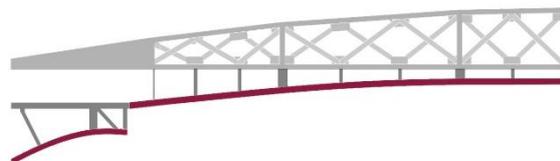


Análisis estructural de la bóveda del Teatro Principal de Castellón

Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Universitat Politècnica de València
Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Trabajo Final de Grado
Curso 2015-2016

Santiago Sánchez Gómez

Tutores: Adolfo Alonso/ Ernesto Fenollosa



Índice

- 1.-Resumen
- 2.-Objetivos y metodología
- 3.-Descripción del edificio
 - 3.1 Arquitecto y contextualización
- 4.-Estructura del edificio
- 5.-Modelo estructural
 - 5.1_Modelo estructural
 - 5.2_Modelo de carga
- 6.-Método de cálculo
 - 6.1_Fundamentos del MEF
 - 6.2_Cálculo lineal y cálculo no lineal
- 7.-Resultados y peritación
- 8.-Conclusiones
- 9.-Bibliografía y referencia a imágenes

1. Resumen

1.1_ Resumen y palabras clave

La rehabilitación es uno de los campos con más posibilidades de trabajo en estos últimos años, y no solo de edificios de viviendas, sino también de edificios públicos e históricos, un ejemplo de ello, es el teatro principal de Castellón.

El teatro, un edificio de finales del siglo XIX, tiene un sistema estructural a base de cerchas metálicas que sujetan la bóveda que cubre la parte pública del edificio.

A través de la generación de un modelo estructural mediante el método de los elementos finitos, se ha analizado el estado actual. Este análisis ha estado compuesto por dos fases, el cálculo lineal y el no lineal. Se han comparado los resultados de ambos cálculos a través de las tensiones generadas. También se ha evaluado la carga máxima que podría soportar toda la estructura y se ha comprobado la resistencia máxima de las uniones.

Palabras Clave: Teatro de Castellón, Análisis estructural, bóveda, elementos finitos.

1.1 Resum y paraules Claus

La rehabilitació és un dels àmbits amb més possibilitats de treballs d'aquests darrers anys, i no sols de vivendes, si no també d'edificis públics i històrics, un exemple d'açò és el teatre principal de Castelló.

El teatre, un edifici de finals del segle XIX, té un sistema estructural a base de cintres metàl·liques que subjecten la volta que cobrix la part pública de l'edifici. A través de la generació d'un model estructural per mitjà del mètode dels elements finits, s'ha analitzat l'estat actual. Aquest anàlisi ha estat compost per dos fases, el càlcul lineal i el no lineal. S'han comparat els resultats d'ambdós càlculs a través de les tensions generades.

També s'ha evaluat la càrrega màxima que podria suportar tota l'estructura i s'ha comprovat la resistència màxima de les unions.

Paraules claus: Teatre de Castelló, Anàlisi estructural, volta, elements finits

1.1 Brief and key words

Restoration is one of the building fields with most possibilities and potential these last years, not only talking about housing, but also public buildings and historical constructions. An example of these is Castellón's Main Theatre.

The theater, a building from the late nineteenth century, has a structural system based on steel trusses hold the dome that covers the public part of the building.

Through the generation of a structural model using the finite element method, we analyzed the current state. This analysis had been composed of two phases, the linear calculation and no-linear calculation. We compared the results of both calculations through the generated tensions. Also it evaluated the maximum load that could support all the structure and resistance high bond strength.

Key words: Castellón's Main Theatre, Structure analysis, vault, finite elements

2 .Objetivos y Metodología

El Teatro es un edificio situado en el casco histórico de la ciudad, concretamente en la plaza de la Paz. Proyectado y construido a finales del S. XIX con un estilo neoclásico, como se puede apreciar en las trazas de la fachada y la planta.

La estructura del patio de butacas del teatro está compuesta por muro portante y bóveda de ladrillo y cerchas metálicas. Además de una cubierta independiente a la bóveda apoyada sobre los muros mediante cerchas y cobertura de tejas.

El edificio objeto del siguiente estudio se encuentra dentro de una línea de investigación estructural de edificios históricos llevada a cabo en el Departamento de Medio Continuos de la Universitat Politècnica de València, por los profesores Adolfo Alonso, Verónica Llopis y Ernesto Fenollosa, los cuales han tutorizado el análisis de la estructura del Teatro Principal de Castellón.

Uno de los objetivos de este trabajo es dar a conocer el Teatro Principal de Castellón por su notable importancia para la ciudad debido a su antigüedad y complejidad constructiva y formal. Es también un hito para la ciudad gracias a su actividad de ocio y cultura para Castellón.

El objetivo más importante es conocer y analizar el sistema constructivo, ya que es una pieza singular debido a la solución estructural. Al igual que la evaluación de la capacidad resistente del conjunto de la estructura y de cada una de las partes que lo conforman. Dicha comparación se realiza con el diagrama del estado tensional actual con la teórica de los materiales, así como el análisis de las deformaciones de la estructura. Por otro lado es de interés para el trabajo conocer cuál es la relación entre la tensión en los puntos más desfavorables y la máxima teórica de la bóveda y las cerchas metálicas.

Para ello usaremos la siguiente metodología de trabajo:

Primero se hará una recopilación de información para conocer el edificio, su entorno y su sistema constructivo y estructural, mediante la generación de documentación gráfica como son plantas, secciones, secciones constructivas y fotografías. Toda esta información ha sido obtenida mediante el volcado bibliográfico perteneciente al Ayuntamiento de Castellón y las mediciones y fotografías de una visita.

Después se genera un modelo estructural del estado actual. Para ello se usa una simplificación con la herramienta ANGLE, un programa informático diseñado por Adolfo Alonso, donde se puede analizar el estado tensional y de deformaciones. Este programa trabaja mediante elementos finitos, para representar elementos unidireccionales, bidireccionales y tridimensionales de la estructura.

Debido al material constructivo de la bóveda tiene un gran interés realizar no solo el cálculo lineal, sino también calcular el no lineal, pues se aproxima de una manera mucho más exacta a la realidad, gracias a su mayor precisión del comportamiento de la bóveda ante las acciones a la que está sometida.

3. Descripción del edificio

3.1_Arquitecto y contextualización

El edificio sobre el cual se desarrolla el estudio se encuentra situado en el casco antiguo de la ciudad de Castellón, en la plaza de la Paz. Está construido dentro de la trama irregular de la ciudad, característica de la época de la Edad Media. Fue proyectado en el año 1884 por el arquitecto Godofredo Ros de Ursinos^[1]. Este edificio no es solo un claro ejemplo de auge urbanístico que en ese momento se estaba desarrollando en Europa, sino también un reflejo de la necesidad de aunar en un mismo espacio las diferentes clases sociales que la Revolución Industrial. Dentro de estas clases sociales también se incluyó el nuevo estamento social, la Burguesía, empresarios que poseían un nivel de vida alto sin herencia noble.



Imagen 1_Foto fachada principal del teatro

El siglo XIX fue un siglo marcado por la gran influencia del empirismo del siglo XVII lo que generó la vuelta a los modelos clásicos y a las armonías de la Antigua Roma.

Durante ese mismo siglo, se generó una actitud ante necesidad de poner en perspectiva los estilos anteriores en concordancia con los avances constructivos del momento y una discusión en torno a la honestidad estructural de los materiales. Por lo que la composición del teatro responde a estos conceptos.

El exterior del edificio da respuesta a la plaza donde está ubicado, donde da la fachada principal. La fachada neoclásica consta de dos plantas separadas mediante una moldura a la altura del forjado y con un ritmo de ventanas en ambas plantas(*Img. 1*) Es una fachada de sin ningún tipo de ornamentación salvo el acceso principal. En el centro hay un volumen que sobresale del plano de fachada coronado por un frontón. La planta baja está compuesta por tres puertas y constituye el acceso principal al edificio. En la segunda planta hay un balcón que mantiene la división de la planta inferior. El volumen está dividido en tres partes verticalmente gracias a dos columnas centrales que son de estilo jónico y en los extremos por dos pilastras cuadradas.(*Img. 2*)

[1]_Mezquita Andrés, M.

