

## APROXIMACIÓN ARQUITECTÓNICA Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL MERCADO DE ALGECIRAS (E. TORROJA)

Autor: Barelles Cardona, Inés

Tutor: Fenollosa Forner, Ernesto Jesús

Co-tutor: Almerich Chulia, Ana Isabel



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA



El Mercado de Abastos es un edificio racionalista obra de Eduardo Torroja Miret y ejecutado por el arquitecto Manuel Sánchez Arcas, construido en el año 1935 en Algeciras.

El proyecto consistía en la cubrición de un mercado tratando de lograr un gran espacio diáfano, ausente de soportes interiores. Un proyecto de forma octogonal inscrito en las cuatro calles que delimitan el contorno.

El mercado se cubre mediante un casquete esférico de 47.62 metros de luz, resuelto con un espesor de 10 cm, creciendo hasta los 50 cm sobre los ocho soportes que lo sostienen. Dicha cubierta laminar está rematada en su perímetro por láminas cilíndricas de eje horizontal, que avanzan en voladizo dando lugar a marquesinas en los accesos al mercado. Finalmente la cubierta se completa con una claraboya octogonal de 10 metros de dimensión diagonal.

La solución que aporta Torroja, consiste en el atado de las cabezas de los soportes mediante un tirante que compense la componente horizontal del empuje de la lámina.

Palabras clave: Mercado, Algeciras, Torroja, octogonal, cubierta laminar, tirantes.

El Mercat d'Abastiments és un edifici racionalista obra d'Eduardo Torroja Miret i executat per l'arquitecte Manuel Sánchez Arcas, construït l'any 1935 a Algesires.

El projecte consistia en el cobriment d'un mercat tractant d'aconseguir un gran espai diàfan, absent de suports interiors. Un projecte de forma octogonal inscrit en els quatre carrers que delimiten el contorn.

El mercat es cobrix per mitjà d'un casquet esfèric de 47.62 metres de llum, resolt amb una grossària de 10 cm, creixent fins als 50 cm sobre els huit suports que ho sostenen. Dita coberta laminar està rematada en el seu perímetre per làmines cilíndriques d'eix horitzontal, que avancen en volada donant lloc a marquesines en els accessos al mercat. Finalment la coberta es completa amb una claraboia octogonal de 10 metres de dimensió diagonal.

La solució que aporta Torroja, consistix en el lligat dels caps dels suports per mitjà d'un tirant que compense la component horitzontal de l'espena de la làmina.

Paraules clau: Mercat, Algesires, Torroja, octogonal, coberta laminar, tibant.

The Abastos market is a rationalist building by Eduardo Torroja Miret and executed by the architect Manuel Sánchez Arcas, built in 1935 in Algeciras.

The project consisted of the covering of a market trying to achieve a large diaphanous space, without inner columns. An octagonal-shaped project inscribed within the four streets that delimit the contour.

The market is covered by a spherical shell of 47.62 meters span, solved with a thickness of 10 cm, growing up to 50 cm over the eight columns that support it. This laminar roof is finished in its perimeter by cylindrical shell of horizontal axis, which are in cantilever giving place to canopies in the accesses to the market. Finally, the roof is completed with an octagonal skylight of 10 meters diagonal dimension.

The solution provided by Torroja, consists of tying the columns heads by means of stays that compensates the horizontal component of the shell's thrust.

Key words: Mercado, Algeciras, Torroja, Octagonal, laminar cover, suspenders.

---

OBJETIVO Y METODOLOGÍA



## OBJETIVOS

En este trabajo se estudiará el edificio Mercado de Abastos de Algeciras (España). Un edificio racionalista obra de Eduardo Torroja Miret y ejecutado por el arquitecto Manuel Sánchez Arcas construido en el año 1935. Fue uno de los edificios de mayor relevancia en el panorama de la ingeniería estructural española debido a la utilización del acero pretensado.

En primer lugar se realizará una breve introducción que nos permita entender el contexto histórico, político y social tanto del lugar como del arquitecto. Se pretende así establecer las bases y entender las motivaciones que desembocaron en el edificio que finalmente se construyó y que hoy analizamos.

En el siguiente apartado se describirá el edificio desde el punto de vista funcional, espacial, de inserción en el lugar, etc., proporcionando la documentación gráfica necesaria para entender el proyecto. También se profundizará en la materialidad y la ejecución de la obra.

Se pondrá especial atención al aspecto estructural, con una detallada descripción que compondrá el tercer capítulo del trabajo. En este apartado se explicará el funcionamiento de cada uno de los elementos estructurales, y su modelización informática.

En el bloque más importante del trabajo se analizarán los resultados obtenidos mediante el modelo estructural de elementos finitos realizados por ordenador. Se estudiará detalladamente cada uno de los elementos estructurales, lo cual nos permitirá conocer el comportamiento de esta obra de ingeniería estructural.

Por último se desarrollarán las conclusiones del estudio realizado.

## METODOLOGÍA

Para la realización de dicho trabajo se ha realizado, en primer lugar, una recopilación de datos gracias a biografías de Torroja, páginas webs, datos del edificio en concreto, normativas, tesis, videos...etc.

La recopilación de páginas webs y la mayoría de las imágenes se han obtenido a través de internet, mientras que, todo tipo de libros especializados en la materia se han consultado en el centro de investigación arquitectónico o en bibliotecas.

Una vez obtenido el material necesario, se ha ido procesando individualmente con la ayuda del tutor y co-tutor. Se ha ido trabajando y analizando el modelo mediante horas tuteladas en los despachos.

La elaboración del modelo se realizó a partir de los planos reales de la estructura en el programa AutoCad 2017®, estableciendo en primer lugar los soportes principales y en segundo lugar se realizó un octavo de la cúpula para posteriormente hacer una matriz y completar el modelo con el lucernario. Una vez realizado el esqueleto se determinaron cada uno de los materiales que componían la estructura mediante el programa Architrave 2015®.

La obtención de los resultados se procesó mediante el programa Architrave 2015® extrayendo los resultados pertinentes de cada elemento estructural para la explicación del modelo y el entendimiento del funcionamiento estructural. Los gráficos extraídos y establecidos en el proyecto, resultan de gran ayuda para el entendimiento del modelo.

Por último se realizará la extracción de las conclusiones principales del trabajo con la finalidad de potenciar las ideas primordiales y el fin específico de este Trabajo Final de Grado.

OBJETIVO Y METODOLOGÍA.....	2
OBJETIVOS .....	3
METODOLOGÍA .....	4
INTRODUCCIÓN .....	6
CONTEXTO HISTÓRICO. ESPAÑA, ALGECIRAS .....	7
EL ARQUITECTO: EDUARDO TORROJA MIRET .....	8
PENSAMIENTO .....	8
TRAYECTORIA PROFESIONAL: OBRAS DESTACADAS .....	10
PROYECTO ARQUITECTÓNICO .....	11
ENTORNO E IDEA .....	12
FORMA, VOLUMEN E IMPLANTACIÓN .....	13
ORGANIZACIÓN .....	14
MATERIALIDAD Y CONSTRUCCIÓN .....	15
DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA .....	17
DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA .....	18
ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y SU MODELIZACIÓN .....	19
ASIGNACIÓN DE CARGAS .....	23
COMBINACIÓN DE CARGAS .....	26
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS DISTINTOS MODELOS .....	29
ESTUDIO DE RESULTADOS DEL MODELO .....	32
CONCLUSIONES .....	42
BIBLIOGRAFÍA .....	47
BIBLIOGRAFÍA DOCUMENTAL.....	48
BIBLIOGRAFÍA FOTOGRÁFICA.....	54

---

INTRODUCCIÓN

---

## CONTEXTO HISTÓRICO. ESPAÑA, ALGECIRAS

La actual Algeciras se funda en el siglo VIII, cuando los árabo-beréberes invadieron la antigua Isla Verde, que se localizaba en lo que es hoy el puerto de Algeciras, durante su conquista del reino visigodo de Toledo. Esta nueva ciudad se asentará sobre los restos de la antigua ciudad romana de Iulia Traducta y recibirá el nombre de Al-Īazīra al-Jadrā.

Cuando desaparece el Califato de Córdoba en 1031, Algeciras se convierte en la capital del Reino Taifa de Algeciras. En el año 1055 pasa a manos Almorávides, que la convierten en su principal base de operaciones antes de emprender la conquista de al-Ándalus. En el siglo XII Algeciras refuerza su papel como nexo de unión entre la Península Ibérica y el Norte de África, cuando es tomada por los Almohades. Los edificios más representativos de este periodo son un hospital y la desaparecida Torre del Espolón.

En el siglo XIII la ciudad es conquistada por los Benimerines, dinastía norteafricana que surge tras la desaparición del Imperio Almohade. Este nuevo poder, sabiendo la gran importancia geoestratégica de Algeciras, decide edificar una nueva ciudad anexa al antiguo núcleo andalusí cuyo nombre será al-Binya, denominada actualmente La villa Nueva. Este núcleo contará con varias mezquitas, atarazanas, baños públicos y un palacio, además de un potente sistema defensivo. (Universidad Pablo de Olavide, n.d.)

Algeciras se erige como el principal puerto en la orilla europea del estrecho de Gibraltar (Imagen 1).

Esta importancia la convierte en uno de los grandes objetivos del Reino de Castilla entre los siglos XIII y XIV. El rey Alfonso XI la conquista en 1342, aunque es reconquistada por Muhammad V de Granada en 1369.

Después de una década, ante la imposibilidad de asegurar la plaza, la ciudad es destruida por orden del rey granadino. Este hecho propicia el abandono de Algeciras durante casi 350 años.

En 1713 tras el final de la llamada Guerra de Sucesión y el predominio del poder británico en la ciudad vecina de Gibraltar, Algeciras comienza a poblarse de nuevo. En 1755 es reconstruida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército siguiendo el trazado de las calles y las murallas medievales. Este nuevo enclave es el germen de la actual Algeciras, que se ha convertido en uno de los puertos más importantes de Europa. (Universidad Pablo de Olavide, n.d.)

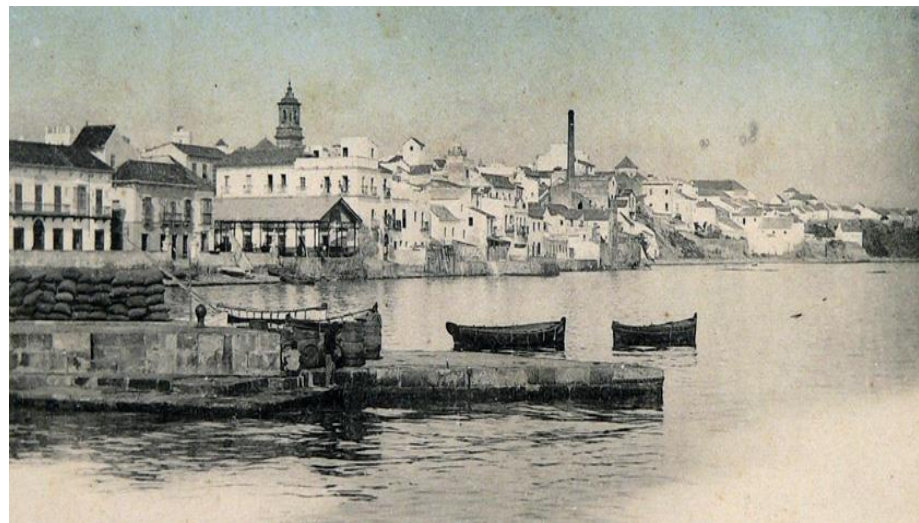


Imagen 1 Algeciras 1906 (A. Algeciras, n.d.)



## EL ARQUITECTO: EDUARDO TORROJA MIRET

Eduardo Torroja Miret (Imagen 2). Nació en Madrid en 1899. Es internacionalmente reconocido como Ingeniero Civil, proyectista, científico, investigador y docente. En la primera mitad del siglo XX, protagoniza en gran medida la revolución científica y técnica en el desarrollo del hormigón armado y pretensado, contribuyendo así a la evolución de la industria de la construcción.

Es hijo de una familia de gran tradición científica. Su padre, Eduardo Torroja Caballé, fue arquitecto, matemático y docente en cátedras de las Universidades de Valencia y de Madrid, *“renovando la matemática española y difundiendo la geometría proyectiva de Von Staudt, entrando a formar parte de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en 1893.”* (Torroja, n.d.)

Eduardo Torroja Miret se licenció como Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en 1923 en la Escuela Especial de Madrid, que fue fundada por Agustín de Betancourt en 1802 tomando como ejemplo la École des Ponts et Chaussées de Paris. En 1926 contrajo matrimonio con D<sup>a</sup>. Carmen Cavanillas Prosper. De este matrimonio nacieron sus cuatro hijos.

Su primer trabajo profesional como ingeniero y proyectista en la empresa constructora Hidrocivil, fundada y dirigida por su profesor José Eugenio Ribera, ya fue todo un éxito.

Como miembro del equipo técnico de esta empresa realiza sus primeras innovaciones en hormigón armado, construyendo, entre otras obras, *“el famoso Acueducto de Tempul sobre el río Guadalete (Fig.1), en Jerez de la Frontera (1927), las delgadas cúpulas laminares de revolución como parte de los cajones de cimentación del Puente de San Telmo, en Sevilla (1926), así como los hiperboloides laminares concéntricos en ladrillo armado para*

*la cimentación del Puente de Sancti-Petri, en Cádiz (1926).”* (Torroja, n.d.)

En 1934 funda el Instituto Técnico de la Construcción y la Edificación. A partir de 1939, compagina su labor profesional con la docente. Participa en congresos e imparte conferencias por todo el mundo. Fallece en Madrid en 1961. (España es Cultura, n.d.)

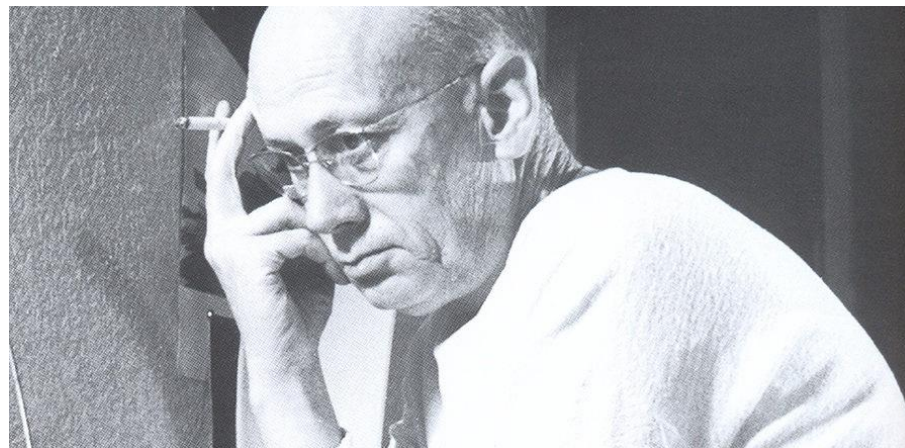


Imagen 2 Eduardo Torroja Miret (Weise, 2016)

*“Antes y por encima de todo cálculo está la idea, moldeadora del material en forma resistente, para cumplir su misión”* - Eduardo Torroja Miret –

## PENSAMIENTO

*“El nacimiento de un conjunto estructural, resultado de un proceso creador, fusión de técnica con arte, de ingenio con estudio, de imaginación con sensibilidad, escapa del puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración.” - Eduardo Torroja Miret -*

Siendo uno de los ingenieros más prestigioso de España, siempre estuvo muy ligado a la Arquitectura y defendía la necesidad de la colaboración de ambas disciplinas en el mundo de la construcción.

Es por lo tanto, de admirar su método de análisis de las estructuras, así como la relación que establece con los materiales y sistemas estructurales para obtener las mejores cualidades de ellos.

Su flexibilidad de pensamiento le llevó a proponer una teoría de la intuición para el diseño de estructuras.

*“las estructuras de concreto no pueden ser configuradas matemáticamente (son mucho más fuertes de lo que las matemáticas pueden probar, y no puedes esperar a un matemático). Tienes que seguir adelante y probar por ti mismo por intuición”. - Eduardo Torroja Miret -*

En cada proyecto se genera un nuevo pensamiento que se basará en lo siguiente; *“el ingeniero “ingenia” la estructura, la dibuja, la modela y hace prototipos a escala que se prueban bajo diferentes condiciones; para la aplicación de su método se requiere tener todos los sentidos puestos en el comportamiento estructural, mucho valor y responsabilidad para asumir el reto de la construcción.” (Mijangos Martínez & Torroja Miret, 2012)*

El aspecto innovador en Torroja es precisamente este, que a pesar de ser un ingeniero con gran prestigio a nivel científico y técnico, defendiese valores tan personales como la inspiración, la sensibilidad o la imaginación, ya que para él eran esenciales en la creación de las formas estructurales. Con ello, puede observarse la importancia que le daba a las formas, así como las consecuencias que producían en las personas que las observaban o vivían.

Era imprescindible disponer de conocimientos técnicos, las bases de la construcción y tipos estructurales, para entender el objetivo último de la función resistente y con ello alcanzar un buen diseño final. (Imagen 3).

Además de los conceptos técnicos era de gran importancia la sensibilidad artística, para lograr un diseño bonito. También, consideraba que los cálculos no eran más que un instrumento para comprobar que la forma realizada era la correcta y que coincidía con la intuición.

*“Sin embargo, sabiendo que podía cometer errores, solía completar su trabajo técnico con ensayos mediante modelos a escala reducida.” (Torroja Miret, 2010)*

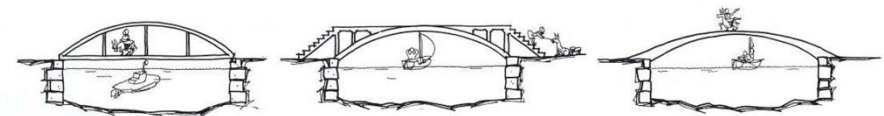


Imagen 3 Esquema de puente (Torroja Miret, 2010)

## TRAYECTORIA PROFESIONAL: OBRAS DESTACADAS

### Mercado de Algeciras (1935) (Imagen 4)

El proyecto consistía en realizar la cubierta de un mercado, tratando de lograr un gran espacio diáfano, ausente de soportes interiores, que permitiesen la libre colocación de las casetas de venta.



