abastos_de_Algeciras
- Imagen 21 Vista interior del Lucernario del Mercado de Algeciras** 27
Autor: José Hevia, Obtenida en: <https://docomomoiberico.com/edificios/mercado-de-abastos-algeciras/>

Imagen 22 Vista interior del Mercado de Algeciras	28
Autor: Desconocido, Obtenida en: https://www.pinterest.es/pin/551198441886035174/	
Imagen 23 Detalle constructivo de los pilares del Mercado de Algeciras	29
Autor: Eduardo Torroja Miret, Obtenida en: Informes de la Construcción, Vol. 14, nº 137, enero de 1962.	
Imagen 24 Maqueta del Mercado para la exposición del Museo E. Torroja	30
Autor: HCH MODEL, Obtenida en: https://www.pinterest.de/pin/363243526195031296/	
Imagen 25 Armaduras de la cúpula del Mercado de Algeciras	31
Autor: Eduardo Torroja Miret, Obtenida en: Informes de la Construcción, Vol. 14, nº 137, enero de 1962.	
Imagen 26 Esquema del Mercado de Algeciras	32
Autor: Eduardo Torroja Miret, Obtenida en: Informes de la Construcción, Vol. 14, nº 137, enero de 1962.	
Imagen 28 Esquema de proceso de modelado	33
Elaboración propia mediante programa Rhinoceros 7	
Imagen 29 Modelo 3D del Mercado de Algeciras	33
Elaboración propia mediante programa Rhinoceros 7	
Imagen 27 Modelo 3D renderizado del Mercado de Algeciras	33
Elaboración propia mediante programa Rhinoceros 7	
Imagen 30 Fotografía antigua de la plaza del Mercado de Algeciras	334
Elaboración propia mediante programa Rhinoceros 7	
Imagen 31 Alzado del Mercado de Algeciras	42
Autor: M. Ángel del Águila, Obtenida en: https://www.europasur.es/algeciras/vista-Aguila-mercado-Ingeniero-Torroja_0_1617138477.html	
Imagen 32 Esquema de funcionamiento de cúpula	42
Autor: Ignacio Requena, Obtenida en: https://www.academia.edu/20295513/Analisis_de_tipologias_estructurales_por_Ignacio_Requena_Ruiz	
Imagen 33 Acceso al mercado	42
Autor: Desconocido, Obtenida en: https://ingenieria-civil.org/GOING/obra.php?id=87	
Figuras 31 a 66: Elaboración propia mediante programa SAP2000	