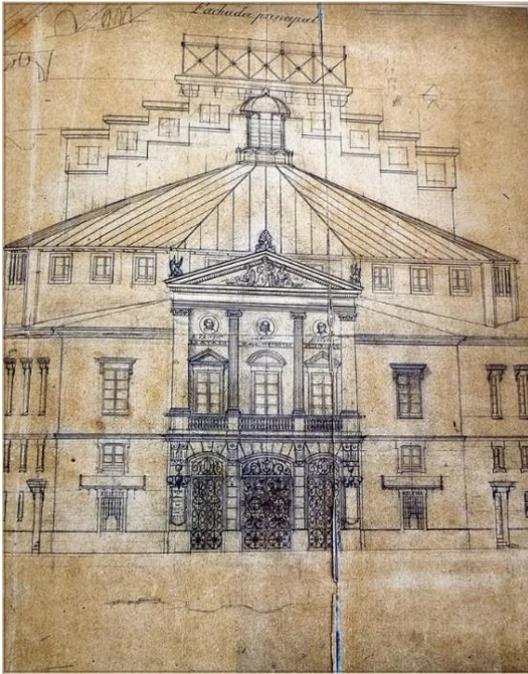


Imagen 2_Croquis fachada principal teatro

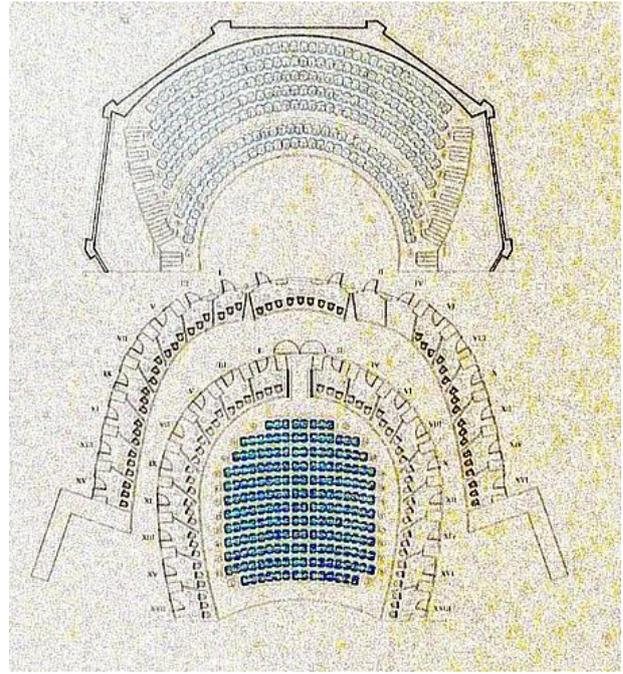


Imagen 3_Planta de butacas

En su interior, Godofredo Ros de Ursinos dejó la presencia de influencias francesas de corte neoclásico con alguna decoración ecléctica. El teatro consta de dos cuerpos principales: la sala y el escenario, en el que se encuentra un foso subterráneo para la orquesta. Inicialmente, el teatro contaba con un total de 1 239 localidades indicadas en el plano, el cual estuvo colgado durante años en la taquilla del teatro Principal para facilitar tanto la labor de la taquillera como a los espectadores. (Img. 3)

La arquitectura barroca italiana influyó en toda Europa, exportando un modelo de teatro renacentista con auditorio semicircular y una columnata de coronamiento. Sin embargo, la disposición de palcos, en lugar de galerías, es de origen barroco, ya que estos eran para un público más pudiente.

A pesar de todas las oposiciones, el día 26 de enero de 1886, el gobernador civil aprobó definitivamente el proyecto del teatro, aunque las obras no empezaron hasta el 2 de octubre de 1890. [2]

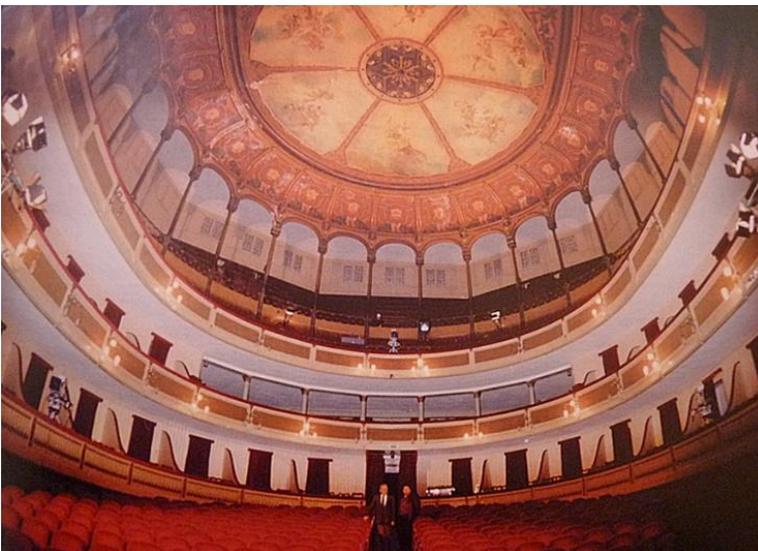


Imagen 4_ interior del teatro

[2] www.castello.es

Lo más destacable del edificio es la cúpula que cubre el patio de butacas, dividido en dos alturas diferentes, la parte central que está partida en 6 partes con pinturas barrocas (*Img. 5*) sobre el falso techo bajo la rosca de ladrillo y el lucernario colocado en el medio, con motivos geométricos y policromos. Y el anillo perimetral que cubre los palcos con una altura más baja que soportan a su vez la cúpula superior. Este anillo tiene forma de media bóveda dividida en partes iguales y pintadas con relieves e iguales entre sí.

La geometría del teatro está compuesta por una planta en forma de herradura, materializada mediante un muro, que separa las circulaciones perimetrales del vacío donde se halla la escena del teatro y se encuentran los espectadores, repartidos entre la planta baja, donde se sitúa el patio de butacas, y en las tres plantas superiores, se localizan las plateas. (*Img. 4*)



Imagen 5_ Vista cenital del interior de la bóveda.

4. Estructura del edificio

Para explicar la estructura del patio de butacas del edificio, hay que definir varios sistemas constructivos; muro de carga, cerchas metálicas, cúpula de ladrillo y cubierta de teja.

El muro de carga en forma de herradura (*Img. 6*) está construido de ladrillo macizo, y tiene un espesor de 40-50 cm. Este muro apoya sobre una cimentación que no es objeto de estudio, y se admitirá para el cálculo como una zapata corrida bajo el muro, ya que no se puede saber la dimensión ni el estado en el que se encuentra. En este muro hay aberturas para poder entrar al patio de butacas, y a los palcos de las diferentes plantas.

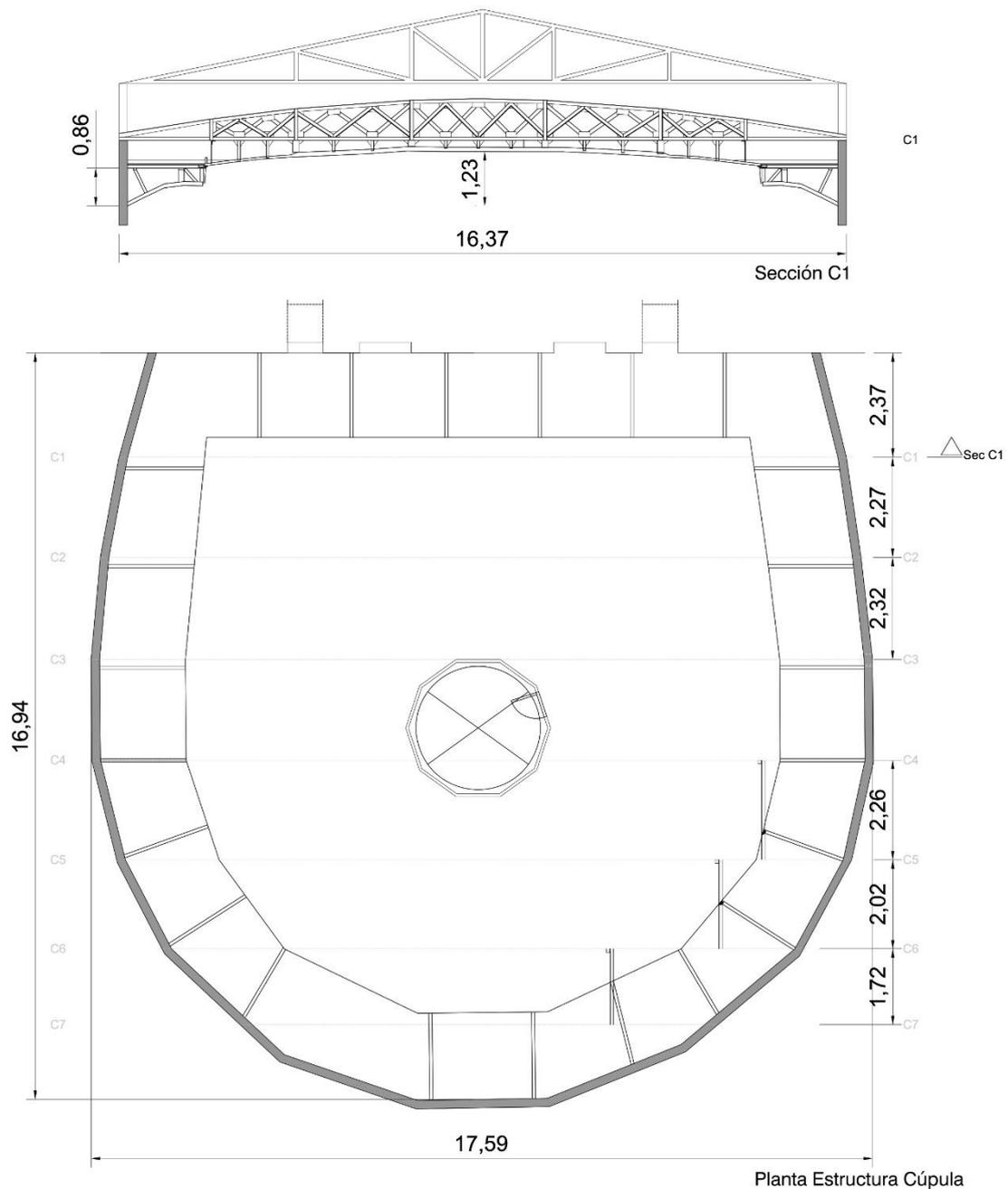


Imagen 6_planta del teatro y sección C1

Sobre este muro descansan las cerchas metálicas (*Img. 7*). Hay 7 cerchas que sujetan la cúpula de ladrillo. Y otras 8 que soportan la cubierta de teja.