Imagen 4 Mercado de Algeciras (Sierra Muñoz, 1989)

### Frontón de Recoletos (1935) (Imagen 5)

El proyecto consistía en un espacio diáfano y cerrado destinado al juego de la pelota vasca, por lo que presentaba unas exigencias funcionales muy estrictas, como por ejemplo: las proporciones en planta desiguales para permitir el espacio de juego y las gradas, la necesidad de resistencia del muro frontal...



Imagen 5 Frontón de Recoletos (Pérez Rodero, 2017)

### Hipódromo de la Zarzuela (1935) (Imagen 6)

El proyecto del hipódromo debía de disponer de una serie de espacios concretos: sala de apuestas, taquillas, graderío, acceso a la pista y galerías, entre otros. Al tratarse de un edificio singular, se buscó que la estructura fuera lo más estética posible.

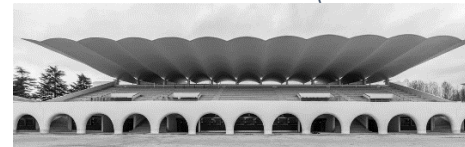


Imagen 6 Hipódromo de la Zarzuela (Balear, n.d.)

### Iglesia de San Nicolás (1961) (Imagen 7)

Como todas las construcciones religiosas, debía de disponer de una serie de espacios con unas determinadas características funcionales. Principalmente éstas consistían en: un espacio central donde se realizara el culto y con una altura libre considerable, el altar, las capillas de menor altura que la nave central...

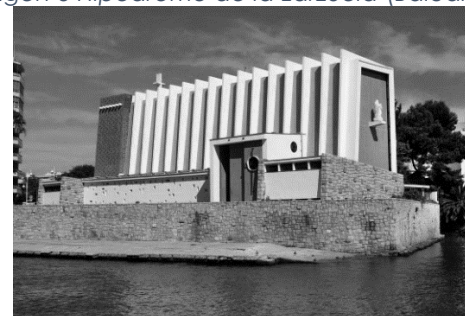


Imagen 7 Iglesia de San Nicolás (Serrano, Fenollosa, & Arnau, 2016)

---

PROYECTO ARQUITECTÓNICO



## ENTORNO E IDEA

Se sitúa en el centro histórico de la ciudad, en la zona conocida como la Villa Nueva. El edificio sustituyó al anterior mercado de abastos, inaugurado en 1821 en la misma plaza de Nuestra Señora de la Palma. Sobre la planta cuadrada de la plaza se realizó un proyecto, inscrito en las cuatro calles que delimitan el contorno. (Imagen 8 y 10)

Las distintas modificaciones realizadas también se dejan ver en el entorno: en su origen, mantenía la escala de las casas que lo rodeaban, mientras que en la actualidad, todas esas edificaciones han sido sustituidas por edificios en altura que comprimen al mercado y a la plaza en la que se ubica.

El edificio acoge la mayoría de las actividades de la zona y diariamente se montan gran cantidad de puestos ambulantes a su alrededor como se puede observar en la imagen 9.

Torroja utilizó nuevas técnicas para construir una cúpula a partir de una membrana de hormigón armado, por este motivo, el mercado de abastos de Algeciras es una muestra destacada de la arquitectura moderna en España, gracias a la utilización de dicho material.

*“Como tantas veces ha ocurrido en la reciente historia de la arquitectura, la figura del ingeniero supone el impulso de la seguridad en las nuevas técnicas y la paralela adopción de un lenguaje formal vinculado a éstas. Haciendo referencia a los llamados "mandamientos estéticos de la obra de Eduardo Torroja", según los formulaba el ingeniero José Antonio Fernández Ordóñez, se concretan en este caso en la evidencia de la "verdad resistente", y de la "simplicidad formal".”* (Patrimonio Histórico, 2001)



Imagen 8 Mercado de Algeciras 1935 (Solanas, 2012)



Imagen 9 Mercado de Algeciras en la actualidad (Opandalucia, 2011)



Imagen 10 Entorno mercado de Algeciras (M. de Algeciras, n.d.)

## FORMA, VOLUMEN E IMPLANTACIÓN

La plaza de Ntra. Sra. de la Palma donde se ubica el Mercado es una de las principales de la “Ciudad Vieja” de Algeciras, siendo uno de los pocos espacios libres del Centro Histórico de la ciudad. Se sitúa en la parte periférica del puerto histórico de la población, con una forma casi cuadrangular, al que llegan cuatro calles. Su cercanía al puerto le da un carácter histórico unido a la actividad portuaria, marítima y comercial.

*“De esta forma se configura el edificio como un artificio que ocupa el espacio libre de la plaza pero que por la simplicidad y versatilidad de su forma, por su sencillez compositiva y por la apertura en todos sus sentidos de forma equivalente, dota al edificio de un espacio público que forma parte del contexto urbano en el que se ubica.”* (Imagen 11).

El volumen está definido por una cúpula esférica que se apoya sobre los ocho soportes. En el centro se coloca un lucernario formado por triángulos prefabricados de hormigón armado, sobre los que apoyan unos vidrios. El borde exterior de la cúpula está cortado por bóvedas cilíndricas que van de soporte a soporte. El enlace de estas bóvedas con la cúpula sirve para rigidizar los bordes de ésta y para dirigir, hacia los soportes, las tensiones principales. Estas bóvedas, se proyectan en voladizo cubriendo las puertas de acceso al mercado (Imagen 12). (CSIC, 1962)

Teniendo en cuenta las limitaciones de la época para realizar el cálculo de la estructura, se realizó un modelo a escala 1:10, el cual representaba una cúpula de menos de 1 cm de espesor. Que se hundió poco después de una visita de inspección. Torroja lo achacó a problemas del modelo a escala y decidió construir la cúpula tal y como la tenía proyectada (Fernández Ordoñez & Navarro Vera, 1978).

El Mercado consistía en una cubierta para proteger la instalación de un mercado temporal. Su interior era un espacio totalmente diáfano, en el que se situaban unos puesto de venta ordenados en anillos concéntricos. (Sanchez Arcas, 2003)



Imagen 11 Mercado de Algeciras (Requena, 2014)



Imagen 12 Mercado de Algeciras (Fdz Torrónategui, 2015)

## ORGANIZACIÓN

Sobre la plaza se configura una planta en forma de octógono regular de 18.20m de lado. La entrada se realiza por cuatro de las caras, opuestas dos a dos formando dos calles ortogonales de circulación interior que se cruzan en el centro.

La organización permite que los puestos de venta se dispongan en círculos concéntricos así como los pasillos por los que se accede a ellos. (Sanchez Arcas, 2003)

El primer anillo se sitúa pegado al muro de fachada, y los otros tres en el centro de la planta. De esta forma el acceso a todos los puestos, se realiza por medio de unas calles circulares y cuatro calles radiales que coinciden con las puertas. El centro de la planta se amplía con una plazoleta que contiene un pequeño estanque.

De esta forma, se establecen treinta y seis puestos en la periferia y sesenta y cuatro en el interior a los que se puede llegar desde cualquier punto. Los puestos periféricos, se proyectan con sus separaciones y sus mostradores mientras que los puestos del interior serán portátiles. (Imagen 13). (CSIC, 1962a)

Los puesto fijos de venta, consistían en un recinto delimitado por una malla metálica y el muro perimetral revestido de azulejos y un mostrador de piedra artificial.

*“Por otra parte, no se proyecta cerramiento alguno, ya que se consideraba que, una vez finalizada la jornada, los comerciantes recogían toda la mercancía y no se dejaba ningún material en el interior, quedando el recinto totalmente vacío, lo que, por otra parte, facilitaba su limpieza.”* (Sanchez Arcas, 2003)

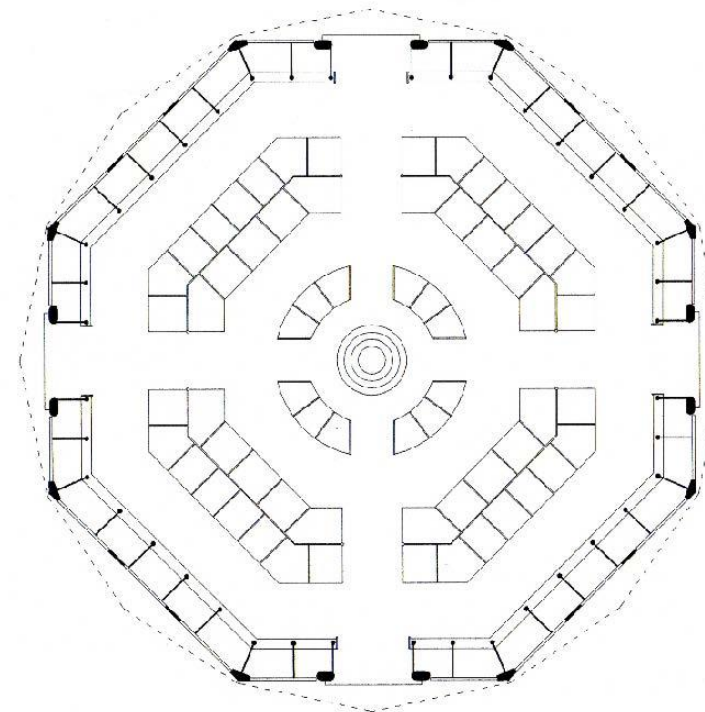


Imagen 13 Planta Mercado de Algeciras (Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 2001)

## MATERIALIDAD Y CONSTRUCCIÓN

La cubierta está formada por una cúpula laminar de hormigón armado inscrita en una planta octogonal, ésta se apoya únicamente en los ocho pilares. Tiene un radio de 44,1 metros y un espesor mínimo de 10cm que se va incrementando de forma gradualmente hasta llegar a 50 centímetros en los apoyos, esto permite la correcta distribución de cargas.

La cubierta es el elemento que protagoniza esta obra, por ser una de las primeras de estas características en ser construida en España. Los principales materiales que componen la cubierta del mercado de Algeciras son el hierro y el hormigón.

La cubierta tan original que proyecta Torroja tiene un lucernario en el punto más alto que permite la entrada de luz cenital al mercado y que está conformado por un anillo rigidizador de 9,1 metros de diámetro formado por 128 paneles que componen cuatro octágonos concéntricos incluyendo el anillo periférico. (Cordero Toral, 2014)

Los encofrados y cimbras utilizados en el proceso de construcción fueron revisados de forma exhaustiva por Eduardo Torroja debido a que en aquella época no se contaba con información exacta para construcciones de este tipo. La fabricación de éstos fue realizada mediante elementos de madera (Imagen 14).

Una vez terminado el armado de las cimbras y encofrados y siguiendo las instrucciones de Eduardo Torroja, se colocaron los refuerzos de hierro, distribuidos de manera que se generaba una malla cuadrícula sobre toda la superficie de la cubierta (Imagen 15).

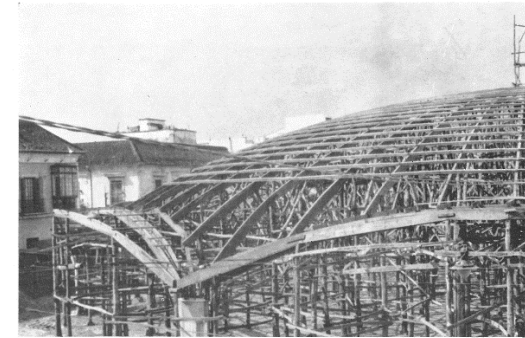


Imagen 14 Cimbrado cúpula (CSIC, 1962)

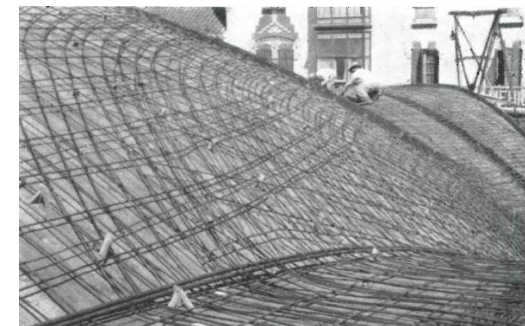


Imagen 15 Armado cúpula (CSIC, 1962)

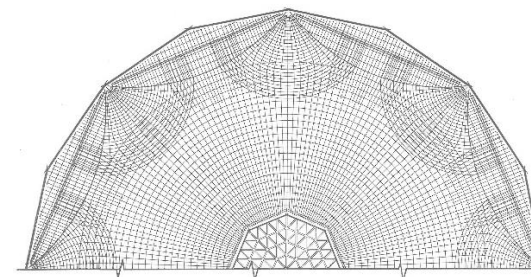


Imagen 16 Doble mallado cúpula (CSIC, 1962)



De acuerdo a los cálculos de tensiones realizados, se dispuso un doble mallado en los puntos de intersección entre la lámina con los pilares de la planta octogonal del mercado, así como en el encuentro entre la cúpula y las bóvedas perimetrales. Este refuerzo consistía en barras de acero. De esta manera se evitan cuarteamientos o fisuras en los puntos críticos (Imagen 16).

Debido a la inexistencia de documentación del hormigonado, se deduce que la cubierta se realizó de forma tradicional, donde los obreros son los que vertían las cubetas de hormigón. En esta etapa de construcción no fue necesaria una numerosa mano de obra. (Cordero Toral, 2014)

La estructura de pilares está coronada por un anillo de hormigón reforzado. La función de éste es la de absorber y equilibrar las tensiones producidas por la cúpula, evitando así, que ésta ceda en sus apoyos. El anillo está compuesto por 16 varillas de acero tensionadas, las mismas que fueron recubiertas por hormigón una vez puestas en tensión (Imagen 17).

La forma octogonal de la planta se vincula con la cubierta a través de ocho bóvedas en voladizo (Imagen 18). Estas bóvedas, además de proporcionar ventilación y protección contra la entrada de agua al mercado, también tienen la función de evitar deformaciones de la cúpula y ayudar a redirigir los esfuerzos producidos por ésta hacia los apoyos.

Los acabados del Mercado son de carácter muy sencillos, lo que pretendía Torroja era mostrar los materiales tal y como eran, sin ningún tipo de recubrimiento, exceptuando algún aplicado de pintura sobre el establecimiento. Las paredes son de mampostería de ladrillo caravista (Imagen 19). (Cordero Toral, 2014)

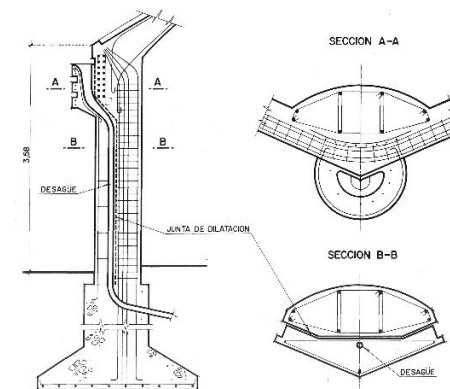


Imagen 17 Columnas (CSIC, 1962)



Imagen 18 Bóvedas en voladizo (Instituto Andaluz, 2001)



Imagen 19 Interior del Mercado (Instituto Andaluz, 2001)

---

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA



## DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA

La planta es un octógono de 18,20 m de lado, inscrito en una circunferencia de 23,88 m de radio, cubierto con una cúpula que salva una luz entre apoyos de 47,76 m formada por un casquete esférico de una circunferencia de 44,10 m de radio. La lámina tiene un espesor de 10 cm, lo que supone una esbeltez de 470 (Imagen 20).

En la coronación de la cubierta hay un lucernario de hormigón armado y paneles de cristal, con un diámetro de 9.1 m que contiene un total de 128 paneles con la forma de octógono. (Fabra Abella, 2012)

Entre los soportes se colocan unas bóvedas cilíndricas que intersectan con la cúpula, formándose unos arcos que salvan la luz entre soportes. Estos arcos permiten que los esfuerzos se dirijan hacia los pilares; además, a partir del paralelo que coincide con la clave de las bóvedas de fachada, el espesor de la lámina aumenta hasta llegar a los 50 cm que posee sobre los soportes.

Tras el fraguado del hormigón se tesaron los cables y la cubierta experimentó un ascenso vertical separándose del encofrado, posteriormente este fue retirado.

Torroja considera que para conocer el comportamiento de la estructura, se debía realizar un ensayo mediante un modelo reducido. En este caso, se hizo un modelo a escala 1:10.

Una forma simple de realizar el análisis de esta cubierta es la aplicación de la teoría de la membrana. La cúpula se estudia sin tener en cuenta los esfuerzos de flexión y los cortantes en sentido perpendicular a la superficie. (Antuña Bernardo, 2002).

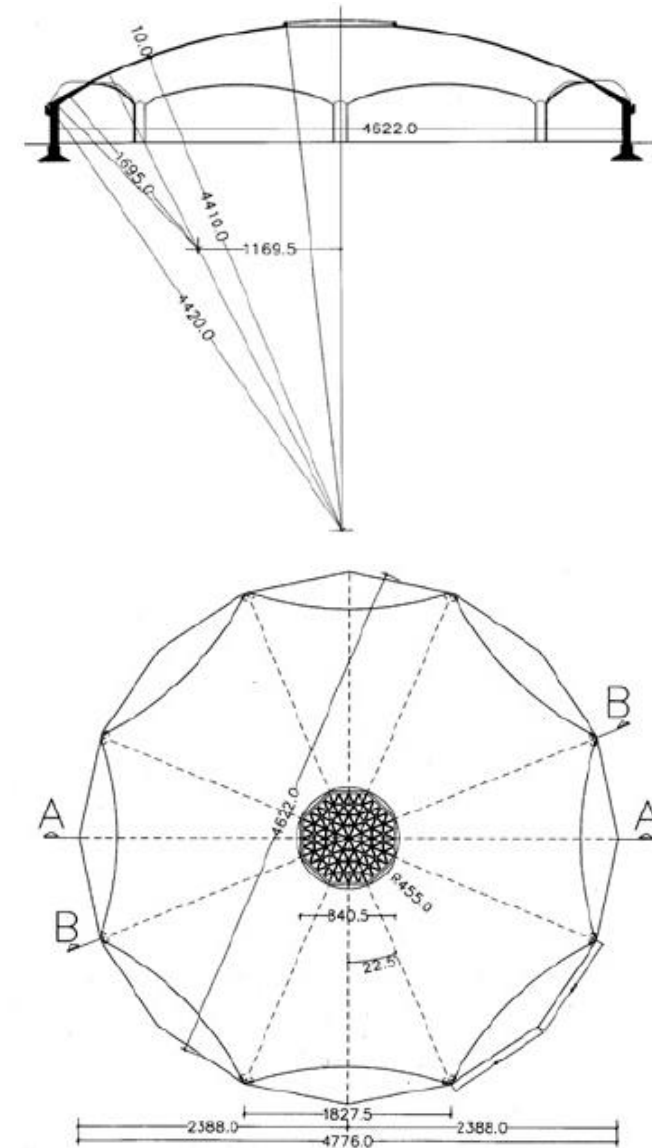


Imagen 20 Dimensiones estructura (Antuña Bernardo, 2002)

## ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y SU MODELIZACIÓN

Para estudiar el comportamiento de la estructura del Mercado de Algeciras de Eduardo Torroja, se ha realizado una modelización de la estructura mediante el programa informático AutoCad 2017®.