Las 7 primeras cerchas y que son de interés en este trabajo, tienen unas características concretas, todas tienen la misma geometría pero el tamaño varía dependiendo de la luz que debe cubrir, ya que la forma de la planta de herradura hace que los lados del muro no sean paralelos entre sí.

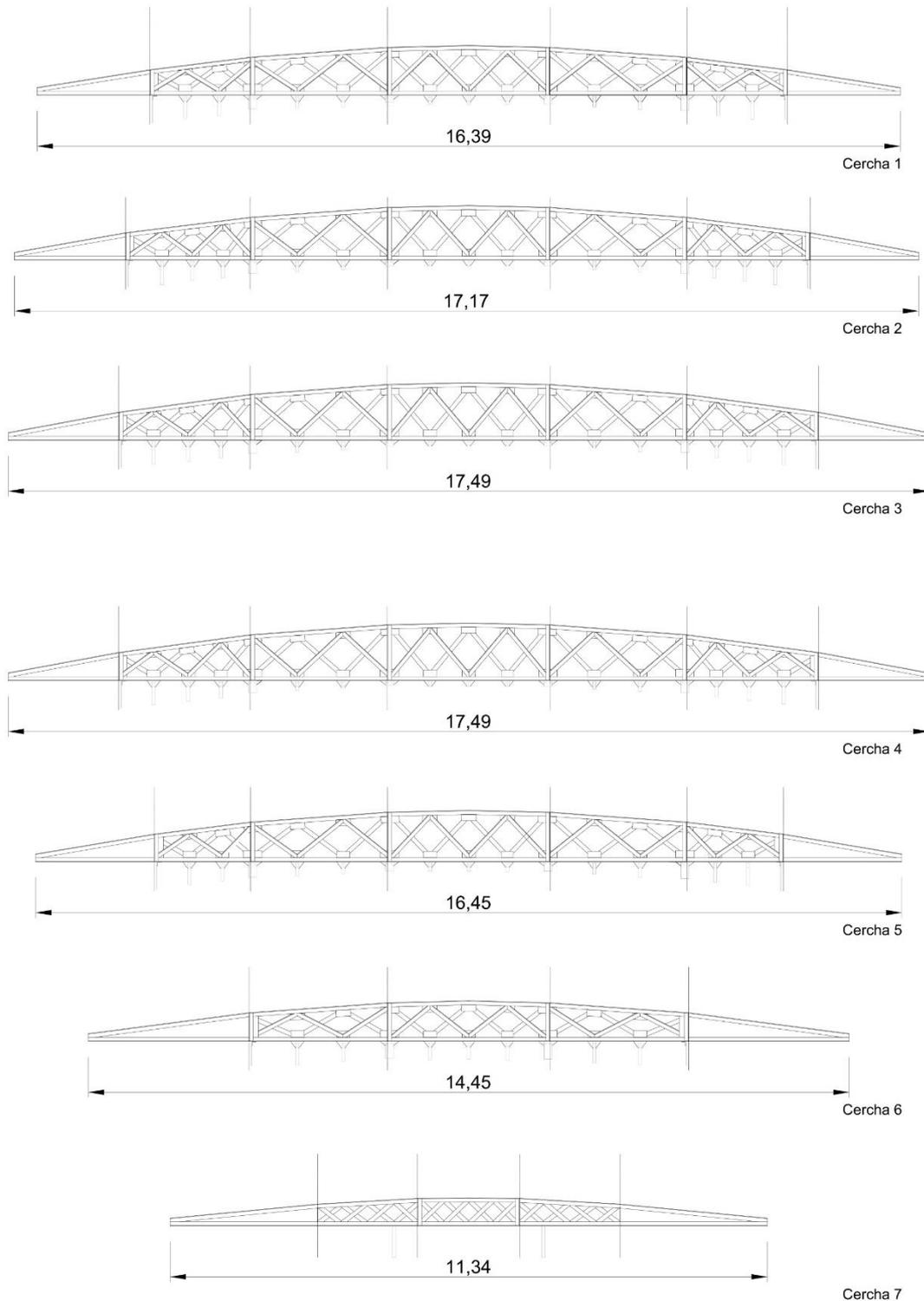
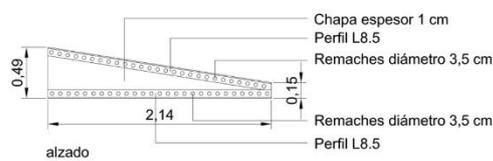


Imagen 7_Cerchas metálicas que sujetan la cúpula

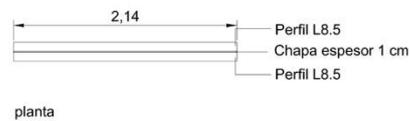
Las cerchas (*Img. 7*) están compuestas por dos cordones, el superior tiene forma curva y el cordón inferior es horizontal. Ambos cordones están formados por perfiles de acero en forma de L de 8x8 cm, la triangulación entre ambos cordones es doble y construida mediante perfiles de acero en forma de L 8 x 4,5 y de 0,8 cm de espesor. Estos perfiles están unidos a los dos cordones a través de unas cartelas de acero de forma rectangular y todas las uniones son mediante roblones. En la parte próxima al apoyo de la cercha al muro ambos cordones son unidos por una chapa de acero de 1 cm de espesor para tener una mayor inercia, los cordones también son un poco mayores, pasando a perfiles de acero en forma de L 8,5 x 8,5. (*Img. 8*)

Despiece por módulos de la cercha 1

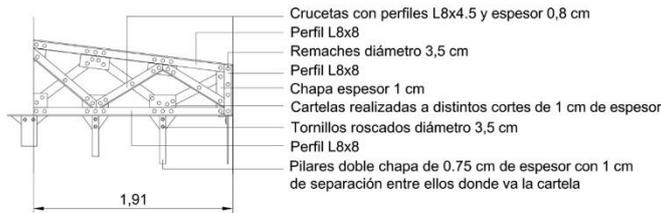
Modulo 1



27 remaches arriba y abajo



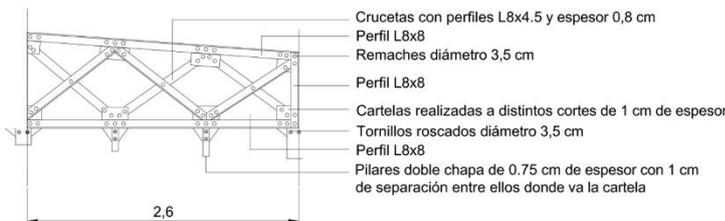
Modulo 2



Crucetas con perfiles L8x4.5 y espesor 0,8 cm

Pilares doble chapa de 0.75 cm de espesor con 1 cm de separación entre ellos donde va la cartela

alzado
Modulo 3



Crucetas con perfiles L8x4.5 y espesor 0,8 cm

Pilares doble chapa de 0.75 cm de espesor con 1 cm de separación entre ellos donde va la cartela

alzado
Modulo 4



Crucetas con perfiles L8x4.5 y espesor 0,8 cm

Pilares doble chapa de 0.75 cm de espesor con 1 cm de separación entre ellos donde va la cartela

Detalle de Refuerzo superior e inferior con una L de 7.5x7.5 de 1 cm de espesor y una placa rectangular de 1,5 cm de espesor, cogidos a los perfiles de la cercha mediante remaches de diámetro 3,5 cm.



Imagen 8_Detalle despiece de la cercha 1



Imagen 9_detalle de los cordones de las cerchas



Imagen 10_detalle de las cerchas

La cúpula de ladrillo está colgada mediante perfiles de acero sujetos al perfil inferior de las cerchas, estos perfiles están conformados mediante 2 chapas de acero rectangulares de 0,75 cm de espesor separadas 1 cm. Estos tirantes están compuestos por unas pletinas metálicas unidos a este cordón inferior. Gracias a que cada perfil tiene una longitud se genera una curva, la cual define la curvatura de la cúpula y cumplen con la misión de sostenerla en varios puntos a lo largo de su sección transversal.

Las rosca de ladrillo están sujetas en esos perfiles, y se supone que descansan sobre otra chapa horizontal, aunque no podemos saberlo con exactitud debido a que eso implicaría hacer catas y se podría romper la cúpula y consigo las pinturas del techo.

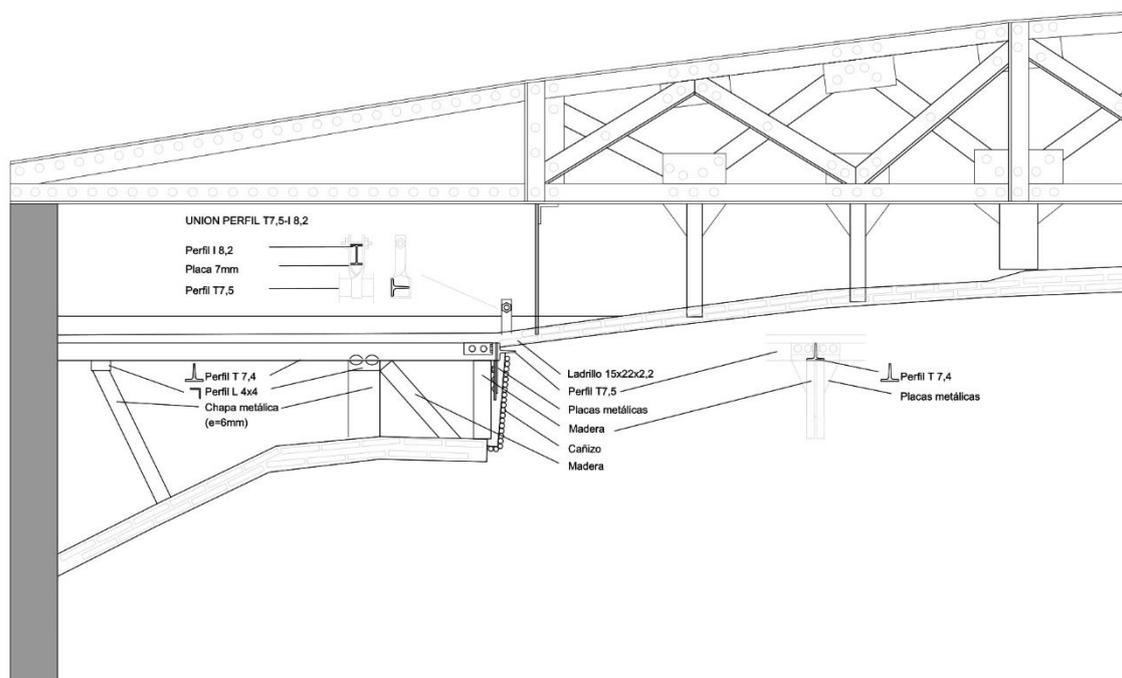


Imagen 11_Sección constructiva encuentro bóveda y cúpula sujeta mediante cercha metálica.

La cúpula del teatro cubre el espacio central del patio de butacas mientras que en todo el perímetro de la cúpula se construyó una media bóveda de ladrillo (*Img. 11*) que se encuentra en una cota inferior, la parte inferior de dicha bóveda se apoya en el muro y la parte superior en un perfil de acero que cuelga del cordón inferior de las cerchas, y rodea toda la cúpula. También existe una subestructura con barras metálicas y de madera que soportan la bóveda de ladrillo y transmiten esos esfuerzos al muro. (*Img. 12*)

En el salto que se produce entre la bóveda y la cúpula se cubre con cañas y escayola igual que la parte inferior de la cúpula y la bóveda para hacer también de soporte de las diversas pinturas que dan identidad al teatro principal de Castellón.



Imagen 12: sistema de descuelgue de la semibóveda tabicada.



Imagen 13: sistema de descuelgue de la cúpula.

5. Modelo Estructural

5.1_Modelo Estructural

Para poder analizar con un buen criterio la estructura y tener una base argumentada en un modelo estructural razonable y fiable, se ha generado un modelo de la estructura del patio de butacas del Teatro Principal.

Con la geometría y en base al sistema constructivo del teatro, se generan modelos de cálculo, que reproducen el conjunto objeto de estudio. Estos modelos se realizan utilizando como herramienta de trabajo **ANGLE**, programa desarrollado por el profesor Adolfo Alonso. Así se puede analizar los modelos generados.

Este programa tiene multitud de ventajas y junto con otros programas complementarios se pueden generar modelos de cualquier tipo y material.

Para realizar el modelo del teatro principal, el cual es complejo, debido a la geometría de la cúpula y la bóveda, se ha usado la aplicación compatible con ANGLE y CAD **BOVEDAS 3D**, también desarrollado por el profesor Alonso.

Una vez construido el modelo se ha calculado en dos regímenes, **lineal y no lineal**. Ya que tenemos una variedad de materiales frágiles y dúctiles, así se puede analizar de una forma más completa y exhaustiva.

Para construir el modelo completo se ha simplificado cada elemento constructivo mediante barras o elementos finitos, dependiendo si se trataba de elementos unidireccionales o superficiales. Las características del modelo son las siguientes:

Se ha considerado al modelo como una estructura rígida espacial, por lo que se consideran todos los nodos y conexiones como rígidos.

Nodos_ 14385

Barras_2295

Láminas_ 14976

Nº de ecuaciones_ 85470

Tiempo de Calculo lineal 53 segundos

Tiempo de Calculo no lineal 23 minutos

Por un lado las barras en ANGLE representan elementos estructurales lineales como pueden ser pilares, cerchas o vigas, y después estas barras se les puede asignar el material correspondiente (acero, hormigón, madera). Así como la sección que tiene cada barra, que pueden ser rectangulares, secciones de perfiles metálicos del prontuario o también se pueden generar secciones nuevas. Esta herramienta es muy útil para evaluar estructuras de edificios antiguos donde los perfiles empleados pueden ser muy diferentes de los que en la actualidad se comercializan. Por otro lado tenemos los elementos estructurales superficiales como pueden ser los forjados, losas, cúpulas, bóvedas o muros. Para representar estos elementos se crea una malla con un determinado espesor y material. (*Img. 14*)

Ahora se analizará por fases el proceso constructivo, y explicando cómo se ha realizado el modelo de cálculo, y cuales han sido las consideraciones para aproximarse lo más posible a la realidad. Comenzaremos por el muro, seguido de la bóveda y la subestructura que soporta dicha bóveda, la cúpula y finalmente las cerchas que sustenta la cúpula.

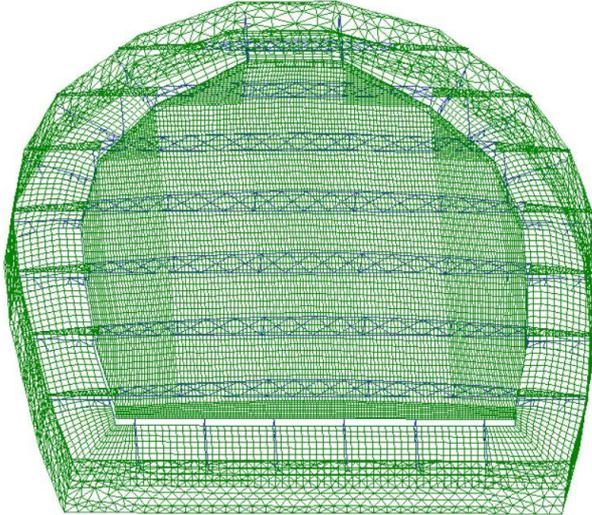


Imagen 14: Modelo de cálculo

En la primera fase, el muro se ha simplificado como una malla formada por caras 3d en el centro geométrico del mismo y con la altura correspondiente a cada tramo del muro (Img. 15). Esta malla es de caras triangulares, aunque también podría haberse hecho con forma rectangular. Cada elemento 3d se le ha asignado un material y un espesor para agregar las cualidades del elemento que representa. En nuestro caso el muro tiene un espesor de 40 cm, y es de ladrillo, cuyas propiedades analizaremos en el punto 5.2. Como apoyo del muro se ha considerado una cimentación a modo de zapata corrida, sin llegar a calcularla, puesto que esa parte de la estructura queda excluida de este análisis, debido a la dificultad para poder llegar a saber la dimensión y el estado en el que se encuentra. Con esta malla se puede saber los esfuerzos a los que está sometido el muro, así como las tensiones y poder comparar los resultados.