Debido a la característica superficial de los elementos que componen la estructura, estos no se han podido modelizar como barras, sino que se tratan como elementos superficiales que se calculan mediante el método de elementos finitos (Imagen 21). Tanto los pilares como los tensores son excepciones porque si se han modelizado como barras ya que funcionan como tal. De este modo, la proximidad del modelado con la realidad es mayor. A estos elementos, se les han asignado propiedades geométricas y mecánicas e insertado entidades gráficas diversas que simbolizan las acciones y apoyos mediante la aplicación de Architrave 2015®.

El método de los elementos finitos es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales. Este método consiste en dividir un elemento estructural superficial en muchos elementos más pequeños que están interconectados. Cada una de estas subdivisiones es un elemento finito al que se les asignan unas condiciones de contorno, ecuaciones de equilibrio y ecuaciones constitutivas (tensión – deformación). El software informático se encarga de resolver el sistema de ecuaciones para cada uno de los elementos, mostrando los resultados globales de la estructura.

El cálculo mediante elementos finitos permite un estudio detallado sobre las solicitaciones, tensiones y deformaciones de cada punto dentro de una gran malla superficial, lo que lo hace especialmente adecuado para edificios con gran presencia de elementos estructurales superficiales.

Se trata de un método aproximado, pero muy preciso si se ejecuta correctamente. Para obtener unos buenos resultados que se aproximen a la realidad se debe realizar un correcto modelado. Además, cuanto más pequeño sean los elementos finitos, mayor será la precisión, tanto para calcular las ecuaciones diferenciales, como para adaptarse a la geometría real del elemento estructural.

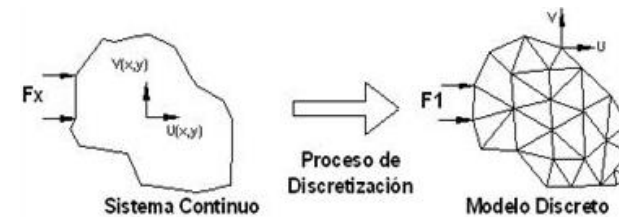


Imagen 21 Discretización de elementos finitos (Garcia Jacomino, 2011)

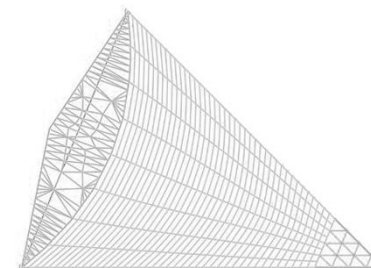


Imagen 22 Elementos finitos modelo AutoCad 2017®

El programa Architrave® está correctamente preparado para la normativa actual pero en este caso en particular, no contempla de por sí el hormigón HA-15, hormigón que empleó Torroja en la construcción del mercado. Por tanto, lo que se ha realizado es la generación de un nuevo material con las características adecuadas para aproximarse al hormigón original.

Para la modelización del Mercado se han utilizado elementos finitos tanto triangulares como cuadrangulares, según fuera más conveniente para adaptarse a la geometría. Un total de 4.128 elementos finitos componen el modelado. A los elementos finitos de la cúpula laminar se les ha asignado las características de un hormigón HA-15, con un módulo de elasticidad de 20.000 N/mm<sup>2</sup>, un coeficiente de Poisson de 0,2 y un peso específico de 25 kN/m<sup>3</sup>; los de bóvedas cilíndricas y los del lucernario, mantendrán las mismas características.

Es muy importante que los vértices de los elementos finitos coincidan, y que no haya ningún vértice en contacto con una cara del elemento finito. Esto, sumado a la complejidad de la geometría singular del Mercado, hace más complicada la modelización del edificio. Por este motivo, la mayor parte del modelo se ha realizado por sectores, es decir, construyendo una de las 8 fracciones que forman el edificio y repitiendo este modelado 8 veces mediante una matriz polar. No obstante, se ha tenido que modificar manualmente algunos de los nudos de los elementos finitos para que estuviesen correctamente conectados.

Los ocho soportes que sustentan la gran cubrición del Mercado de Algeciras se modelizaron como barras y no como elementos finitos. Los pilares son de sección cuadrada con unas dimensiones de 1000x300 mm y 3,60 m de altura. El material asignado es el hormigón armado HA-15, con un módulo de elasticidad de 20.000 N/mm<sup>2</sup>, un coeficiente de Poisson de 0,2 y un peso específico de 25 kN/m<sup>3</sup>. Dichos pilares se apoyan sobre zapatas modelizadas como empotramientos. Y por último, los tensores, elementos colocados entre pilares, se han modelizado como una barra de sección circular de acero de 64mm de diámetro (área equivalente a las 16 varillas utilizadas por Torroja) (Imagen 23).

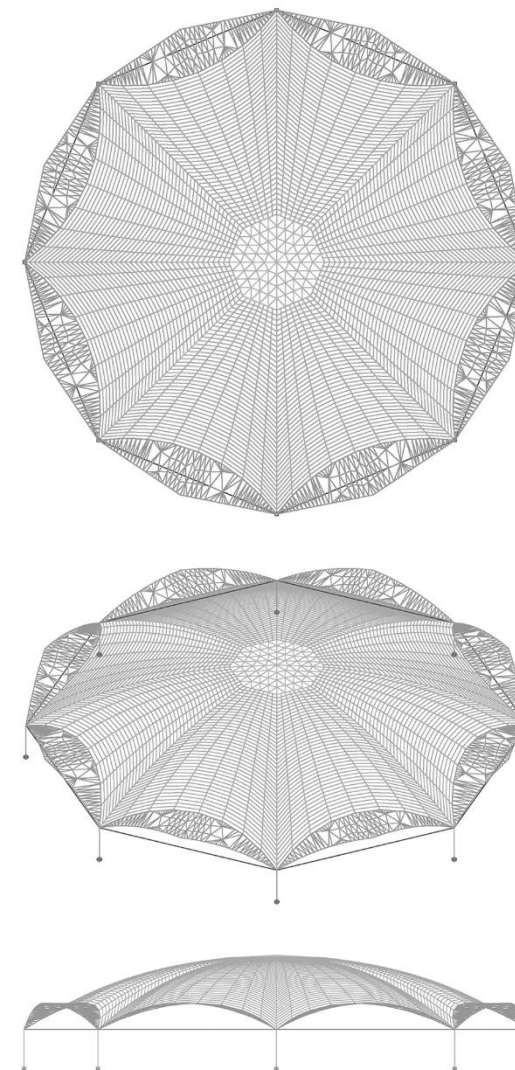


Imagen 23 Modelo elementos finitos AutoCad 2017<sup>®</sup>



Imagen 24 Mercado de Algeciras (Requena, 2014)



Imagen 27 Mercado de Algeciras vista Architrave 2015©



Imagen 25 Bóvedas en voladizo (Instituto Andaluz, 2001)

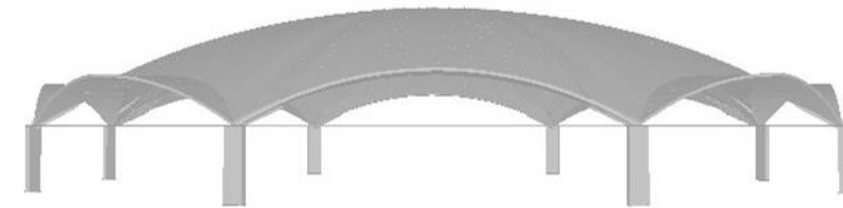


Imagen 28 Bóvedas en voladizo vista Architrave 2015©



Imagen 26 Interior del Mercado (Instituto Andaluz, 2001)

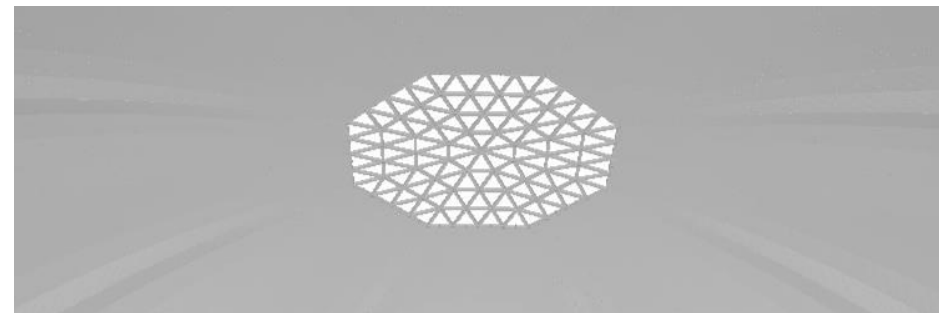


Imagen 29 Interior del Mercado vista Architrave 2015©

A partir del modelo original del mercado de Algeciras, se planteó la idea de realizar distintos modelos estructurales mediante la simplificación de la estructura real.

Las distintas variaciones permitirán observar las deformaciones de la cubierta y los pilares en cada situación y el funcionamiento conjunto del edificio.

En primer lugar se estableció un modelo con cubierta laminar simple. Manteniendo la misma disposición de los pilares y el lucernario y eliminando las bóvedas de intersección con la cúpula, la estructura se compone de 2016 elementos finitos rectangulares. Es el modelo más simplificado que puede llegar a tomar el mercado ya que obvia cualquier elemento de refuerzo como se muestra en la imagen 30.

En segundo lugar, pensando en las posibles movimientos que pueden llegar a tener los pilares y la cúpula, se obtiene un modelo procedente del anterior, la variación introducida es la de un anillo perimetral de cosido, de esta manera se podrá observar si el funcionamiento es igual que el de las bóvedas existentes en la actualidad. Este anillo se compone de 192 elementos finitos rectangulares (imagen 31).

Y en tercer lugar, como se observa en la imagen 32, se propone un cambio geométrico importante en el elemento principal, se cambió por completo el casquete esférico por láminas plegadas. Cada octavo de la cúpula original se subdividió en dos láminas plegadas, por tanto, la planta queda formada por 16 partes. Esta cubierta quedó conformado por 1968 elementos finitos rectangulares.

De esta manera, se entenderá el motivo por el cuál Eduardo Torroja utilizó dichos materiales, dispuso de tal forma la estructura atada con los tensores y cubrió el mercado con esa cúpula monumental añadiendo en ella las bóvedas de refuerzo.

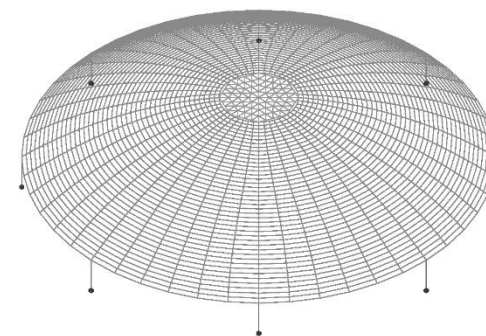


Imagen 30 Modelo cúpula laminar Architrave 2015©

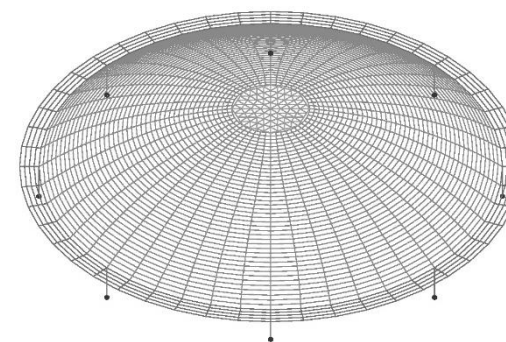


Imagen 31 Modelo anillo perimetral Architrave 2015©

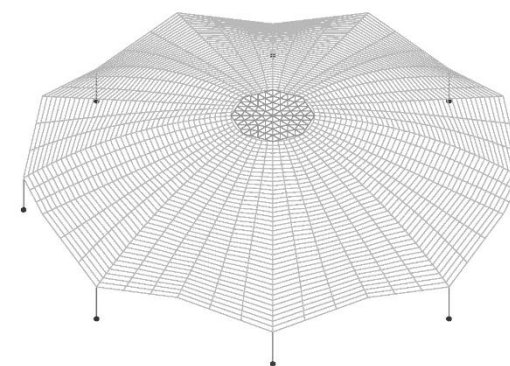


Imagen 32 Modelo láminas plegadas Architrave 2015©

## ASIGNACIÓN DE CARGAS

Para la asignación de cargas sobre la estructura del Mercado de Torroja, se tendrá en cuenta lo establecido en el CTE, especialmente en el Documento Básico de Seguridad Estructural - Acciones en la edificación. Se establecen 3 tipos de cargas distintas en el trabajo: permanentes, variables y accidentales.

### CARGAS PERMANENTES

Las cargas permanentes se componen por el peso propio de la estructura y de los elementos constructivos. Consideramos que el peso propio de la estructura supone gran parte de las cargas gravitatorias permanentes, ya que se trata de una estructura pesada de hormigón armado.

El programa informático utilizado para el análisis, Architrave 2015<sup>®</sup>, tiene en cuenta el peso del material al indicar que es un hormigón HA-15, además del espesor en cada tramo. Por este motivo, no es necesario introducir las cargas correspondientes al peso propio de la estructura en el programa Autocad 2017<sup>®</sup>.

### CARGAS VARIABLES

Entendemos por cargas variables aquellas que no son permanentes, es decir, que actúan únicamente durante un período de tiempo. Además, la carga, en el instante que actúa, no es constante. Las cargas variables más representativas son la sobrecarga de uso, el viento, y la sobrecarga de nieve.

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m <sup>2</sup> ]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 <sup>(1)</sup>
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente <sup>(2)</sup>			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación <sup>(3)</sup>	G1	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 <sup>(4)(5)</sup>	2
		G2	Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) <sup>(5)</sup>	0,4 <sup>(4)</sup>	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Imagen 33 Tabla 3.1 Valores característicos de las sobrecargas de uso (Estructural, 2008)

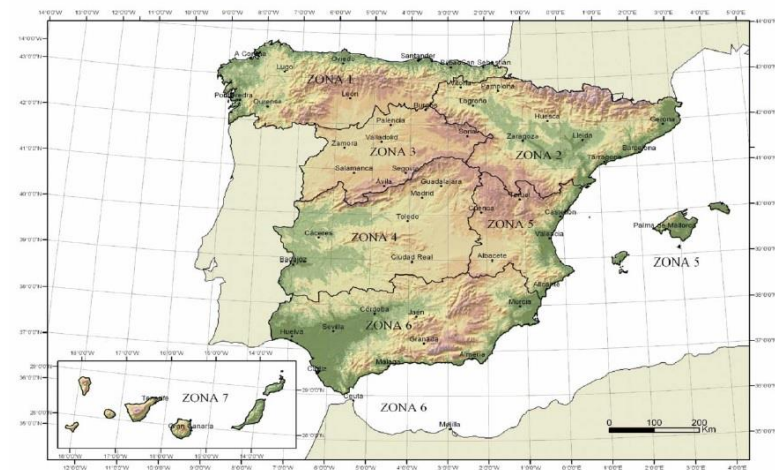


Figura E.2 Zonas climáticas de invierno

Imagen 34 Zonas climáticas de invierno (Estructural, 2008)



Respecto a la carga de nieve, de acuerdo con el apartado 3.5 Nieve, el valor de la carga se obtiene a partir de la expresión  $q = u \cdot s_k$ , donde  $u$  es el coeficiente de forma de la cubierta según 3.5.3; y  $s_k$  el valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal según 3.5.2. En el mapa de zonas climáticas, Algeciras corresponde con la zona 6 (Imagen 34). Sabiendo que dicha ciudad se encuentra a 20m sobre el nivel del mar, se establece un coeficiente  $s_k = 0,2$ . Al tratarse de una cubierta plana (inferior a  $30^\circ$ )  $u = 1$ . Por tanto,  $q = 1 \cdot 0,2 = 0,2 \text{ kN/m}^2$  (Imagen 35).

La acción de viento, en general una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto, o presión estática,  $q_e$ , puede expresarse como:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

Siendo:

*" $q_b$  la presión dinámica del viento. De forma simplificada, como valor en cualquier punto del territorio español, puede adoptarse  $0,5 \text{ kN/m}^2$ . Pueden obtenerse valores más precisos mediante el anejo D, en función del emplazamiento geográfico de la obra.*

*$c_e$  el coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado, en función del grado de aspereza del entorno donde se encuentra ubicada la construcción.*

*$c_p$  el coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento, y en su caso, de la situación del punto respecto a los bordes de esa superficie; un valor negativo indica succión."* (DBSE-AE, 2009)

Para el cálculo de la presión dinámica del viento, obtenemos del anejo D, el valor básico de la velocidad del viento correspondiente a la ciudad de Algeciras. Del cual podemos obtener directamente el valor de la presión dinámica. En este caso  $q_b = 0,52 \text{ kN/m}^2$  (Zona C) como se observa en la imagen 36.