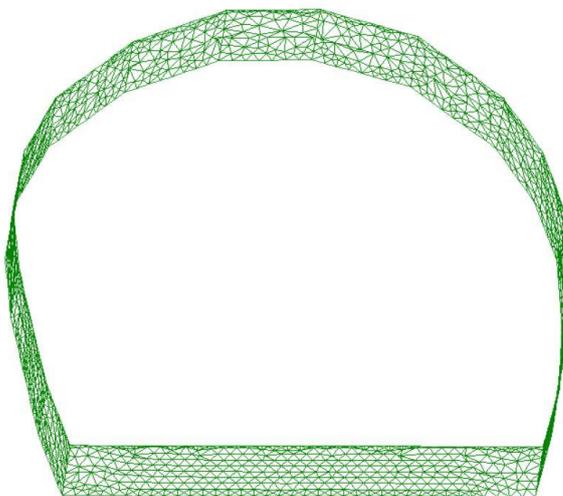


Imagen 15: Modelo de cálculo_Muro perimetral

La segunda fase constructiva, es la generación del modelo de la bóveda, concretamente media bóveda (*Img. 16*) que rodea el perímetro de la cúpula central que cubre el patio de butacas, mientras que esta bóveda hace de cubierta para los palcos situados en el muro.

Para la modelización de la bóveda y la cúpula se ha usado la aplicación Bóvedas 3D, que hace posible el mallado de elementos superficiales curvos, en una y dos direcciones de curvatura. En este caso y a diferencia del muro, se ha realizado con caras 3d rectangulares, que se adaptan a la compleja forma de dicha bóveda. El material asignado ha sido el ladrillo y con un espesor de 15 cm.

La media bóveda se conecta al muro mediante el enlazado de los nodos que conforman las caras 3d que lo componen a los nodos del muro, asegurándonos así que en el modelo ambos materiales trabajan de manera conjunta, como lo hace en la realidad.

En la parte superior de ésta hay un perfil metálico IPE donde de manera puntual se cuelga, a través de otra pieza metálica que abraza el IPE. También ayuda una subestructura conformada con perfiles metálicos y de madera. Esta subestructura apoya en el muro y en el cordón inferior de las cerchas. (*Img. 17*)

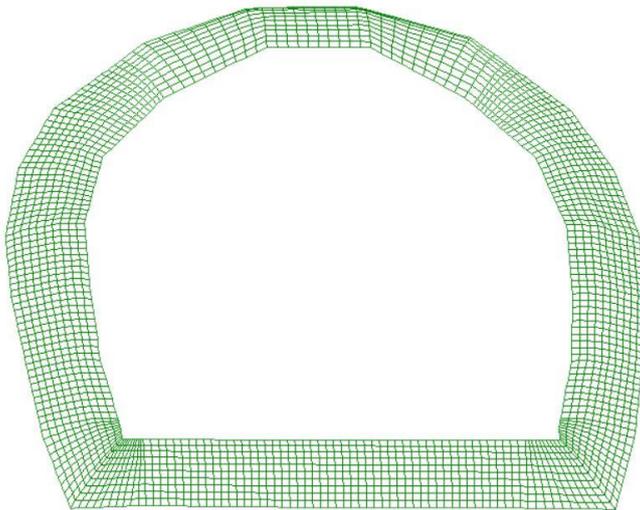


Imagen 16: Modelo de cálculo_Bóveda

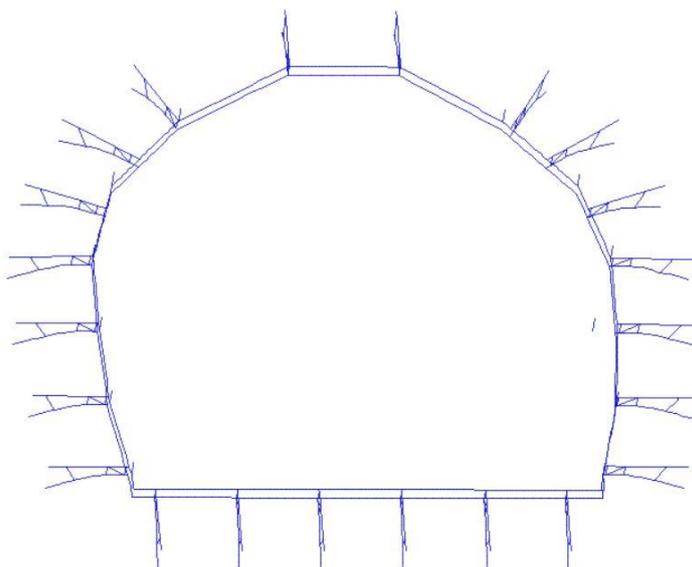


Imagen 17: Modelo de cálculo_Subestructura metálica de la Bóveda

La siguiente fase es el mallado de la cúpula de ladrillo (*Img. 19*), esta malla tiene una curvatura en ambas direcciones, creando cuadriláteros y triángulos para adaptar la malla a la forma de la misma (herradura). Al igual que la bóveda, la cúpula está construida con dos roscas de ladrillo macizo, por lo que se le asigna un espesor de 15 cm.

La cúpula descansa en el perímetro sobre un perfil de acero IPE que es donde se cuelga los conectores de la bóveda.

Toda la cúpula está colgada de las cerchas metálicas. Siete cerchas apoyadas en el muro, de diferentes medidas, y construidas con perfiles de acero, donde el cordón inferior es horizontal y el superior curvo. Estas cerchas tienen una barra vertical que une los dos cordones y se prolongan mediante unas placas de acero de donde se cuelga y conecta la cúpula. (*Img. 18*)

Muchos de los perfiles que constituyen la cercha no son perfiles convencionales, ya que estas cerchas tienen más de 100 años, por lo que se han creado estos perfiles “especiales” en el programa ANGLE y se han asignado para poder ser lo más preciso posible a la hora de generar el modelo. Estos perfiles son dibujados en el programa como una línea que se encuentra en la directriz del centro geométrico de la barra, a la cual se le asigna el material, en este caso acero y las diferentes secciones en forma de L.