Tabla E.2 Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal ( $\text{kN/m}^2$ )

Altitud (m)	Zona de clima invernal, (según figura E.2)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
200	0,5	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
400	0,6	0,6	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2
500	0,7	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2
600	0,9	0,9	0,3	0,5	0,5	0,4	0,2
700	1,0	1,0	0,4	0,6	0,6	0,5	0,2
800	1,2	1,1	0,5	0,8	0,7	0,7	0,2
900	1,4	1,3	0,6	1,0	0,8	0,9	0,2
1.000	1,7	1,5	0,7	1,2	0,9	1,2	0,2
1.200	2,3	2,0	1,1	1,9	1,3	2,0	0,2
1.400	3,2	2,6	1,7	3,0	1,8	3,3	0,2
1.600	4,3	3,5	2,6	4,6	2,5	5,5	0,2
1.800	-	4,6	4,0	-	-	9,3	0,2
2.200	-	8,0	-	-	-	-	-

Imagen 35 Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal (Estructural, 2008)



Imagen 36 Valor básico de la velocidad del viento,  $V_s$  (DBSE-AE, 2009)

El coeficiente de exposición,  $c_e$ , para alturas sobre el terreno,  $z$ , no mayores de 200 m, puede determinarse con la expresión:

$$c_e = F \cdot (F + 7 k)$$

$$F = k \ln (\text{máx. } (z,Z) / L)$$

Teniendo en cuenta la imagen 37 y aplicando la fórmula, se obtiene:

$$F = 0.22 \ln (\text{máx. } (11.10, 5) / 0.3) = 0.7944$$

$$c_e = 0.7944 \cdot (0.7944 + 7 \cdot 0.22) = 1.8544$$

El coeficiente de presión se obtiene en función de la forma de la cubierta, en este caso se considerará una cubierta esférica, por lo que el valor de succión será de -0.6 y el de presión de 0. La carga de succión se aplicará en 2 de las 8 partes en que se divide la cubierta.

## CARGAS ACCIDENTALES

Según la norma del NCSE-02, se especifica que ésta "no es de aplicación obligatoria en los casos de edificaciones de importancia normal o especial cuando la aceleración sísmica básica sea inferior a 0.04g, siendo  $g$  la aceleración de la gravedad."

La norma establece que "un edificio de importancia normal es aquel cuya destrucción por el terremoto, pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio para la colectividad, o producir importantes pérdidas económicas, sin que en ningún caso se trate de un servicio imprescindible ni pueda dar lugar a efectos catastróficos, siendo estos últimos los edificios englobados en la categoría de importancia especial." (NCSE-02, 2002)

En la imagen 38, correspondiente al mapa de peligrosidad sísmica, en Algeciras donde la aceleración básica es 0.04g.

Tabla D.2 Coeficientes para tipo de entorno

Grado de aspereza del entorno	Parámetro		
	k	L (m)	Z (m)
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	0,156	0,003	1,0
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	0,17	0,01	1,0
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	0,19	0,05	2,0
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	0,22	0,3	5,0
V Centro de negocios de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	0,24	1,0	10,0

Imagen 37 Coeficientes para tipos de entornos (DBSE-AE, 2009)

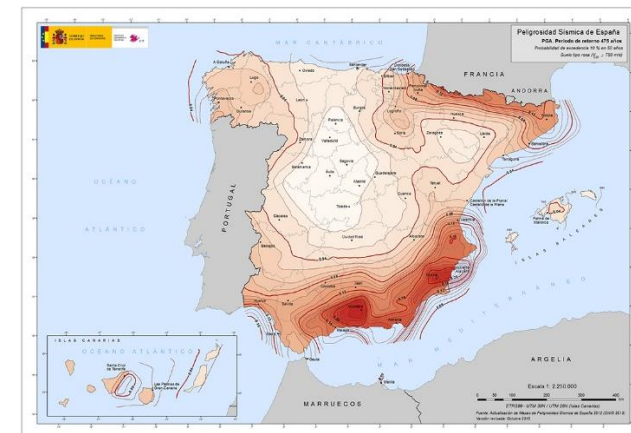


Imagen 38 Mapa de peligrosidad sísmica (NCSE-02, 2002)

PLANTA	ACCIONES PERMANENTES	ACCIONES VARIABLES	ACCIONES DE NIEVE
Cubierta	Architrave2015©	1 kN/m <sup>2</sup>	0,2 kN/m <sup>2</sup>

Tabla resumen 1

Se debería de considerar la carga sísmica pero a efectos de este trabajo, no se tendrá en cuenta, ya que la carga no va a ser representativa y por la suficiente envergadura del trabajo, queda abierta la posibilidad de realizar una ampliación sobre el efecto de ésta.

## CARGAS DE TESADO DE CABLES

Al no encontrar el valor exacto de las fuerzas de tesado de los cables, se estableció una carga unitaria y se fue multiplicando por un coeficiente para conseguir que las deformaciones verticales fuesen próximas a cero, de este modo, evitar que la cúpula se despegase. Para ello se debían de obtener valores similares pero de sentido contrario en la HIP01 y en la HIP04.

Jugando con las hipótesis para alcanzar el objetivo, se estableció la fuerza de tesado en Architrave 2015<sup>®</sup> y se realizó en el modelo de AutoCad 2017<sup>®</sup>. Los valores se facilitarán en el apartado de análisis.

## COMBINACIÓN DE CARGAS

Siendo:

HIP01: Cargas permanentes: peso propio

HIP02: Cargas variables: sobrecarga de uso

HIP03: Cargas variables: sobrecarga de nieve

HIP04: Cargas permanentes: tesado cables (efecto favorable)

HIP05: Cargas variables: sobrecarga de viento

La combinación de cargas y los coeficientes de ponderación que se les aplica, se obtienen de la aplicación del DBSE (Imagen 39, 40 y 41).

Se establecen diferentes combinaciones de cargas teniendo en cuenta los Estados Límite Últimos (ELU) y los Estados Límite de Servicio (ELS).

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

es decir, considerando la actuación simultánea de:

- todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ( $\gamma_G \cdot G_k$ ), incluido el pretensado ( $\gamma_P \cdot P$ );
- una acción variable cualquiera, en valor de cálculo ( $\gamma_Q \cdot Q_k$ ), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
- el resto de las acciones variables, en valor de cálculo de combinación ( $\gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q_k$ ).

Imagen 39 Combinación de cargas (Básico, 2009)

**Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones**

Tipo de verificación <sup>(1)</sup>	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
		<b>desestabilizadora</b>	<b>estabilizadora</b>
Estabilidad	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

<sup>(1)</sup> Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

Imagen 40 Coeficientes parciales de seguridad (Básico, 2009)

**Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad ( $\psi$ )**

	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		<sup>(1)</sup>	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

<sup>(1)</sup> En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

Imagen 41 Coeficientes de simultaneidad (Básico, 2009)

**ELU:****Combinación de acciones permanentes + variables gravitatorias**

ELU-01, uso como variable principal:

$$1,35*HIP1 + 0,90 *HIP4 + 1,50*HIP2 + (1,50*0,5)*HIP3$$

ELU-02, nieve como variable principal:

$$1,35*HIP1 + 0,90 *HIP4 + (1,50*0,7)*HIP2 + 1,50*HIP3$$

**Combinación de todas las acciones**

ELU-03, uso como variable principal:

$$1,35*HIP1 + 0,90 *HIP4 + 1,5*HIP2 + (1,5*0,5)*HIP3 + (1,5*0,6)*HIP5$$

ELU-04, nieve como variable principal:

$$1,35*HIP1 + 0,90 *HIP4 + (1,5*0,7)*HIP2 + 1,50*HIP3 + (1,5*0,6)*HIP5$$

ELU-05, viento como variable principal:

$$1,35*HIP1 + 0,90 *HIP04 + (1,5*0,7)*HIP2 + (1,5*0,5)*HIP3 + 1,5*HIP5$$

Nota: 1,35 / 1,50 son los coeficientes de mayoración y 0,7 / 0,6 / 0,5 los coeficientes de simultaneidad

**E.L.S:****Combinación de acciones permanentes + variables gravitatorias**

ELU-01, uso como variable principal:

$$1,00*HIP1 + 0,90 *HIP4 + 1,00*HIP2 + (1,00*0,5)*HIP3$$

ELU-02, nieve como variable principal:

$$1,00*HIP1 + 0,90 *HIP4 + (1,00*0,7)*HIP2 + 1,00*HIP3$$

**Combinación de todas las acciones**

ELU-03, uso como variable principal:

$$1,00*HIP1 + 0,90 *HIP4 + 1,0*HIP2 + (1,0*0,5)*HIP3 + (1,0*0,6)*HIP5$$

ELU-04, nieve como variable principal:

$$1,00*HIP1 + 0,90 *HIP4 + (1,0*0,7)*HIP2 + 1,00*HIP3 + (1,0*0,6)*HIP5$$

ELU-05, viento como variable principal:

$$1,00*HIP1 + 0,90 *HIP4 + (1,0*0,7)*HIP2 + (1,0*0,5)*HIP3 + 1,0*HIP5$$

---

# ANÁLISIS DE RESULTADOS



## ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS DISTINTOS MODELOS

Antes de hacer el estudio detallado del edificio en particular se realizará un pequeño análisis de los distintos modelos simplificados planteados anteriormente.

Como se puede observar en las distintas alternativas al Mercado de Algeciras, son lógicas las tensiones negativas, es decir de compresión en un elemento superficial laminar. En cambio, en la dirección radial, existen algunos puntos con tensiones de tracción, tensiones positivas.

Todas las tensiones de la cúpula se acumulan en unos puntos estratégicos, los pilares. Al acercarse a éstos, aparecen tensiones mayores de tracción.

En cuanto a las deformaciones del modelo simplificado de cúpula laminar, se aprecia que al no tener los pilares atados, la estructura se achata.

En la imagen 43 se determina cuáles son las deformaciones Dz en cada punto. Se observa, que las deformaciones son mayores en el vano entre pilares, mientras que se reducen si nos acercamos a éstos.

Los valores máximos que se obtienen son de -47.98 cm, mientras que los mínimos son de 0.92 cm, siendo esta última la única deformación positiva (contraria a la dirección de la gravedad) existente en el modelo.

Teniendo en cuenta que las tensiones Sx correspondientes a las tensiones radiales, imagen 44, se observa que el valor máximo negativo que se obtiene es de -40.29 N/mm<sup>2</sup>. En cambio, el valor máximo positivo que se obtiene es de 21.47 N/mm<sup>2</sup> que aparece en puntos singulares como son los pilares.

Los valores medios oscilan entre -1 y -1.3 N/mm<sup>2</sup>.

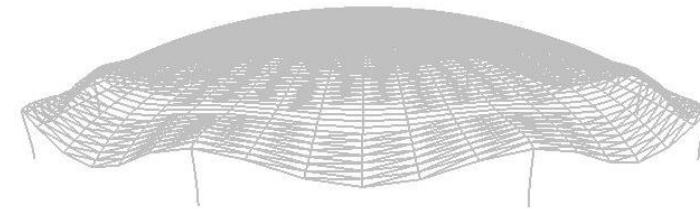


Imagen 42 Deformada modelo cúpula laminar Architrave 2015©

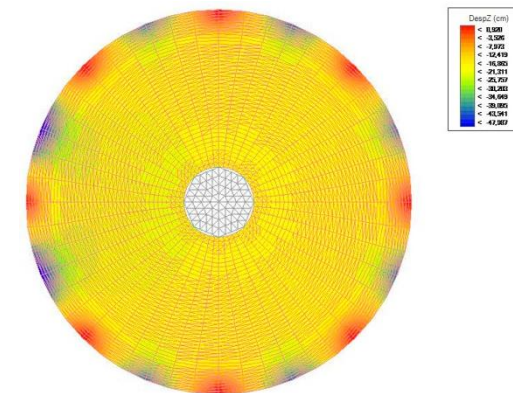


Imagen 43 Mapa de colores Dz modelo cúpula laminar Architrave 2015©

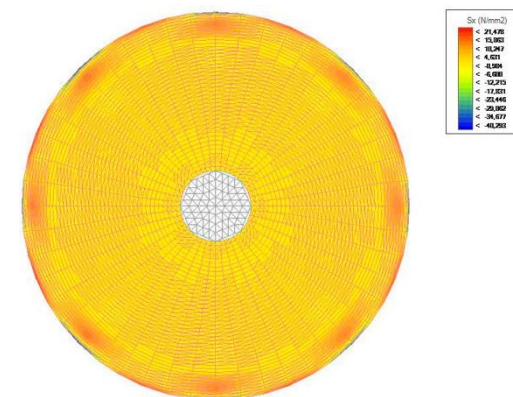


Imagen 44 Mapa de colores Sx modelo cúpula laminar Architrave 2015©

En el modelo de anillo perimetral, como se puede observar en la imagen 45, las deformaciones son menores ya que el anillo actúa como tensor entre los pilares.

En la imagen 46 se determina cuáles son las deformaciones  $Dz$  en cada punto. Se observa, que las deformaciones son mayores en la intersección entre la cúpula general y el anillo cuando no existe pilar, mientras que se reducen en puntos singulares como son los pilares.

Los valores máximos que se obtienen son de  $-4.22$  cm, siendo los mínimos de  $0.083$  cm, siendo esta última la única deformación positiva (contraria a la dirección de la gravedad) existente en el modelo.

Los valores medios de las deformaciones verticales varían entre  $-1$  y  $-3$  cm.

Como ya se sabe las tensiones  $Sx$  correspondientes a las tensiones radiales, imagen 47 y se observa que el valor máximo negativo que se obtiene es de  $-12.92$  N/mm<sup>2</sup> en los alrededores del anillo. En cambio, el valor máximo positivo que se obtiene es de  $30.45$  N/mm<sup>2</sup> que aparece en puntos singulares como son los pilares.

Los valores medios de dichas tensiones oscilan entre  $-1$  y  $-1.5$  N/mm<sup>2</sup>.

Como se puede apreciar en la imagen, las compresiones efectuadas sobre la cúpula, zonas de color azul, harán que en algunos puntos específicos, el anillo experimente tracciones levantando dichas superficies, zonas de color rojo.

Las zonas de color amarillo representan los puntos donde la cúpula se achata descendiendo verticalmente.

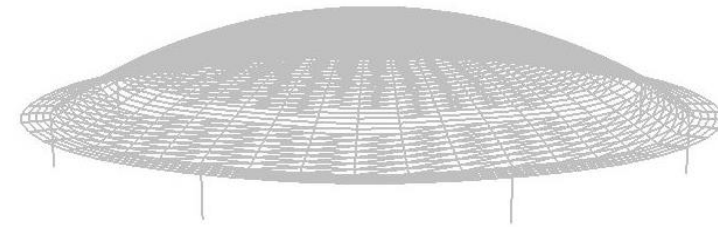


Imagen 45 Deformada modelo anillo perimetral Architrave 2015<sup>©</sup>

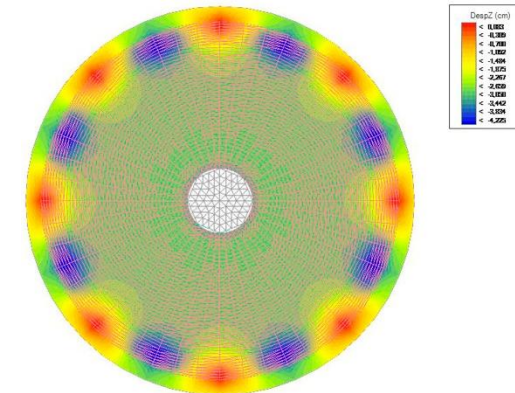


Imagen 46 Mapa de colores  $Dz$  modelo anillo perimetral Architrave 2015<sup>©</sup>

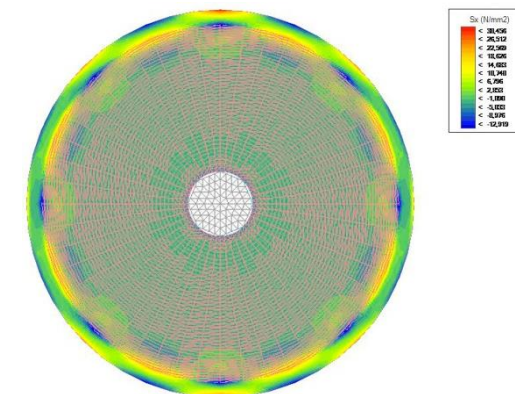


Imagen 47 Mapa de colores  $Sx$  modelo anillo perimetral Architrave 2015<sup>©</sup>

En cuanto a las deformaciones del modelo de láminas plegadas, ocurre algo similar al de la cúpula sin anillo perimetral, como se puede apreciar en la imagen 48, al no tener los pilares atados, la estructura se achata.

En la imagen 49 se determina cuáles son las deformaciones  $Dz$  en cada punto. Se observa, que las deformaciones son mayores en el centro la cúpula, mientras que se reducen conforme se acerca al borde perimetral.

Los valores máximos que se obtienen son de  $-34.72$  cm, siendo los mínimos de  $1.93$  cm, siendo esta última la única deformación positiva (contraria a la dirección de la gravedad) existente en el modelo. Los valores medios de las deformaciones verticales varían entre  $-20$  y  $-34$  cm.

Como ya se sabe las tensiones  $Sx$  correspondientes a las tensiones radiales, imagen 50 y se observa que el valor máximo negativo que se obtiene es de  $-17.85$  N/mm<sup>2</sup> en los apoyos.

En cambio, el valor máximo positivo que se obtiene es de  $30.32$  N/mm<sup>2</sup> que aparece en puntos singulares. Los valores medios de dichas tensiones oscilan entre  $0.3$  y  $-5$  N/mm<sup>2</sup>.

En el modelo de las láminas plegadas, a diferencia de los otros, se producen tensiones de tracción, derivadas de la flexión de las láminas.

Por lo tanto, se llega a la conclusión de que se necesita cualquier elemento estructural bien sea el anillo o los tirantes tesados capaces de sostener a los pilares y limitar dichos desplazamientos.

Si no fuera por la colocación de dichos elementos, sería necesario aumentar la sección de los pilares para controlar la deformación por flexión.

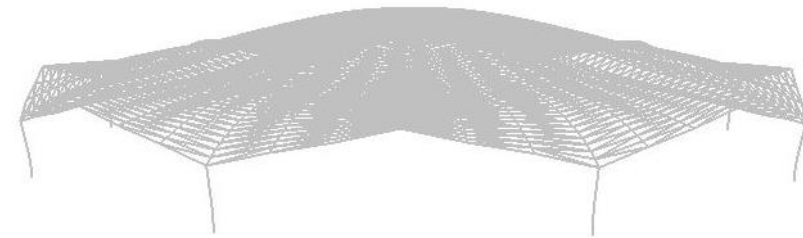


Imagen 48 Deformada modelo láminas plegadas Architrave 2015<sup>©</sup>

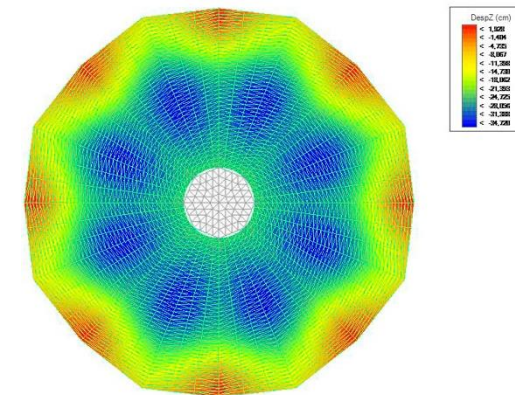


Imagen 49 Mapa de colores Dz modelo láminas plegadas Architrave 2015<sup>©</sup>

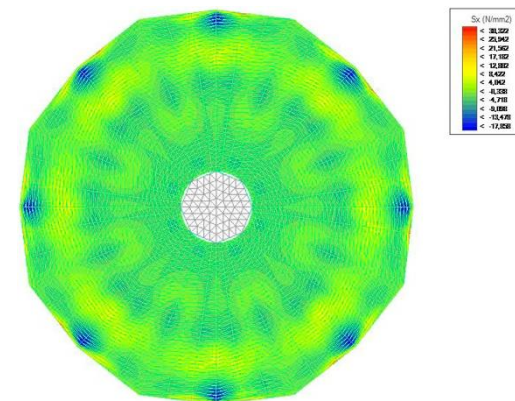


Imagen 50 Mapa de colores Sx modelo láminas plegadas Architrave 2015<sup>©</sup>



## ESTUDIO DE RESULTADOS DEL MODELO

Una vez realizado el modelo informático con las simplificaciones correspondientes y con las cargas aplicadas, se procede a obtener los resultados mediante el programa informático Architrave 2015<sup>©</sup>. Con esta aplicación informática obtenemos los valores de las tensiones, de los momentos flectores, axiles y cortantes, así como la deformación que se producirá en la estructura.

El conjunto de la estructura está formado por 3 elementos estructurales: cúpula, tensores y pilares. Se analizarán los resultados más importantes y significativos según el elemento estructural que se esté analizando.

Tanto los tensores como los pilares son los únicos elementos modelados como barras, por lo que se analizarán las sollicitaciones más significativas en elementos lineales: axil, cortante y momentos. En todas las piezas que componen la estructura conviene estudiar también la deformación producida, y su relación con las sollicitaciones actuantes.

### DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS DE TESADO

Estableciendo una carga unitaria en el modelo de Architrave 2015<sup>©</sup> y multiplicándola por un coeficiente en el análisis, se alcanzó la situación de un desplazamiento vertical prácticamente cero utilizando las hipótesis de peso propio y tesado, éstas dos, los desplazamientos de cada una de ellas, debían de ser iguales pero de signo contrario, este hecho, es el causante del despegue de la lámina con el encofrado como ya se ha nombrado anteriormente. Con ello, se estableció una fuerza de tesado de 1275 kN que se trasladó a AutoCad 2017<sup>©</sup> para completar el modelo.



Imagen 51 Mercado de Algeciras (Falconaumanni, 2010)

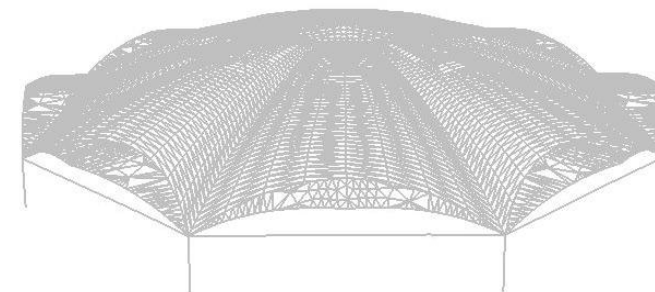


Imagen 52 Deformada Mercado de Algeciras Architrave 2015<sup>©</sup>

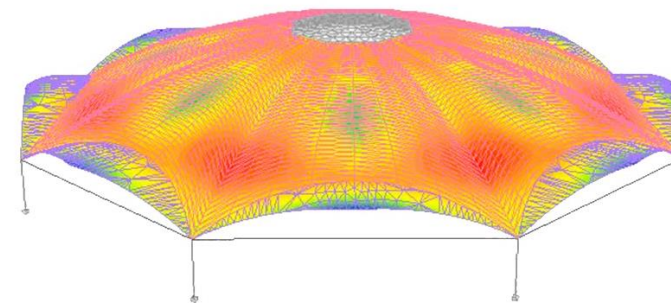


Imagen 53 Isovalores de la deformada del Mercado de Algeciras Architrave 2015<sup>©</sup>

## ANÁLISIS DE LA CUBIERTA (HIP01)

En primer lugar se analizará la hipótesis 1, referida al peso propio de la estructura. En esta combinación no se tendrán en cuenta los tensores de atado de las cabezas de los pilares.

El estudio de las deformaciones se pueden observar en la imagen 48, en ella se ve como la cúpula desciende verticalmente, achatándose y los pilares se abren lateralmente. Todo ello es debido a que no se tienen en cuenta las fuerzas de los tensores.

A continuación, se estudiará el mapa de colores de la deformada Dz. En la imagen 55 se determina cuáles son las deformaciones en cada punto. Se observa, que las deformaciones son mayores cerca del encuentro entre las bóvedas y la cúpula y disminuyen conforme se acercan al lucernario. Las propias bóvedas ofrecen desplazamientos verticales prácticamente nulos.

Los valores máximos que se obtienen son de -3.23 cm, mientras que los mínimos son de 0.067 cm, siendo esta última la única deformación positiva (contraria a la dirección de la gravedad) existente en el modelo, ya que el resto son deformaciones negativas (en la dirección de la gravedad).

Como se puede apreciar en la imagen, las compresiones efectuadas sobre la cúpula, zonas de color azul, harán que el volado del contorno exterior experimente tracciones levantando dichas superficies, zonas de color rojizo.



Imagen 54 Deformada HIP01: Peso Propio Architrave 2015<sup>©</sup>

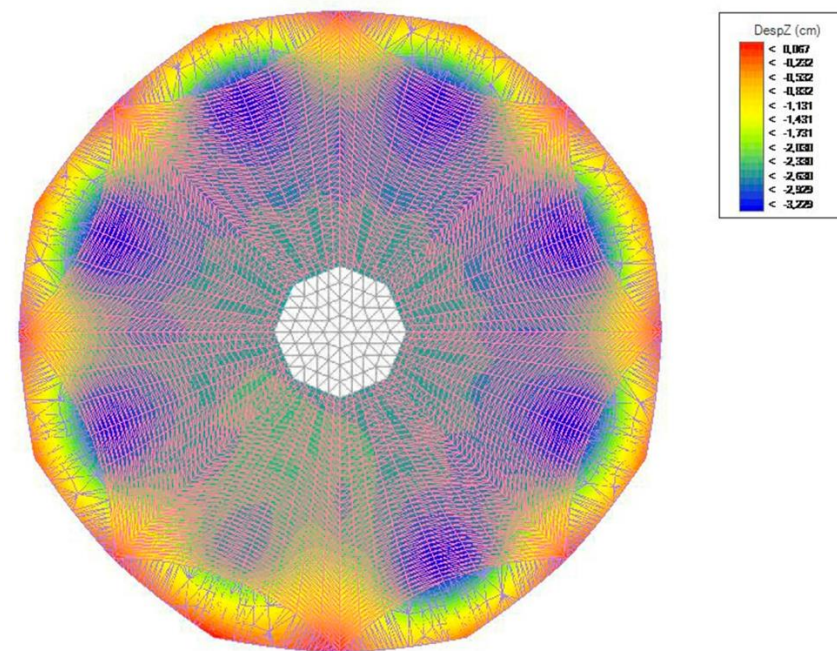


Imagen 55 Mapa de colores Dz, HIP01: Peso Propio Architrave 2015<sup>©</sup>

## ANÁLISIS DE LA CUBIERTA (HIP04)

En segundo lugar, se analizará la hipótesis 4, referida a la fuerza de los tensores de la estructura. En esta combinación no se tendrá en cuenta el peso propio de la estructura.

Como ya se ha comentado anteriormente, la fuerza de tesado se calculó mediante una carga unitaria en el modelo de Architrave 2015<sup>®</sup> que se multiplicó por un coeficiente para conseguir un desplazamiento vertical prácticamente nulo.

Con ello, se obtuvo una fuerza de tesado de 1275 kN que se trasladó a AutoCad 2017<sup>®</sup> para completar el modelado. Una vez realizado el modelado, se exportó a Architrave 2015<sup>®</sup> para obtener los valores correspondientes, de manera que la combinación de la HIP01 y la HIP04 dieran un resultado de deformación vertical igual o prácticamente cero.

En la imagen 56, se aprecia las deformaciones referidas a la HIP04, en este caso, ocurrirá lo contrario que en la combinación anterior, los pilares se van a cerrar y la cúpula experimentará un ascenso vertical.

A continuación, se estudiará el mapa de colores de la deformada Dz. En la imagen 57 se determina cuáles son las deformaciones en cada punto. Se observa, que las deformaciones son mayores cerca del encuentro entre las bóvedas y la cúpula y disminuyen conforme se acercan al lucernario.

Los valores máximos que se han obtenido son de 3.23 cm, mientras que los mínimos son de -0.238 cm, siendo esta última la única deformación negativa existente en el modelo, ya que el resto son deformaciones positivas. Como se puede comprobar ambas hipótesis establecen los mismos valores máximos pero de signo contrario. Estos valores, sirven para la justificación de la fuerza de los cables tanto en efecto como en valor.

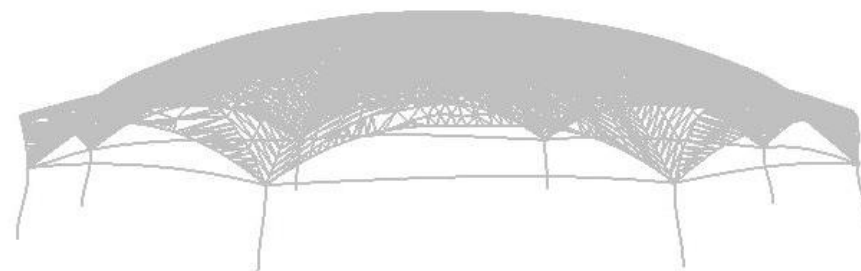


Imagen 56 Deformada HIP04: Fuerzas de Tesado Architrave 2015<sup>®</sup>

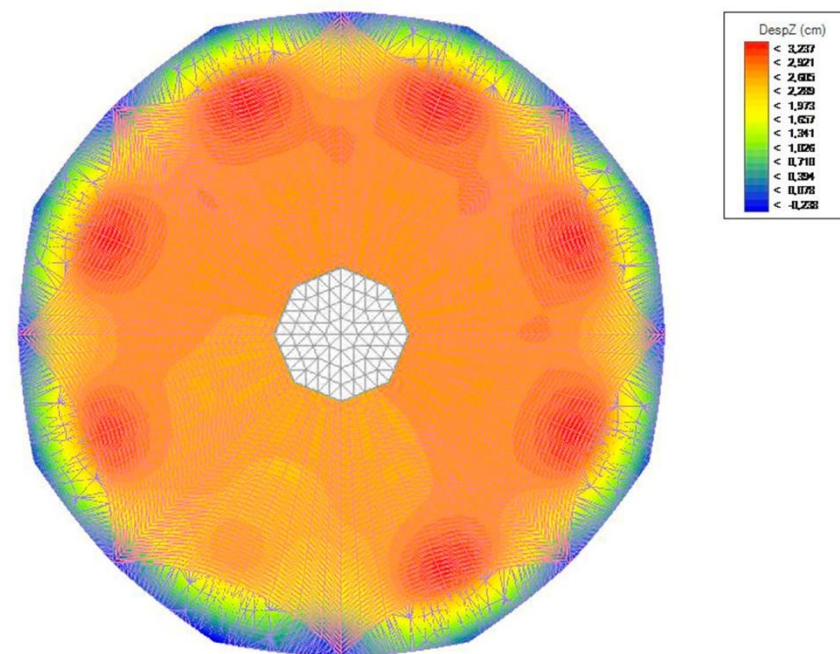


Imagen 57 Mapa de colores Dz, HIP04: Fuerzas de Tesado (ELS) Architrave 2015<sup>®</sup>

### ANÁLISIS DE LA CUBIERTA (HIP01 + HIP04)

En tercer lugar, se analizará una combinación de hipótesis que se compone de la hipótesis 1 y la hipótesis 4, referidas al peso propio y a la fuerza de los tensores respectivamente (ambas sin mayorar). Al combinar ambas hipótesis, se contrarrestarán tanto los desplazamientos verticales ascendentes como las descendentes, de manera que las deformaciones finales en la cúpula serán prácticamente cero.

A continuación, se estudiará el mapa de colores de la deformada Dz. En la imagen 58 se determina cuáles son las deformaciones en cada punto. Se observa como las deformaciones son muy pequeñas en toda la superficie de la cúpula. Los valores máximos que se han podido alcanzar son de -0.17 cm en los vuelos de las bóvedas de intersección, mientras que los mínimos son de 0.137 cm cerca de los encuentros con los pilares.

Las deformaciones en el centro de la cúpula son negativas lo que hace que la cúpula se despegue del encofrado.

### ANÁLISIS DE LA CUBIERTA (Cargas gravitatorias)

En cuarto lugar, se analizará la combinación de hipótesis ELU-01, ELU-02, ELS-01 y ELS-02, que se compone de la hipótesis 1, 2, 3 y la 4, referidas al peso propio, sobrecarga de uso, sobrecarga de nieve y a la fuerza de los tensores respectivamente. Los coeficientes de mayoración de cada combinación se han indicado en el capítulo dedicado a la asignación de cargas.

Como se observa en la imagen 59, las deformaciones en el modelo del Mercado son muy pequeñas. Los valores máximos que se han obtenido son de -1.62 cm en algunos tramos de la superficie de la cúpula, mientras que los mínimos son de -0.024 cm (próximos a cero) en el encuentro de la cúpula con los pilares.

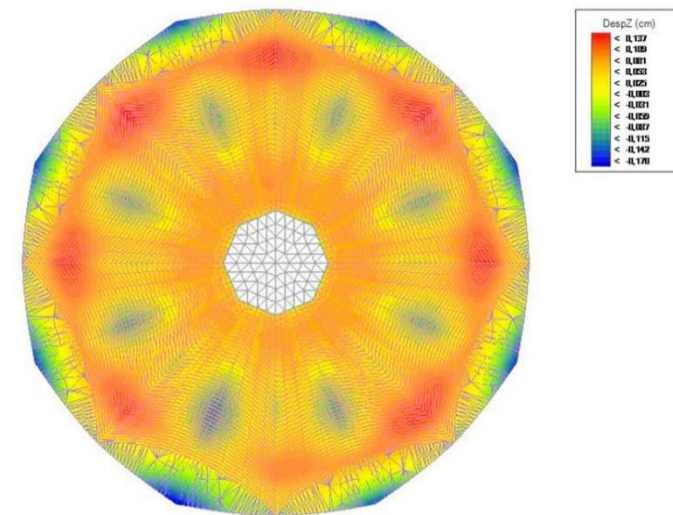


Imagen 58 Mapa de colores Dz, HIP: Peso Propio + Fuerzas de Tesado (ELS)  
Architrave 2015©

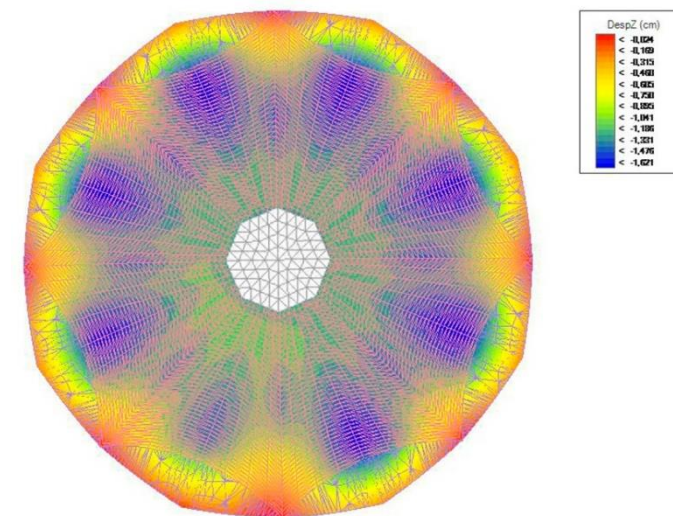


Imagen 59 Mapa de colores Dz, HIP: Peso Propio + Tesado + Uso + Nieve (ELS)  
Architrave 2015©

A continuación, en las imágenes 60, 61 y 62 se analizarán los valores de las tensiones  $S_x$ ,  $S_y$  y Von Misses respectivamente. Dicho estudio se ha realizado mediante la combinación ELU.

Habrá que tener en cuenta que las tensiones  $S_x$  corresponden a las tensiones radiales, mientras que las tensiones  $S_y$  se caracterizan por ser los paralelos del modelo de la cúpula.

En cuanto a las tensiones  $S_x$ , se observa que el valor máximo negativo que se obtiene es de  $-3 \text{ N/mm}^2$  por lo que es muy pequeño en comparación a la resistencia característica del hormigón y por tanto, la propia lámina, por sí misma, sin armado, sería suficiente.

En cambio, el valor máximo positivo que se obtiene es de  $4.75 \text{ N/mm}^2$  y aparece en puntos singulares como son los encuentros entre la cúpula y las bóvedas de intersección. Frente a estos valores, la lámina por sí sola no sería suficiente y se debería de armar. Los valores medios oscilan entre  $-0.5$  y  $-1.5 \text{ N/mm}^2$ .