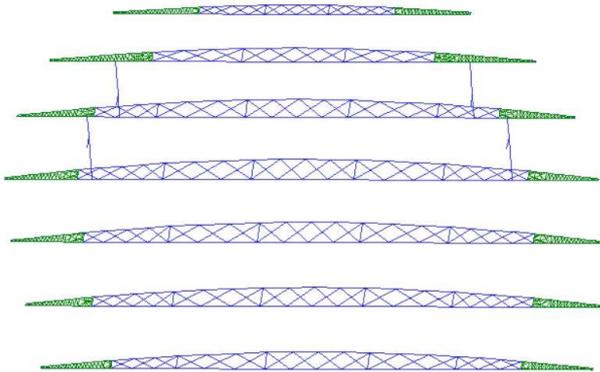


Imagen 18: Modelo de cálculo_Cerchas Metálicas de la cúpula

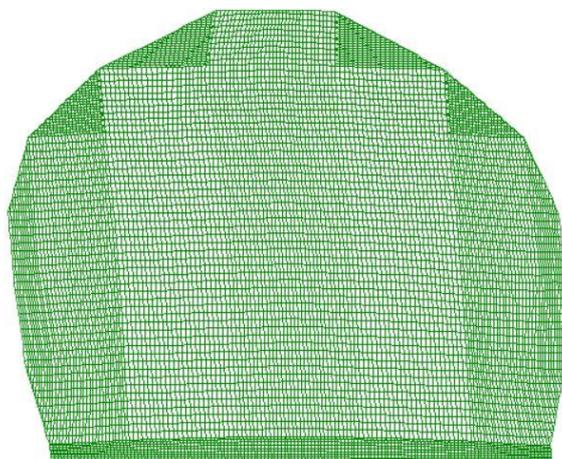


Imagen 19: Modelo de cálculo_Cúpula

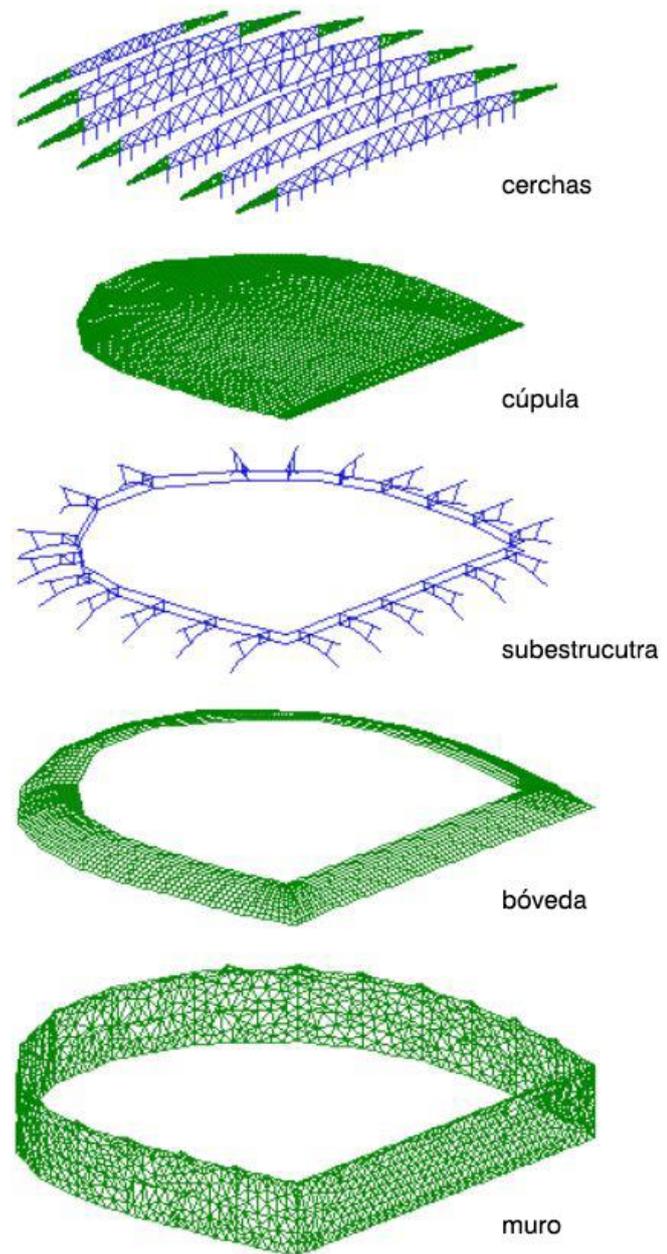


Imagen 20: Modelo estructural desplegado

5.2_Evaluación de Cargas

Después de hacer el modelo, se debe asignar las cargas que soporta la estructura representando así de manera aproximada la realidad. De este modo procedemos a evaluar las cargas de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación (CTE), concretamente en su apartado DB-SE-AE_ Documento Básico. Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación.

En este modelo en particular, las cargas aplicadas sobre la estructura se pueden distinguir entre cargas permanentes y sobrecargas de uso.

En las cargas permanentes se encuentra el propio peso de los materiales, a cada material se le ha asignado un peso específico.

Para los elementos lineales, las barras de acero o madera, y cuando tenemos una superficie, se asigna un espesor a la lámina y junto a la aplicación del material, el programa calcula el peso de la malla.

En resumen los pesos que se han tenido en cuenta son los siguientes:

Acero	75 KN/m ³
Madera	0.5 KN/m ³
Ladrillo	1,6 KN/m ³

En cuanto a las cargas variables, solo hay que tener en cuenta una de ellas, la sobrecarga de uso de mantenimiento, puesto que nadie puede pisar encima de la cubierta. Tampoco se debe considerar el viento puesto que está localizada en el interior del teatro, y es la fachada quien recibe esas cargas y por tanto tampoco de nieve.

Esta sobrecarga, según el CTE tiene un valor de 0.5 KN/m² en toda la superficie de la cúpula.

Con estas cargas las posibles combinaciones de hipótesis, son muy sencillas, puesto que solo tenemos una para el cálculo lineal y otra para el cálculo no-lineal.

En el cálculo lineal:

En Estado Limite Ultimos (ELU) tenemos una sola combinación:

-Hipotesis 1 x 1,35 + Hipotesis 2 x 1,5

En Estado Límite de Servicio (ELS) tenemos una sola combinación:

- Hipotesis 1 x 1 + Hipotesis 2 x 0,5

En el cálculo no-lineal:

- Hipotesis 1 x 2+ Hipotesis 2 x 2

6. Método de Cálculo

La teoría de la Elasticidad determina el comportamiento de una estructura ante las cargas mediante la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales, llamadas ecuaciones de campo o de gobierno, complementados por las condiciones de contorno o de sustentación.

Los métodos tradicionales de cálculo de estructuras utilizan la Resistencia de Materiales que añade hipótesis simplificadoras a la Teoría de la Elasticidad para resolver las ecuaciones de gobierno, obteniéndose unas soluciones que se consideran exactas.

Sin embargo, estos métodos tradicionales de cálculo normalmente solo se pueden aplicar a estructuras articuladas o reticuladas. En estructuras más complejas como las estructuras continuas es necesario aplicar métodos aproximados como el *Método de los elementos finitos*. Después de dividir la estructura en partes, llamadas elementos finitos, interconectados entre sí, el método de los elementos finitos reduce el problema elástico a la resolución de un sistema de ecuaciones algebraicas. Este método se basa en una serie de conceptos que se agrupan en los aparatos siguientes.

- I. Conceptos de Elasticidad
- II. Conceptos energéticos
- III. Conceptos matemáticos

Cuando analizamos los distintos métodos para evaluar las estructuras debemos tener en cuenta que se basan en la ley de Hooke:

$$F = k \times \delta$$

Donde la fuerza [F] es igual al producto de la deformación [δ] y una constante [k]. A través de esa igualdad podemos deducir que la deformada es el producto de la fuerza [F] y la constante [k]. El cálculo lineal supone que esa constante [k] es un solo valor, lo que es una simplificación a la hora de realizar los cálculos. Sin embargo, el método no lineal supone la constante [k] no constante, esto implica que en una gráfica fuerza [F] deformación [δ] la pendiente de la curva que la conforma, al someter a un elemento diferencial, es decir un elemento finito, a una tensión, varía y por tanto ha de ser calculada para cada tramo diferencial de la curva. (*Img. 22*) Este método es mucho más preciso, puesto que la pendiente de curva se adapta de manera más precisa a la realidad y por tanto se puede peritar de una manera más fiable.

En el análisis elástico lineal del material se asume que es inflexible y sus propiedades son invariables, y las ecuaciones de equilibrio son formuladas de la geometría de la estructura. Las deformaciones consecuentes son asumidas ya que son tan pequeñas que resultan insignificantes en su efecto sobre el equilibrio y el modo de respuesta del sistema.

Pero el análisis no lineal nos ofrece varias opciones para solucionar los problemas causados por la geometría, el material o ambos; en caso de la geometría se trata la estructura como un material elástico pero incluimos efectos de deformación y desplazamientos finitos en la formulación de las ecuaciones de equilibrio. Si se considera solo el material no lineal, y evaluar así los efectos que conlleva la puesta en carga de manera gradual en ciertos puntos de su geometría y ver cómo afecta eso a sus propiedades. Y en un tercer caso se incluye los efectos conjuntos del material y la geometría no lineal en el análisis.

En nuestro caso hemos analizado el modelo de daño, es decir que la no linealidad aparece por la pérdida de las propiedades del material una vez se ha puesto en carga la estructura. Después de esa puesta en carga la estructura comienza a fisurar, lo que conlleva una degradación del material.

Para explicar con más profundidad el cálculo no lineal ^[3], supongamos que en un punto de la malla hay cierta degradación, la cual se representa como huecos, ya que no aportan la rigidez que el resto. Si S es la superficie total y S' el área resistente efectiva, entonces la diferencia entre S y S' es la superficie de huecos (superficie dañada del material) por tanto la variable de daño $[d]$ queda definida como la relación de la diferencia de la superficie total menos la dañada y la superficie total. Esta variable nos indica el grado de deterioro del material, puede tener un intervalo de 0 a 1, donde 0 significa deterioro nulo y 1 el deterioro del área completa.

$$d = (S - S') / S = 1 - (S' / S)$$

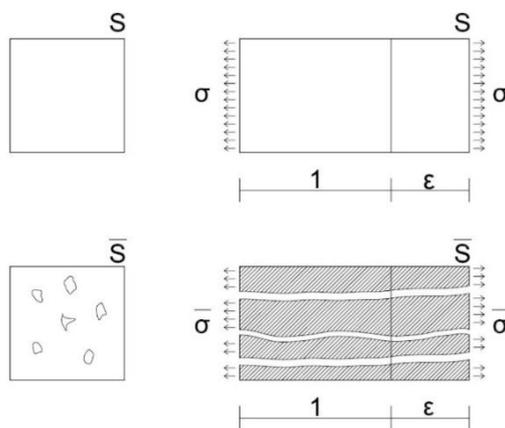


Imagen 21: Esquema comportamiento material degradado.

La relación entre la tensión de Cauchy y la efectiva que influye en la pieza o sección resistente analizada se calcula como:

$$N = S \sigma$$

$$N' = S' \sigma'$$

$$\sigma S = \sigma' S'$$

$$\sigma = (1 - d) \sigma' = (1 - d) E \varepsilon$$

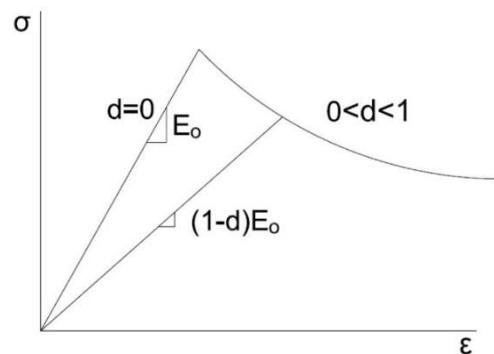


Imagen 22: Gráfica de la pendiente de la rigidez dependiendo del grado de degradación.