Respecto a las tensiones  $S_y$ , el valor máximo negativo que se alcanza es de  $-8.99 \text{ N/mm}^2$  y sucedería lo mismo que en el caso anterior.

Y el valor máximo positivo que se tiene es de  $11.49 \text{ N/mm}^2$  pero en este caso, se concentra en los pilares. Frente a estos valores, la lámina por sí sola tampoco sería suficiente y se debería de armar. Los valores medios comprenden entre  $-0.5$  y  $-1.5 \text{ N/mm}^2$ .

Por último, en las tensiones de comparación de Von Misses sólo se encuentran valores positivos, estableciendo su valor máximo en  $10.81 \text{ N/mm}^2$ , mientras que su valor mínimo será de  $0.065 \text{ N/mm}^2$ . En este caso, sus valores medios rondan entre  $1$  y  $1.3 \text{ N/mm}^2$ .

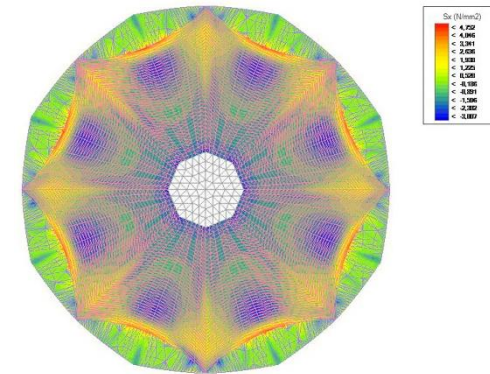


Imagen 60 Mapa de colores  $S_x$ , HIP: Peso Propio + Tesado + Uso + Nieve (ELU)

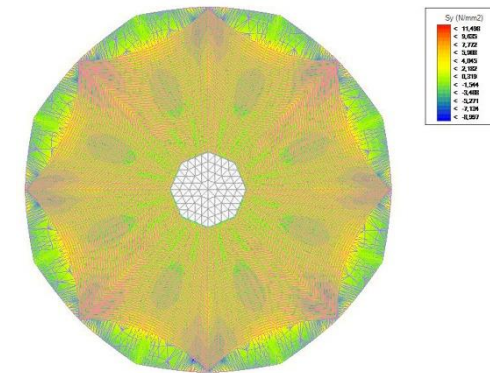


Imagen 61 Mapa de colores  $S_y$ , HIP: Peso Propio + Tesado + Uso + Nieve (ELU)

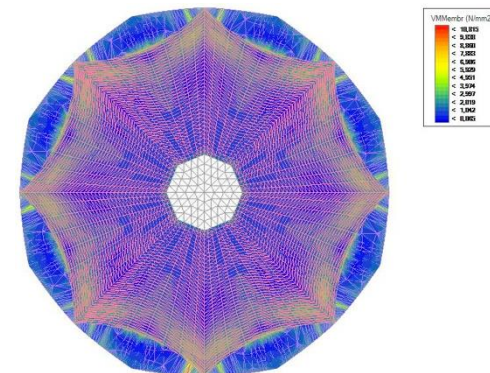


Imagen 62 Mapa de colores  $\sigma_{co}$ , HIP: Peso Propio + Tesado + Uso + Nieve (ELU)

## ANÁLISIS DE LA CUBIERTA (Cargas gravitatorias + Viento)

En quinto lugar, se analizará una combinación de hipótesis que se compone de la hipótesis 1, 2, 3, 4 y 5 referidas al peso propio, a la sobrecarga de uso, a la sobrecarga de nieve, a la fuerza de los tensores y a la sobrecarga de viento respectivamente.

Como se observa en la imagen 63, las deformaciones en el modelo estructural son muy pequeñas en su gran mayoría, dando valores muy cercanos a cero.

En el estudio del mapa de colores de la deformada Dz, los valores máximos que se han podido alcanzar son de -1.59 cm en algunos tramos de la superficie de la cúpula, mientras que los mínimos son de -0.016 cm en el encuentro de la cúpula con los pilares.

Prácticamente estos valores no cambian sustancialmente ya que, al ser la cúpula bastante achatada, el viento a efectos de cargas gravitatorias, es muy pequeño.

Como ya se ha comentado anteriormente, se puede apreciar en la imagen, cómo los efectos gravitatorios provocan compresiones (zonas azul marino) en la cúpula efectuando en ella el achatamiento y provocando en el perímetro tracciones que facilitan un pequeño levantamiento (zonas rojizas).

Mientras que observando el mapa de colores en Dx, como se muestra en la imagen 64, los valores máximos que se han podido obtener son de -0.985 cm en los encuentros con los pilares de la parte izquierda de la cúpula, mientras que los mínimos son de -0.183 cm en los encuentros de la cúpula con los pilares de la parte derecha.

En este diagrama, los valores mayoritarios oscilan entre -0.5 y -0.6 N/mm<sup>2</sup>.

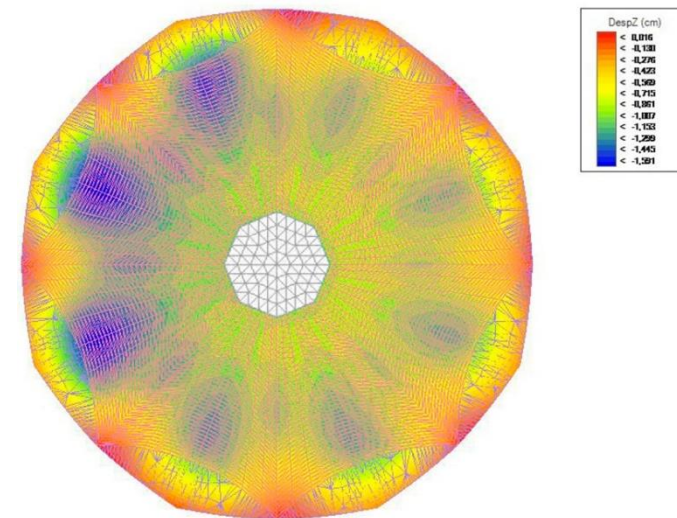


Imagen 63 Mapa de colores Dz, HIP: Cargas gravitatorias + Viento (ELS)  
Architrave 2015©

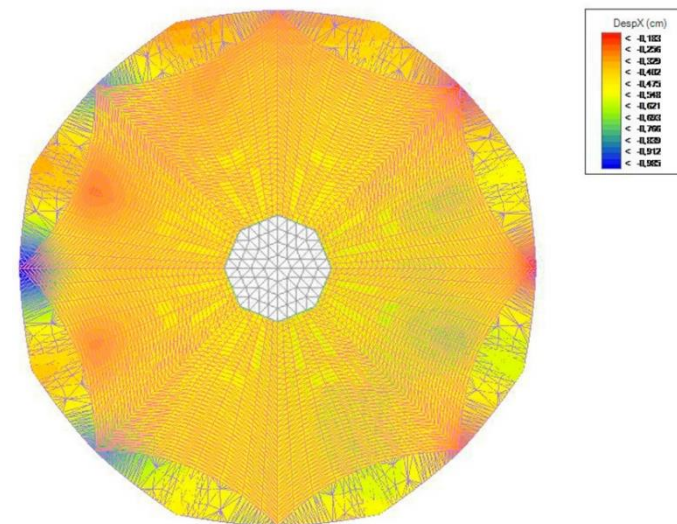


Imagen 64 Mapa de colores Dx, HIP: Cargas gravitatorias + Viento (ELS)  
Architrave 2015©

Por consiguiente, en las imágenes 65, 66 y 67 se analizarán los valores de las tensiones  $S_x$ ,  $S_y$  y Von Mises respectivamente. Dicho estudio se ha realizado mediante la combinación ELU.

Habría que tener en cuenta que las tensiones  $S_x$  corresponden a las tensiones radiales, mientras que las tensiones  $S_y$  se caracterizan por ser los paralelos del modelo de la cúpula.

Respecto a las tensiones  $S_x$ , se obtiene que el valor máximo negativos es de  $-2.70 \text{ N/mm}^2$  como es muy pequeño en comparación a la resistencia característica del hormigón, la propia lámina, por sí misma, sin armado, sería suficiente.

Por contra, el valor máximo positivo es de  $4.89 \text{ N/mm}^2$  y aparece en puntos singulares como son los encuentros entre la cúpula y las bóvedas de intersección. Frente a estos valores, la lámina por sí sola no sería suficiente y se debería de armar. Los valores medios oscilan entre  $-0.8$  y  $-1.5 \text{ N/mm}^2$ .

En cuanto a las tensiones  $S_y$ , el valor máximo negativo que se obtiene es de  $-7.37 \text{ N/mm}^2$  y la lámina sería suficiente para soportar los esfuerzos.

El valor máximo positivo que se obtiene es de  $8.74 \text{ N/mm}^2$  concentrada en los pilares. Frente a estos valores, la lámina por sí sola no sería suficiente y se debería de armar. Los valores medios comprenden entre  $-0.5$  y  $-1.5 \text{ N/mm}^2$ .

Por último, en las tensiones de comparación de Von Mises sólo aparecen valores positivos, siendo su valor máximo  $8.33 \text{ N/mm}^2$ , mientras que su valor mínimo es de  $0.065 \text{ N/mm}^2$ . En este caso, sus valores medios rondan entre  $0.8$  y  $1 \text{ N/mm}^2$ .

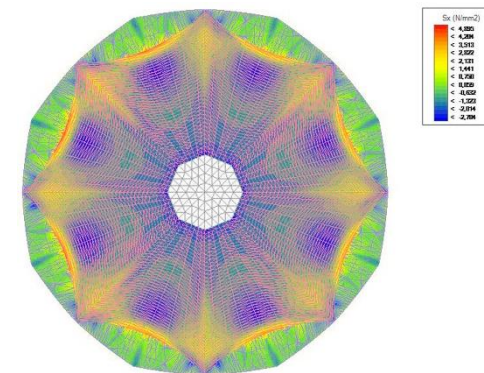


Imagen 65 Mapa de colores  $S_x$ , HIP: Cargas gravitatorias + Viento (ELU)

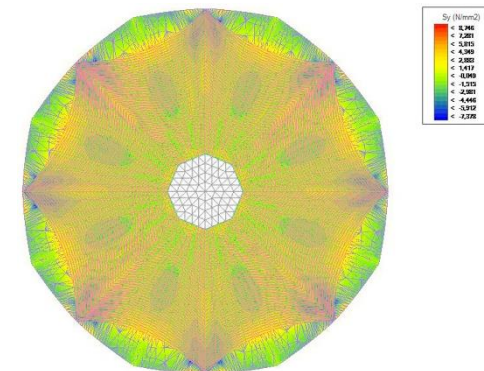


Imagen 66 Mapa de colores  $S_y$ , HIP: Cargas gravitatorias + Viento (ELU)

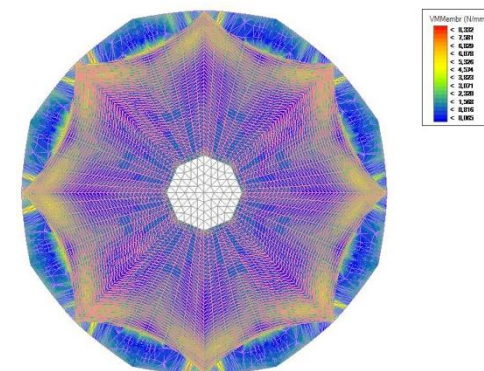


Imagen 67 Mapa de colores  $\sigma_{co}$ , HIP: Cargas gravitatorias + Viento (ELU)

## ANÁLISIS DE LOS PILARES

Los 8 soportes son elementos modelados como barras y no como elementos finitos. Como barras que son, los diagramas obtenidos son lineales, y no superficiales. Debido a la forma regular de la estructura, los 8 soportes tienen solicitaciones semejantes y deforman prácticamente igual, por lo que se analizará un único pilar y los resultados se extrapolarán a los 7 restantes.

En cuanto a las solicitaciones de axiles, los 8 pilares deben transmitir todo el peso de la cubierta y de los tensores hasta la cimentación. Toda esta estructura de hormigón armado tiene un gran peso, por lo que los axiles que debe de transmitir cada pilar son muy elevados, llegando a un máximo de 1294.825 KN como se puede observar en la imagen 68.

Los pilares tienen solicitación a cortante sólo en la dirección de la viga que sustentan, es decir, en dirección radial. El cortante es constante a lo largo de cada uno de los pilares llegando a un valor máximo de 595.274 KN como se ve en la imagen 69.

Al igual que ocurre con el cortante, los momentos solicitación solo afectan en la dirección radial del edificio, es decir, en la dirección longitudinal de las vigas. En la dirección perpendicular los momentos flectores son nulos.

Tal y como se observa en la imagen 70, la forma de los diagramas corresponde con la de un pilar común de una estructura habitual. Lo que sí que difiere notablemente son los valores, ya que en los pilares del Mercado de Algeciras, se alcanzan grandes momentos de hasta 1159.763 KN·m.

Teniendo en cuenta todas las solicitaciones anteriores, el programa Architrave 2015® ofrecerá una posible solución de armado para estos soportes.

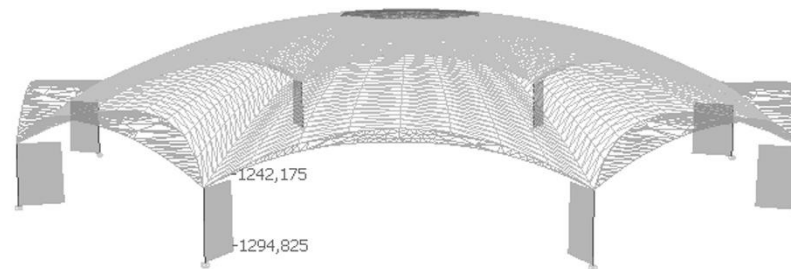


Imagen 68 Diagrama de axiles de los pilares Architrave 2015®

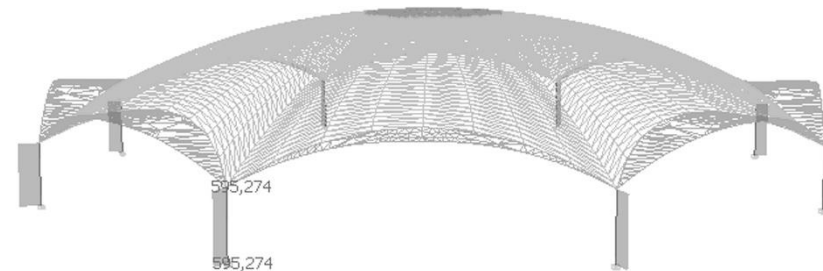


Imagen 69 Diagrama de los cortantes de los pilares Architrave 2015®

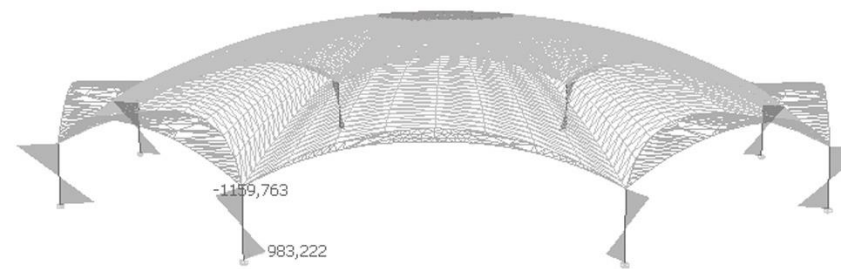


Imagen 70 Diagrama de los momentos de los pilares Architrave 2015®



Los soportes son los encargados de transmitir las cargas verticales hasta las zapatas. Cada soporte está formado por una parte portante de cargas y otra, separada de la anterior por una junta, de carácter exclusivamente formal, a la que está adosado el cerramiento de ladrillo de fachada.

La sección del pilar utilizada por Eduardo Torroja no es posible armarla en el programa Architrave 2015<sup>©</sup>, por tanto, se realizará una semejanza geométrica.

Se optará por la opción de semejanza cuadrada ya que cubre la mayor parte de la sección diseñada por Torroja. De esta manera, el armado será mucho más preciso e igualitario que el original pudiendo distribuir de mejor forma las armaduras en el interior.

Establecido el predimensionado de la sección del pilar donde se han considerados las hipótesis de carga de la envolvente para ELU, de las distintas combinaciones de carga estudiadas, se adapta dicha solución a la geometría del proyecto original de Torroja. De manera que, se emplearán 12 redondos de diámetro 25 como armadura superior e inferior con cercos de diámetro 8 separados cada 50 cm. Además se incluirán 6 cercos intermedios para aumentar la resistencia de la sección como se puede observar en la imagen 71.

La sección de 100 x 30 cm se realizará con hormigón armado y con barras de acero corrugadas ya que el programa no dimensiona con barras de fibra de vidrio como resuelve Torroja en su solución.

Como conclusión final, se podría realizar una simplificación de la sección del pilar de manera que fuese mucho más homogénea y fácil de ejecutar como se puede ver en la imagen 73.