Gracias a este valor se puede representar de una manera más exacta el comportamiento de los materiales frágiles, como en nuestro caso. Al obtener una reducción en la rigidez proporcional al estado del material $(1-d)$.

[3] LLOPIS, V (2014) La catedral de Valencia: Construcción y estructura. Análisis del Címborio. Universitat Politècnica de València.

El modelo de ANGLE para el cálculo tiene en cuenta cómo se comportan los materiales en tracción y en compresión. Los materiales empleados en el edificio deberían haber sido sometidos a los ensayos suficientes para saber cuáles son los valores máximos de compresión y tracción. Por este motivo se ha consultado valores de otro tipo de ensayos de material en condiciones similares a las nuestras. Las características se diferencian en propiedades elásticas e inelásticas.

Se ha considerado las propiedades de la fábrica de ladrillo (*Img. 23*) las más relevantes para analizar, debido a la gran diversidad casuística de las muestras de este material en obras de rehabilitación. ^[4]

The screenshot shows the 'PROPIEDADES DE LOS MATERIALES' window for 'LADRILLO'. The window is divided into sections for elastic and inelastic properties. Elastic properties include Modulus of Elasticity (E1, E2, E3) set to 7000 MPa, Poisson's ratio (U12, U13, U23) set to 0.2, and Shear Modulus (G12, G13, G23) set to 2916.6665 MPa. Inelastic properties include Compressive strength (fc) set to 2 MPa, Tensile strength (ft) set to 0.2 MPa, and Fracture Energy (Gf) set to 80.00001 J/m2. A stress-strain graph is shown with a peak at 2 MPa and a yield point at 0.2 MPa. The graph has axes for stress (MPa) and strain (ft). The graph shows a curve that rises to a peak at 2 MPa and then drops to a yield point at 0.2 MPa. The area under the curve is shaded yellow. The graph is labeled with 'S3' at the top, 'S1' on the right, and 'fc' at the bottom. The x-axis is labeled 'ft' and the y-axis is labeled 'MPa'.

Imagen 23: Propiedades del ladrillo.

Una vez descrito el sistema de cálculo y sus características se va a estudiar cual es método de cálculo adecuado en el análisis del Teatro Principal de Castellón.

El cálculo lineal resuelve la mayoría de las estructuras calculadas hoy en día, ya que se utilizan materiales dúctiles como son el hormigón o el acero. Es por tanto una adecuada opción para calcular las estructuras de una manera más sencilla. Sin embargo cuando se debe evaluar o construir una estructura de fábrica, que es un material frágil, el cálculo no lineal obtiene una precisión mayor.

“Para realizar un análisis con un cierto rigor del comportamiento mecánico de este tipo de estructuras formadas por materiales frágiles, el análisis que mejor describe la respuesta de estas estructuras es el no-lineal. El método empleado es el de modelo de daño con su evolución frente a cargas estáticas o dinámicas.” “Veronica Llopis”

[4] LLOPIS, V (2014) La catedral de Valencia: Construcción y estructura. Análisis del Cimborrio. Universitat Politècnica de València.

El cálculo no lineal se realiza a través de los diferentes pasos de carga, donde en cada paso se somete a la estructura a un porcentaje de la carga asignada. Éstos pasos van incrementando la carga de manera porcentual. En este caso concreto, se ha asignado 20 pasos de carga. Para poder evaluar cuál sería la carga máxima que podría resistir la estructura se ha multiplicado por dos las hipótesis, para poder así evaluar cuál es el margen de seguridad de la estructura en función de la carga a la que está sometida.

Los valores porcentuales de carga hacen, que al haber decidido colocar el doble de la carga real en la hipótesis, el paso intermedio (10) corresponda con la carga real a la que está sometida la estructura. Estos valores de tensiones se pueden comparar con los del cálculo lineal, pues ambos modelos tienen la misma carga, pero la diferencia de las rigideces y las características de los materiales dependiendo si se encuentran en régimen elástico (cálculo lineal) o inelástico (cálculo no lineal) hace que se encuentre una diferencia en cuanto a los resultados.

Hay que añadir que todos estos cálculos son teóricos, y que siempre deben tomarse decisiones, no solo con los datos aportados a través de este estudio, sino también contar con otros aspectos del proyecto, en cuanto a su estado actual, o las posibles modificaciones de cara a decidir cómo actuar en un proyecto de rehabilitación.

7. Resultados y peritación

Para analizar el comportamiento global de la estructura, se obtienen las conclusiones a partir del modelo realizado, de forma global, y atendiendo a las distintas combinaciones de hipótesis.

Analizaremos lo más interesante del edificio, el comportamiento frente a ambos cálculos (lineal y no lineal) del conjunto de la estructura, la cúpula y bóveda por separado. Se analizarán a través de los diagramas de tensiones y deformada, tanto en la combinación de ELU y ELS respectivamente.

Calculo lineal

ELS_Deformada

_Modelo completo

Se analiza el modelo completo frente a la combinación de ELS en el diagrama de isovalores de desplazamientos verticales. En él se puede observar la tabla de rangos en la que se mueven las deformaciones, desde 0,007 cm a -0,798 cm. (Img. 24)

En el diagrama se puede observar como la parte de la estructura donde se produce una mayor deformación es en la cúpula, exactamente en el centro de la misma, donde vemos una gran zona que ronda los 0,8 cm. Teniendo en cuenta que la luz en ese punto es de 17,5 metros, hay una deformada equivalente a 1/2187. En el resto de elementos la deformada es prácticamente nula.

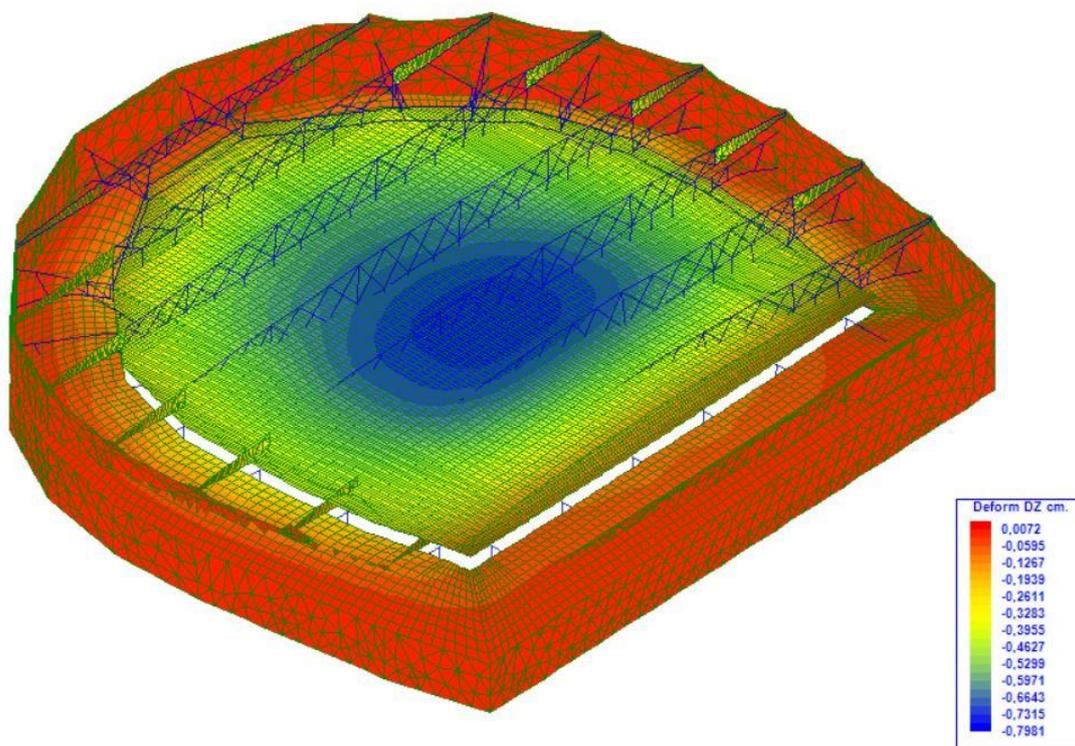


Imagen 24: Modelo de cálculo_Deformada general

Bóveda

Si se analiza por separado cada elemento se puede observar con más detalle los resultados de los cálculos. En el caso de la bóveda la deformada es bastante regular y se mueve en un intervalo de 0,007 cm y -0,25 cm. (Img. 25) Los puntos con una deformada más acusada se encuentran en la parte superior de la bóveda puesto que la parte baja está apoyada sobre el muro, y este impide que haya cualquier movimiento gracias a su rigidez.