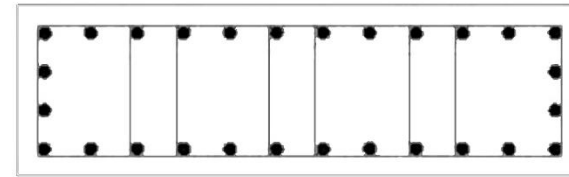


Imagen 71 Sección simplificada del pilar Architrave 2015<sup>©</sup>

ELU	Posición	Nd (kN)	Myd (mkN)	Mzd (mkN)	Nu (kN)	Myu (mkN)	Mzu (mkN)	Coefficiente
1	Superior	1.228,55	-61,43	-585,82	1.433,18	-71,16	-681,82	<b>0,86</b>
1	Inferior	1.281,20	64,06	492,60	1.791,91	89,07	687,49	<b>0,71</b>
2	Superior	1.240,25	62,01	-608,79	1.383,41	69,69	-680,84	<b>0,90</b>
2	Inferior	1.292,90	-222,71	527,84	1.614,57	-277,35	659,39	<b>0,80</b>

Imagen 72 Coeficientes de aprovechamiento Architrave 2015<sup>©</sup>

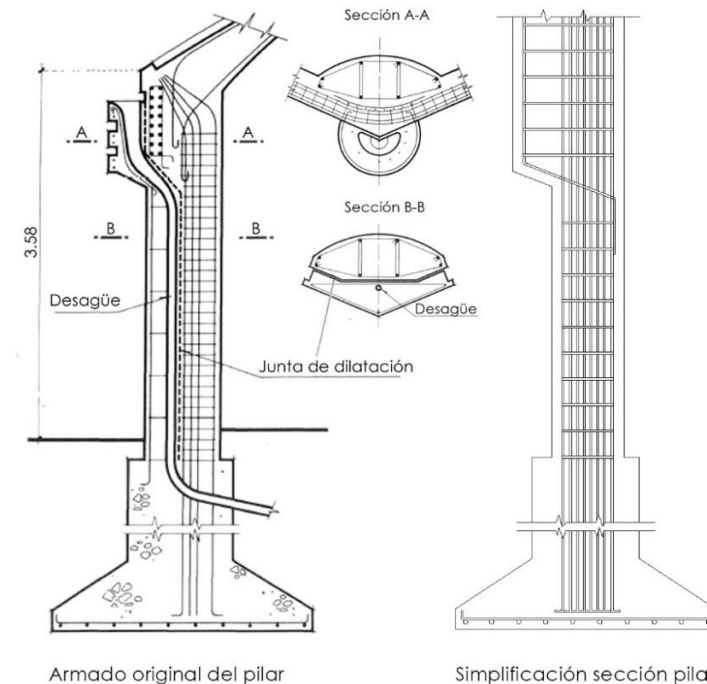


Imagen 73 Sección real y simplificada del pilar AutoCad 2017<sup>©</sup>

## ANÁLISIS DE LOS TENSORES

Sabiendo que el valor de la fuerza del pretensado, calculada anteriormente, es de 1275 kN y que el axil máximo que produce la cúpula sobre los tensores, teniendo en cuenta la combinación ELU que se compone del peso propio, la carga de nieve y la de uso y que por tanto está mayorada, es de 736.52 kN, como se muestra en la imagen 74; el axil total que deberá soportar dicho tirante será de 2011.52 kN.

Teniendo en cuenta de que el área es igual al cociente entre la fuerza axil y el límite elástico, podremos obtener un valor con el cual poder dimensionar el tensor del mercado de Algeciras.

A falta de información acerca del acero utilizado, se tomarán los datos del acero que utilizó en la Iglesia de Gandía, por tanto, suponiendo un acero de límite elástico  $f_{yk} = 1500 \text{ N/mm}^2$ , un tesado hasta el 90% del límite elástico y sabiendo que el axil total es de  $2011.52 \text{ kN} = 2011520 \text{ N}$  (Fenollosa, Serrano, Alonso, & Arnau, 2018)

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = (1500 \cdot 0.9) / 1.2 = 1125 \text{ N/mm}^2$$

$$\Omega = N_d / f_{yd} = 2011520 / 1125 = 1788 \text{ mm}^2$$

Una vez establecida el área, se dividirá entre 16, que son el número de varillas que usó Torroja. De manera que:

$$1788 / 16 = 111.75 \text{ mm}^2$$

$$\Omega = \pi \cdot r^2$$

$$r = \sqrt{\Omega / \pi} = 5.96 \text{ mm}$$

$$\varnothing = 11.92 \text{ mm}$$

Por lo tanto, optaremos por un diámetro de barra del 12, de manera que cumpla con los cálculos establecidos anteriormente.

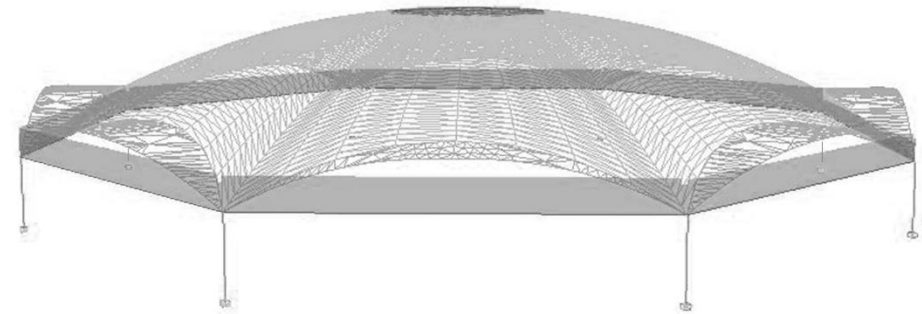


Imagen 74 Diagrama de axiles en los tensores Architrave 2015©



Imagen 75 Tensores (Fabra Abella, 2012)

---

CONCLUSIONES

---

En el trabajo realizado se ha explicado el funcionamiento estructural del Mercado de Algeciras de Eduardo Torroja y se ha comprobado su adecuación al proyecto y las intenciones buscadas por el arquitecto.

Recordando los objetivos principales, se pueden establecer cuatro apartados: primero, un estudio del contexto histórico, político y social de la ciudad de Algeciras y de Eduardo Torroja; segundo, la descripción del edificio desde un punto de vista funcional, espacial y de su integración en el entorno; tercero, la descripción de la estructura, su modelización y el funcionamiento de los elementos constructivos que la forman; y cuarto el análisis de los resultados obtenidos del cálculo estructural.

En cuanto al primer apartado, Eduardo Torroja contribuyó al avance de la ingeniería civil y prácticas estructurales. Ejemplos a destacar son: el Mercado de Algeciras, el Frontón de Recoletos, el Hipódromo de la Zarzuela y la Iglesia de San Nicolás.

El planteamiento de Eduardo Torroja era encontrar la mejor solución estructural tanto en términos de diseño como en funcionalidad.

Torroja reinterpretó la centralidad clásica para construir una cúpula a partir de una membrana de hormigón armado. A pesar de tratarse de un ingeniero, siempre estuvo muy ligado a la Arquitectura y defendía la necesidad de la cooperación de las dos disciplinas en el mundo de la construcción.

Respecto al segundo apartado, el edificio se configuraba como un elemento que ocupaba el espacio libre de la plaza pero que por la simplicidad, por su sencillez compositiva y por la apertura en todos sus sentidos, dotaba al edificio de un espacio público que forma parte del contexto urbano en el que se ubicaba.



*Imagen 76 Eduardo Torroja (España es Cultura, n.d.)*

Se trataba de una estructura singular, diferente de cualquier otra y con elementos estructurales complejos. Como se ha explicado, el volumen estaba definido por una cúpula esférica que se apoya sobre ocho soportes. En el centro, se sitúa la claraboya cenital, formada por triángulos prefabricados de hormigón armado. El borde exterior del casquete esférico estaba cortado por bóvedas cilíndricas. El enlace de estas bóvedas con el casquete sirvió para rigidizar los bordes de éste y para encauzar, hacia los soportes, las tensiones principales. Estas bóvedas periféricas avanzan en voladizo con dos funciones: una estructural como elemento de rigidización de la cúpula, y otro funcional cubriendo las puertas de acceso al mercado.

Lo que realmente Torroja pretendía era la construcción de una cubierta con la que proteger la instalación de un mercado, una sala totalmente diáfana, sin construcciones que interrumpiesen la percepción del espacio.

La estructura está formada básicamente por tres partes: los 8 pilares, los tensores que atan la cabeza de los soportes, y la cubierta que cubre todo el espacio interior. Los pilares son los encargados de recoger todas las cargas que se generan en el edificio y transmitir las a la cimentación y los tensores evitaban las grandes deformaciones de la cúpula.

La planta es un octógono de 18,20 m de lado, inscrito en una circunferencia de 23,88 m de radio, cubierto con una cúpula que salvaba una luz entre apoyos de 47,76 m formada por un casquete esférico de una circunferencia de 44,10 m de radio. La lámina tenía un espesor de 10 cm, lo que suponía una esbeltez de 470.

En la parte superior del domo hay una claraboya hecha de hormigón armado y paneles de cristal, con un diámetro de 9.1 m que contiene un total de 128 paneles con la forma de octágono.

Para estudiar el comportamiento de la lámina del Mercado de Algeciras de Eduardo Torroja, se realizó una modelización de la estructura mediante el programa informático AutoCad 2017®.

Los elementos que componen la estructura se trataron como elementos superficiales que se calcularon mediante el método de elementos finitos. Tanto los pilares como los tensores se modelizaron como barras ya que funcionaban como tal.

A estos elementos, se les asignó propiedades geométricas y mecánicas e insertó entidades gráficas diversas que simbolizaban las acciones y apoyos mediante la aplicación de Architrave 2015®.

Como el programa Architrave 2015® no incluye el hormigón HA-15, hormigón que empleó Torroja en la construcción del mercado. Se generó un nuevo material con las correspondientes propiedades mecánicas.

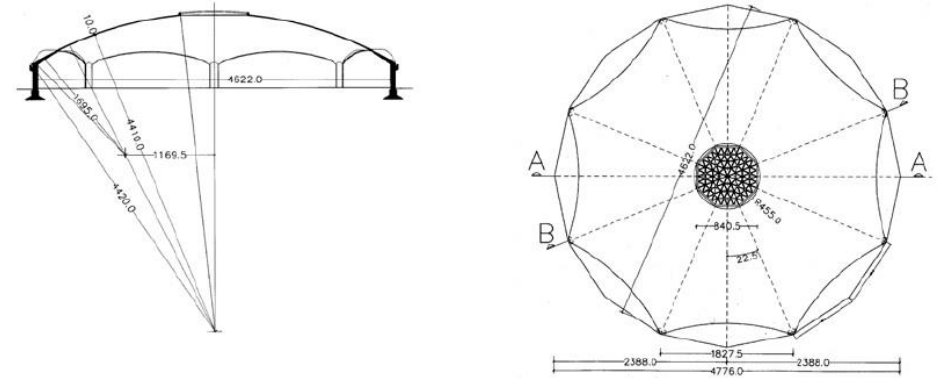


Imagen 77 Dimensiones estructura (Antuña Bernardo, 2002)

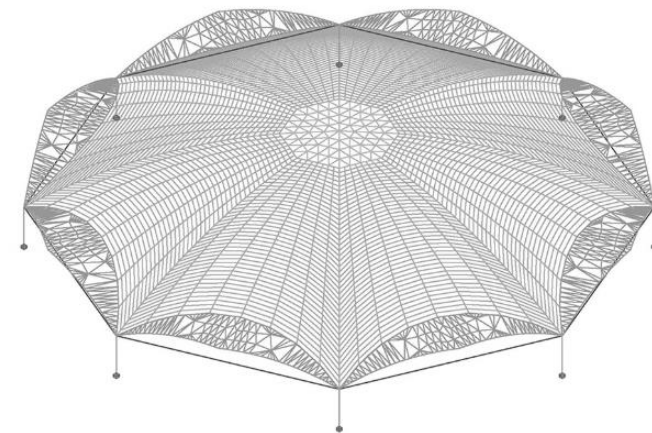


Imagen 78 Modelo elementos finitos AutoCad 2017®

A partir del modelo original del mercado de Algeciras, se planteó la idea de realizar distintos modelos estructurales. Las distintas variaciones permitieron observar las deformaciones de la cubierta y los pilares en cada situación y el funcionamiento conjunto del edificio. Llegando a la conclusión de que el modelo de Eduardo Torroja incluía los elementos necesarios para conseguir el mejor comportamiento: bóvedas perimetrales de rigidización y tirantes tesados para corregir las deformaciones.

El primer modelo consiste en un casquete esférico, manteniendo la misma disposición de los pilares y el lucernario y eliminando las bóvedas de intersección con la cúpula.

El segundo, se obtuvo del anterior, la variación introducida fue la de un anillo perimetral de cosido.

En el tercero se propuso un cambio geométrico importante en el elemento principal, se cambió por completo la cubierta laminar para disponer una cubierta de láminas plegadas.

El Capítulo principal de este trabajo ha sido el análisis de la estructura.

La primera hipótesis analizada fue la referida al peso propio de la estructura. En el estudio de las deformaciones se observaba, como la cúpula descendía verticalmente, achatándose y los pilares se abrían lateralmente. Todo ello fue debido a la desaparición de las fuerzas de los tensores.

La segunda hipótesis analizada fue la fuerza de los tensores de la estructura. En esta combinación no se tendrá en cuenta el peso propio del mercado.

Se apreció como en este caso ocurría lo contrario que en la combinación anterior, los pilares se cerraban y la cúpula experimentaba un ascenso vertical.

La tercera situación que se estudió fue una combinación del peso propio más la fuerza de los tensores.

Al combinarlas, se contrarrestaban tanto los desplazamientos verticales ascendentes como las descendentes, de manera que las deformaciones finales en la cúpula eran prácticamente cero.

La cuarta situación que se estableció fue una combinación de las hipótesis de peso propio, sobrecarga de uso y de nieve más la fuerza de los tensores.

Las deformaciones en el modelo del Mercado de Algeciras eran muy pequeñas, dando valores muy próximos a cero. Posteriormente se analizaron los valores de las tensiones  $S_x$ ,  $S_y$  y Von Mises y se observó la necesidad de colocar armado en las zonas de tracción, mientras que en las de compresión, la lámina era suficiente para resistir dichas cargas.

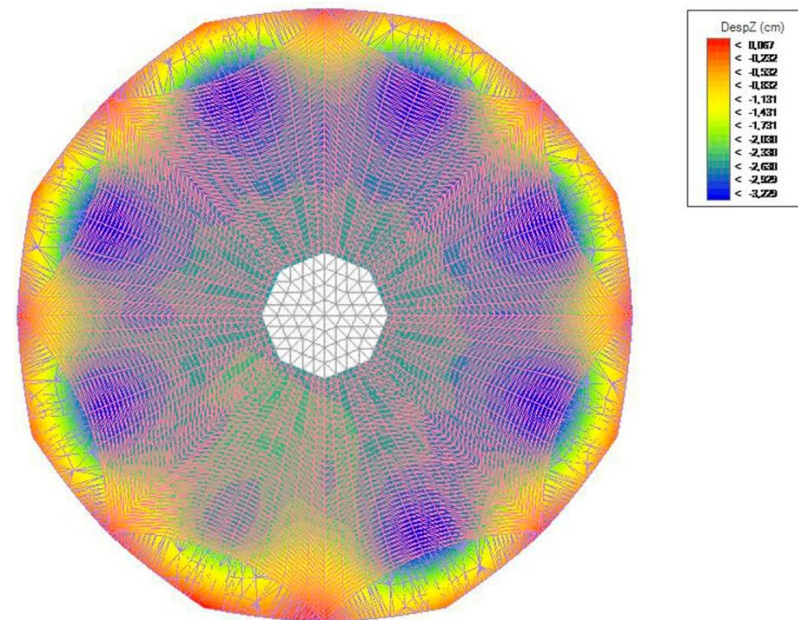


Imagen 79 Mapa de colores Dz, HIP01: Peso Propio Architrave 2015®

La quinta situación fue una combinación de las hipótesis de peso propio, sobrecarga de uso y de nieve más la fuerza de los tensores y la sobrecarga de viento.

Las deformaciones en el modelo estructural eran muy pequeñas en su gran mayoría, dando valores muy cercanos a cero. Las deformaciones verticales prácticamente no cambiaban con respecto a los anteriores modelos, ya que, por ser la cúpula bastante achatada, el viento a efectos de cargas gravitatorias, era muy pequeño. En esta última combinación también se estudió las distintas tensiones dando resultados semejantes a los anteriores.

En cuanto al análisis de los pilares se tuvo que tener en cuenta que la sección del pilar utilizada por Eduardo Torroja no era posible armarla en el programa Architrave 2015®, por tanto, se realizó una semejanza geométrica. Se optó por semejanza cuadrada ya que cubría la mayor parte de la sección diseñada por Torroja. De esta manera, el armado era mucho más preciso e igualitario que el original.

Y por último, en el análisis de los tensores se ha comprobado que los tirantes son imprescindibles en el modelo estructural de Eduardo Torroja. Ya que sin ellos la estructura se hundía, los pilares se abrían y estaban sometido a una flexión que no sería capaces de soportar. Sabiendo que el valor de la fuerza del pretensado y el axil máximo que producía la cúpula sobre los tensores, teniendo en cuenta el peso propio, la carga de nieve y la de uso; se obtuvo el axil máximo que debían de soportar los tirantes y con ello el diámetro necesario para soportar dichas cargas.

En definitiva, podemos concluir que la estructura del Mercado de Algeciras se adecúa a sus necesidades, con un diseño que propicia el buen comportamiento estructural.

---

# BIBLIOGRAFÍA

---



## BIBLIOGRAFÍA DOCUMENTAL

### LIBROS:

Fernández Ordoñez, J. A., & Navarro Vera, J. R. (1978). *Eduardo Torroja Miret, ingeniero, engineer*. (1999 Ediciones Pronaos S.A., Ed.).

Fernández Ordoñez, J. A., & Navarro Vera, J. R. (1978). *Eduardo Torroja Miret, ingeniero, engineer*. (1999 Ediciones Pronaos S.A., Ed.).

Jordá, C. (2000). *Eduardo Torroja (1899-1961), la vigencia de un legado*.

Torroja Miret, E. (2010). *Razón y ser de los tipos estructurales*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Retrieved from <http://fliphtml5.com/ryov/qqcw/basic>

### ARTÍCULOS:

Docomomo, F. (2001). Mercado de Abastos de Algeciras.

Fenollosa, E. (2017). *ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN PRETENSADO*. Retrieved from [https://poliformat.upv.es/access/content/group/GRA\\_13363\\_2017/Estructuras\\_pretensadas/Estructuras\\_hormigón\\_pretensado.pdf](https://poliformat.upv.es/access/content/group/GRA_13363_2017/Estructuras_pretensadas/Estructuras_hormigón_pretensado.pdf)

Mijangos Martínez, E. C., & Torroja Miret, Eduardo. (2012). Eduardo Torroja, la teoría de la intuición. Retrieved from <https://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/40067/1/RUA7p56.pdf>

Sánchez Arcas, M. (2003). Fundación caja de arquitectos. Retrieved from [http://oa.upm.es/1350/1/ANTUNA\\_CL\\_2003\\_02.pdf](http://oa.upm.es/1350/1/ANTUNA_CL_2003_02.pdf)

Serrano, B., Fenollosa, E., & Arnau, F. (2016). Evaluación de daños y actuaciones de rehabilitación en la iglesia de San Nicolás de Eduardo Torroja (Gandía, 1962). *Informes de La Construcción*, 68(541), e130. <https://doi.org/10.3989/ic.14.139>

Sierra Muñoz, M. R. (1989). El mercado Eduardo Torroja de Algeciras. *Revista Almoraima Nº 2. Mancomunidad de Municipios Campo de Gibraltar*, (2), 25. Retrieved from [http://212.170.242.245/IECG/doc/revistas/Almoraima\\_Suplemento\\_Mercado\\_Torroja-Articulo\\_Completo.pdf](http://212.170.242.245/IECG/doc/revistas/Almoraima_Suplemento_Mercado_Torroja-Articulo_Completo.pdf)

#### TESIS:

Antuña Bernardo, J. (2002). *LAS ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN DE EDUARDO TORROJA MIRET*. Retrieved from [http://oa.upm.es/1348/1/JOAQUIN\\_ANTUNA\\_BERNARDO.pdf](http://oa.upm.es/1348/1/JOAQUIN_ANTUNA_BERNARDO.pdf)

Fabra Abella, J. (2012). PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT: "THE ALGECIRAS MARKET HALL IN THE WORK OF EDUARDO TORROJA."

**TFG Y PFC:**

Cordero Toral, J. F. (2014). Arquitectura de un futuro pasado.

Fenollosa, E., Serrano, B., Alonso, A., & Arnau, F. (2018). 16. Two post-tensioned thin folded plates designed by E. Torroja for san nicolás church. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1), 162–172. <https://doi.org/10.3311/PPci.10251>

Roig Greu, A. (2009). *Diseño y cálculo de una estructura singular de hormigón armado con redondos de pultrusión a base de polímeros reforzados con fibras de vidrio.*

**VIDEOS:**

Sánchez Lázaro, T. (2014). *Visita al mercado de Algeciras con Rafael López Palanco - YouTube.* Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=aa3D35rGcCM>

**ENLACES WEB:**

Algeciras, M. de. (n.d.). Mercado de Algeciras (1935) Manuel Sánchez Arcas & Eduardo Torroja. Retrieved April 23, 2018, from <http://www.epdlp.com/edificio.php?id=4913>

Balear, I. (n.d.). ARRANCA LA TEMPORADA DEL 75º ANIVERSARIO DEL HIPÓDROMO DE LA ZARZUELA - Infotrot Balears| Infotrot Balears | Portal español sobre Trote. Retrieved April 15, 2018, from <http://www.infotrotbalears.es/arranca-la-temporada-del-75o-aniversario-del-hipodromo-de-la-zarzuela/>

CSIC. (1962, February 28). 07. Mercado de Algeciras. Retrieved April 23, 2018, from <https://doi.org/10.3989/ic.1962.v14.i137.4932>

España es Cultura. (n.d.). Eduardo Torroja Miret. Arquitectura. Biografía y obras en España es cultura. Retrieved April 15, 2018, from [http://www.españaecultura.es/es/artistas\\_creadores/eduardo\\_torroja\\_miret.html](http://www.españaecultura.es/es/artistas_creadores/eduardo_torroja_miret.html)

Falconaumanni. (2010). File:Mercado torroja.jpg - Wikimedia Commons. Retrieved June 14, 2018, from [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercado\\_torroja.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercado_torroja.jpg)

Fdz Torrónategui, L. (2015). Commercial building - Buscar con Google. Retrieved April 23, 2018, from [https://www.google.es/search?sa=G&hl=es&q=commercial+building&tbm=isch&tbs=simg:CAQSlwEJ\\_1wNza2KvI0QaiwELEKjU2AQaBAgVCAEMCxCwjKclGmIKYAgDEiiJFaYD-x\\_1mHYUV8B36H-kd0xSuDe048TjnKu448DjzOOYq5CrnOIQoGjA2N3ek\\_1spQ2lIzfUvPI Sw6NXJF77CZ5ZMIKwsWRXW5fV2ewuSo894Xqvck](https://www.google.es/search?sa=G&hl=es&q=commercial+building&tbm=isch&tbs=simg:CAQSlwEJ_1wNza2KvI0QaiwELEKjU2AQaBAgVCAEMCxCwjKclGmIKYAgDEiiJFaYD-x_1mHYUV8B36H-kd0xSuDe048TjnKu448DjzOOYq5CrnOIQoGjA2N3ek_1spQ2lIzfUvPI Sw6NXJF77CZ5ZMIKwsWRXW5fV2ewuSo894Xqvck)

García Jacomino, J. L. (2011). Empleo de la modelación por elemento finito (MEF) en la solución de problemas ingenieriles (página 2) - Monografias.com. Retrieved April 28, 2018, from <http://www.monografias.com/trabajos82/aplicacion-mef-soldadura/aplicacion-mef-soldadura2.shtml>

Instituto Geográfico Nacional. (2015). Instituto Geográfico Nacional. Retrieved June 19, 2018, from <http://www.ign.es/web/mapas-sismicidad>

Opandalucia. (2011). opandalucia.es: Algeciras Market. Retrieved April 23, 2018, from <http://www.opandalucia.es/index.php?id=181&L=0>

Patrimonio Histórico, I. A. (2001). Base de datos Patrimonio Inmueble de Andalucía. Retrieved April 23, 2018, from <http://www.iaph.es/patrimonio-inmueble-andalucia/resumen.do?id=i424>

Pérez Rodero, E. (2017). ArtChist: Antiguo frontón Recoletos en Madrid | Eduardo Torroja + Secundino Zuazo | Cubierta laminar. Retrieved April 15, 2018, from <http://artchist.blogspot.com/2017/05/antiguo-fronton-recoletos-en-madrid.html>

Requena, Á. (2014). Abril | 2014 | Turismo matemático. Retrieved April 23, 2018, from <https://mateturismo.wordpress.com/2014/04/>

Solanas, V. (2012). ¿Ingeniero o Arquitecto? Eduardo Torroja Miret | BlogARQ. Retrieved April 23, 2018, from <https://blogarq.wordpress.com/2012/04/10/828/>

Torroja, F. E. (n.d.). Biografía. Retrieved April 15, 2018, from <http://www.fundacioneduardotorroja.org/index.php/es/eduardo-torroja/biografia.html>

Universidad Pablo de Olavide. (n.d.). Historia de Algeciras. Retrieved April 15, 2018, from [https://www.upo.es/tym/WebCT/Texto\\_Algeciras/page\\_01.htm](https://www.upo.es/tym/WebCT/Texto_Algeciras/page_01.htm)

Weise, M. (2016). Eduardo Torroja Miret, el ingeniero que relacionó técnica con estética. Retrieved April 15, 2018, from <https://loff.it/society/efemerides/eduardo-torroja-miret-el-ingeniero-que-relaciono-tecnica-con-estetica-251689/>

**NORMATIVAS:**

Básico, D. Documento Básico (2009).

DBSE-AE. Documento Básico SE-AE Seguridad Estructural Acciones en la edificación (2009). Retrieved from <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadEstructural/DBSE-AE.pdf>

NCSE-02. NCSE-02 (2002). Retrieved from <https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BN0222>

**PROGRAMAS DE CÁLCULO:**

Architrave Educacional. (2015).

AutoCAD. (2017).

## BIBLIOGRAFÍA FOTOGRÁFICA

### INTRODUCCIÓN:

**Imagen 1** Algeciras 1906

<http://www.algeciras.es/es/ciudad/historia/>

**Imagen 2** Eduardo Torroja Miret

<https://loff.it/society/efemerides/eduardo-torroja-miret-el-ingeniero-que-relaciono-tecnica-con-estetica-251689/>

**Imagen 3** Esquema de puente

<http://fliphtml5.com/ryov/qqcw/basic>

**Imagen 4** Mercado de Algeciras

[http://212.170.242.245/IECG/doc/revistas/Almoraima2  
Suplemento Mercado Torroja-Articulo Completo.pdf](http://212.170.242.245/IECG/doc/revistas/Almoraima2%20Suplemento%20Mercado%20Torroja-Articulo%20Completo.pdf)

**Imagen 5** Frontón de Recoletos

[http://artchist.blogspot.com/2017/05/antiguo-fronton-recoletos-  
en-madrid.html](http://artchist.blogspot.com/2017/05/antiguo-fronton-recoletos-en-madrid.html)

**Imagen 6** Hipódromo de la Zarzuela

[http://www.infotrotbalears.es/arranca-la-temporada-del-75o-  
aniversario-del-hipodromo-de-la-zarzuela/](http://www.infotrotbalears.es/arranca-la-temporada-del-75o-aniversario-del-hipodromo-de-la-zarzuela/)

**Imagen 7** Iglesia de San Nicolás

<https://doi.org/10.3989/ic.14.139>

PROYECTO ARQUITECTÓNICO:

**Imagen 8** Mercado de Algeciras 1935

<https://blogarq.wordpress.com/2012/04/10/828/>

**Imagen 9** Mercado de Algeciras en la actualidad

<http://www.opandalucia.es/index.php?id=181&L=0>

**Imagen 10** Entorno mercado de Algeciras

<http://www.epdlp.com/edificio.php?id=4913>

**Imagen 11** Mercado de Algeciras

<https://mateturismo.wordpress.com/2014/04/>

**Imagen 12** Mercado de Algeciras

[https://www.google.es/search?sa=G&hl=es&q=commercial+building&tbm=isch&tbs=simg:CAQSlwEJ\\_1wNza2KvI0QaiwELEKjU2AQaBAgVCAEMCxCwjKcIGmIKYAgDEiiJFaYD-x\\_1mHYUV8B36H-kd0xSuDe048TjnKu448DjzOOYq5CrnOIQoGjA2N3ek\\_1spQ2lIzfUvPI Sw6NXJF77CZ5ZMIKwsWRXW5fV2ewuSo894Xqvck](https://www.google.es/search?sa=G&hl=es&q=commercial+building&tbm=isch&tbs=simg:CAQSlwEJ_1wNza2KvI0QaiwELEKjU2AQaBAgVCAEMCxCwjKcIGmIKYAgDEiiJFaYD-x_1mHYUV8B36H-kd0xSuDe048TjnKu448DjzOOYq5CrnOIQoGjA2N3ek_1spQ2lIzfUvPI Sw6NXJF77CZ5ZMIKwsWRXW5fV2ewuSo894Xqvck)

**Imagen 13** Planta Mercado de Algeciras

[http://www.iaph.es/arquitectura-contemporanea-andalucia/resumen.do?id=244635#\\_documentacion](http://www.iaph.es/arquitectura-contemporanea-andalucia/resumen.do?id=244635#_documentacion)

**Imagen 14** Cimbrado cúpula

<https://doi.org/10.3989/ic.1962.v14.i137.4932>

**Imagen 15** Armado cúpula

<https://doi.org/10.3989/ic.1962.v14.i137.4932>

**Imagen 16** Doble mallado cúpula

<https://doi.org/10.3989/ic.1962.v14.i137.4932>



**Imagen 17** Columnas

<https://doi.org/10.3989/ic.1962.v14.i137.4932>

**Imagen 18** Bóvedas en voladizo

[http://www.iaph.es/arquitectura-contemporanea-andalucia/resumen.do?id=244635#\\_documentacion](http://www.iaph.es/arquitectura-contemporanea-andalucia/resumen.do?id=244635#_documentacion)

**Imagen 19** Interior del Mercado

[http://www.iaph.es/arquitectura-contemporanea-andalucia/resumen.do?id=244635#\\_documentacion](http://www.iaph.es/arquitectura-contemporanea-andalucia/resumen.do?id=244635#_documentacion)

## DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA:

**Imagen 20** Dimensiones estructura

[http://oa.upm.es/1348/1/JOAQUIN\\_ANTUNA\\_BERNARDO.pdf](http://oa.upm.es/1348/1/JOAQUIN_ANTUNA_BERNARDO.pdf)

**Imagen 21** Discretización de elementos finitos

<http://www.monografias.com/trabajos82/aplicacion-mef-soldadura/aplicacion-mef-soldadura2.shtml>

**Imagen 22** Elementos finitos modelo AutoCad 2017<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa AutoCad 2017<sup>©</sup>*

**Imagen 23** Modelo elementos finitos AutoCad 2017<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa AutoCad 2017<sup>©</sup>*

**Imagen 24** Mercado de Algeciras

<https://mateturismo.wordpress.com/2014/04/>

**Imagen 25** Bóvedas en voladizo

[http://www.iaph.es/arquitectura-contemporanea-andalucia/resumen.do?id=244635#\\_documentacion](http://www.iaph.es/arquitectura-contemporanea-andalucia/resumen.do?id=244635#_documentacion)

**Imagen 26** Interior del Mercado

[http://www.iaph.es/arquitectura-contemporanea-andalucia/resumen.do?id=244635#\\_documentacion](http://www.iaph.es/arquitectura-contemporanea-andalucia/resumen.do?id=244635#_documentacion)

**Imagen 27** Mercado de Algeciras vista Architrave 2015<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 28** Bóvedas en voladizo vista Architrave 2015<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 29** Interior del Mercado vista Architrave 2015<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 30** Modelo cúpula laminar Architrave 2015<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 31** Modelo anillo perimetral Architrave 2015<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 32** Modelo láminas plegadas Architrave 2015<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 33** Tabla 3.1 Valores característicos de las sobrecargas de uso

<https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadEstructural/DBSE-AE.pdf>

**Imagen 34** Zonas climáticas de invierno

<https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadEstructural/DBSE-AE.pdf>

**Imagen 35** Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal

<https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadEstructural/DBSE-AE.pdf>

**Imagen 36** Valor básico de la velocidad del viento,  $V_s$ 

<https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadEstructural/DBSE-AE.pdf>

**Imagen 37** Coeficientes para tipos de entornos

<https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadEstructural/DBSE-AE.pdf>

**Imagen 38** Mapa de peligrosidad sísmica

<https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BN0222>

**Imagen 39** Combinación de cargas

*Básico, Documento Básico (2009)*

**Imagen 40** Coeficientes parciales de seguridad

*Básico, Documento Básico (2009)*

**Imagen 41** Coeficientes de simultaneidad

*Básico, Documento Básico (2009)*

## ANÁLISIS DE RESULTADOS:

**Imagen 42** Deformada modelo cúpula laminar Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 43** Mapa de colores Dz modelo cúpula laminar Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 44** Mapa de colores Sx modelo cúpula laminar Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 45** Deformada modelo anillo perimetral Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 46** Mapa de colores Dz modelo anillo perimetral Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 47** Mapa de colores Sx modelo anillo perimetral Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 48** Deformada modelo láminas plegadas Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 49** Mapa de colores Dz modelo láminas plegadas Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 50** Mapa de colores Sx modelo láminas plegadas  
Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 51** Mercado de Algeciras

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercado\\_torroja.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercado_torroja.jpg)

**Imagen 52** Deformada Mercado de Algeciras Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 53** Isovalores de la deformada del Mercado de Algeciras  
Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 54** Deformada HIP01: Peso Propio Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 55** Mapa de colores Dz, HIP01: Peso Propio Architrave  
2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 56** Deformada HIP04: Fuerzas de Tesado Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 57** Mapa de colores Dz, HIP04: Fuerzas de Tesado (ELS)  
Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 58** Mapa de colores Dz, HIP: Peso Propio + Fuerzas de  
Tesado (ELS) Architrave 2015©

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015©*

**Imagen 59** Mapa de colores Dz, HIP: Peso Propio + Tesado + Uso + Nieve (ELS) Architrave 2015<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 60** Mapa de colores Sx, HIP: Peso Propio + Tesado + Uso + Nieve (ELU)

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 61** Mapa de colores Sy, HIP: Peso Propio + Tesado + Uso + Nieve (ELU)

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 62** Mapa de colores  $\sigma_{co}$ , HIP: Peso Propio + Tesado + Uso + Nieve (ELU)

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 63** Mapa de colores Dz, HIP: Cargas gravitatorias + Viento (ELS) Architrave 2015<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 64** Mapa de colores Dx, HIP: Cargas gravitatorias + Viento (ELS) Architrave 2015<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 65** Mapa de colores Sx, HIP: Cargas gravitatorias + Viento (ELU)

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 66** Mapa de colores Sy, HIP: Cargas gravitatorias + Viento (ELU)

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*

**Imagen 67** Mapa de colores  $\sigma_{co}$ , HIP: Cargas gravitatorias + Viento (ELU)

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015*©

**Imagen 68** Diagrama de axiles de los pilares Architrave 2015

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015*©

**Imagen 69** Diagrama de los cortantes de los pilares Architrave 2015

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015*©

**Imagen 70** Diagrama de los momentos de los pilares Architrave 2015

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015*©

**Imagen 71** Sección simplificada del pilar Architrave 2015

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015*©

**Imagen 72** Coeficientes de aprovechamiento Architrave 2015

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015*©

**Imagen 73** Sección real y simplificada del pilar AutoCad 2017

<https://doi.org/10.3989/ic.1962.v14.i137.4932>

*Elaboración propia mediante el programa AutoCad 2017*©

**Imagen 74** Diagrama de axiles en los tensores

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015*©

**Imagen 75** Tensores

*Fabra Abella, J. (2012)*

CONCLUSIONES:

**Imagen 76** Eduardo Torroja

[http://www.españaesultura.es/es/artistas\\_creadores/eduardo\\_torroja\\_miret.html](http://www.españaesultura.es/es/artistas_creadores/eduardo_torroja_miret.html)

**Imagen 77** Dimensiones estructura

[http://oa.upm.es/1348/1/JOAQUIN\\_ANTUNA\\_BERNARDO.pdf](http://oa.upm.es/1348/1/JOAQUIN_ANTUNA_BERNARDO.pdf)

**Imagen 78** Modelo elementos finitos AutoCad 2017<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa AutoCad 2017<sup>©</sup>*

**Imagen 79** Mapa de colores Dz, HIP01: Peso Propio Architrave 2015<sup>©</sup>

*Elaboración propia mediante el programa Architrave 2015<sup>©</sup>*