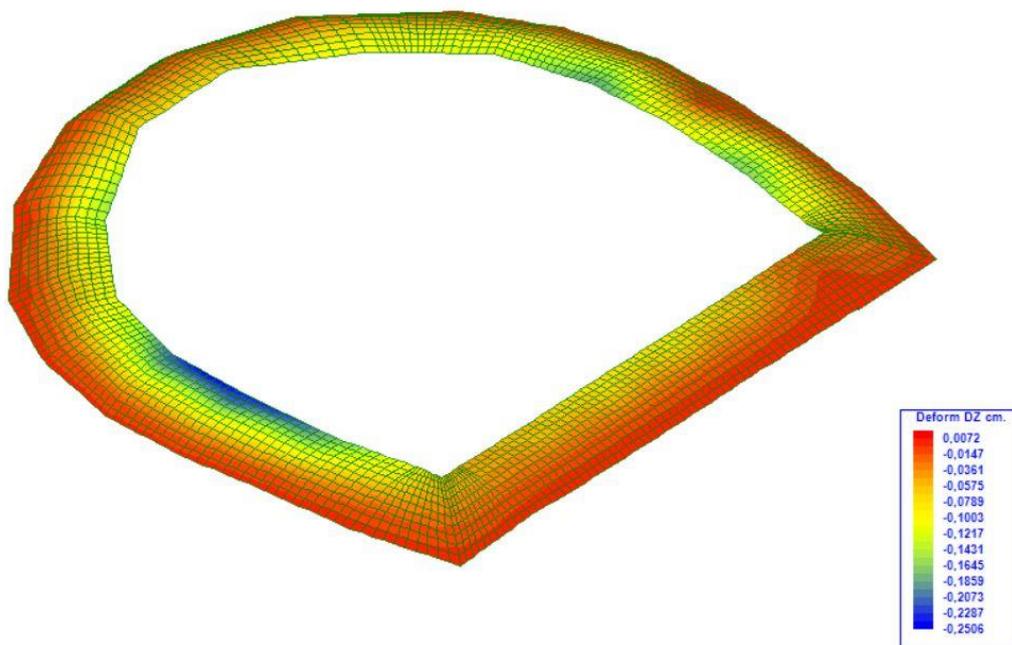


Imagen 25: Modelo de cálculo_defromada Bóveda

_Cúpula

La cúpula el intervalo se mueve de 0,001 cm a -0,798 cm, (Img. 26) esto implica que asemejando al modelo completo, esta parte de la estructura es la tiene la flecha más significativa, y es normal, es la pieza más grande y con una resistencia menor. En la parte central es donde se halla esa mayor deformada. Esto se debe a que las cerchas deforman más en su punto medio y estas son las encargadas de sostener a la cúpula por lo que la suma de las deformadas de las cerchas, que junto a la intrínseca de la propia cúpula hacen que esa deformada se acentúe en la parte central de la cúpula.

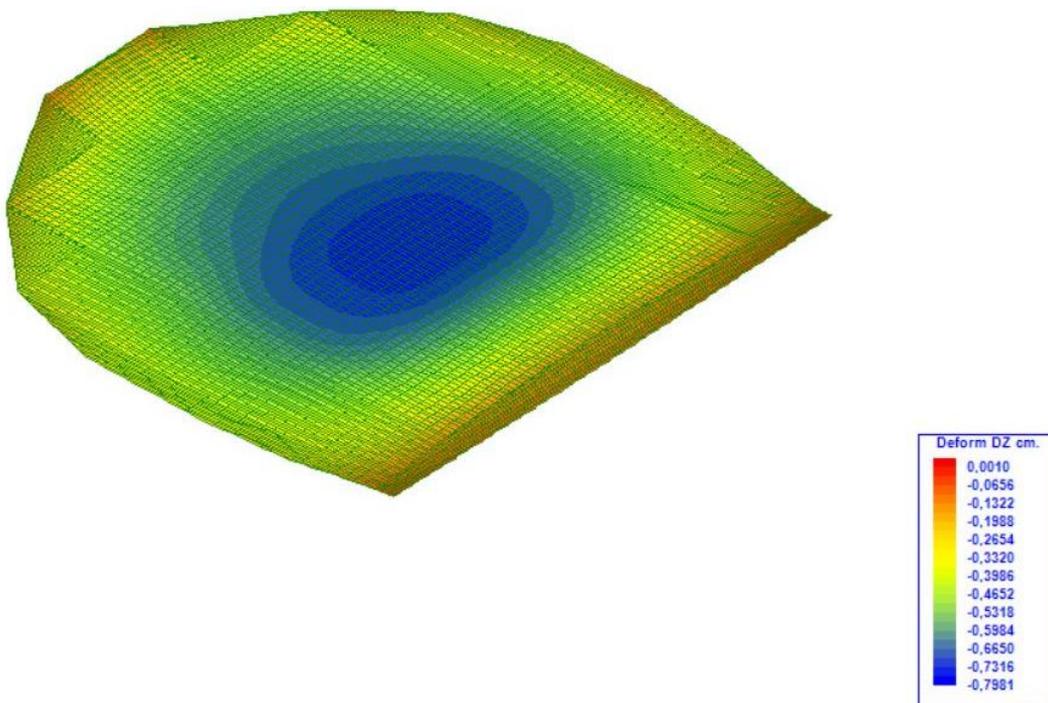


Imagen 26: Modelo de cálculo_deformada_Cupula

ELU_Tensiones

_Modelo completo

Por otro lado se analizan también los diagramas de tensiones, primero de manera global, donde se analice las tensiones a la que está sometida la estructura.

En el diagrama de tensiones se observa la tensión a la que está sometida los sólidos que conforman la estructura, para así poder evaluar el estado en el que se encuentran. Este diagrama (*Img. 27*) tiene un intervalo de tensiones de -1 MPa a 1 MPa. Apareciendo algunas piezas que salen de ese intervalo, esas piezas son las más solicitadas.

Los elementos modelizados con láminas, como son el muro, la cúpula y la bóveda, tienen una tensión negativa, es decir se encuentran a compresión, algo obvio puesto que es como mejor trabajan dichas estructuras.

Mientras que los elementos unidimensionales modelizados como barras están trabajando a compresión y tracción, tanto la subestructura como las cerchas.

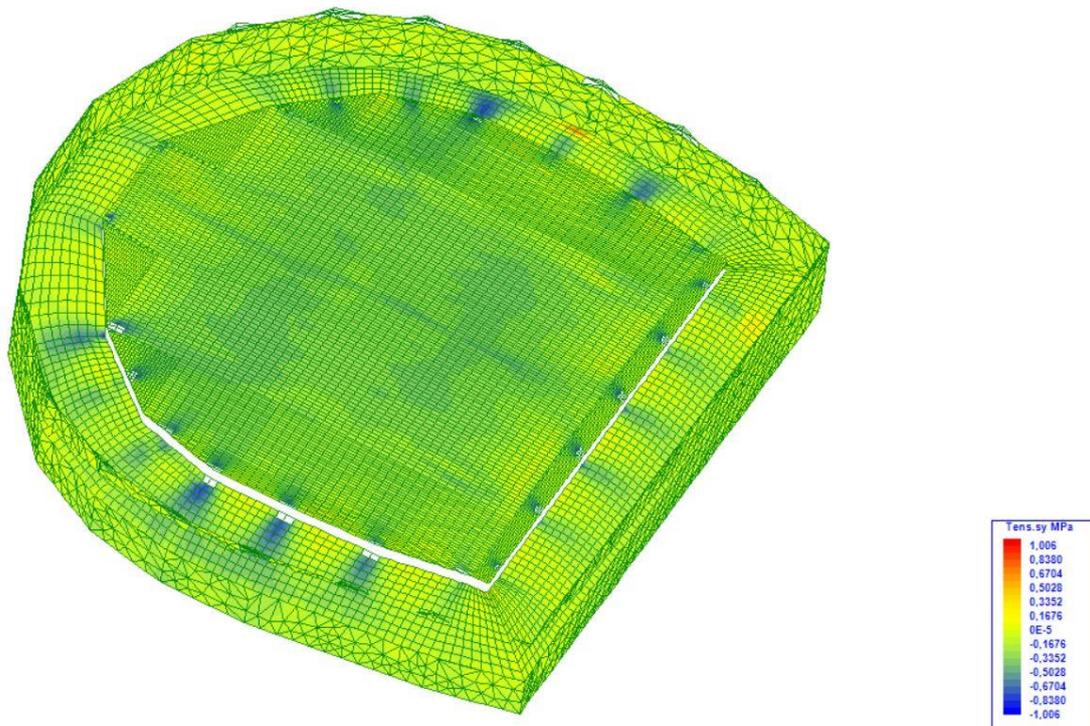


Imagen 27: Modelo de cálculo_tensiones modelo estructural

Bóveda

En el diagrama de la bóveda podemos observar como el comportamiento de esta estructura trabaja en unos intervalos entre los -1 MPa y los 2 MPa. Aunque como se observa en el diagrama (*Img. 28*) casi toda la malla se encuentra con valores cercanos a una tensión igual a 0,1 y -0,1 MPa. También se puede observar como los puntos más conflictivos están localizados exactamente en la unión entre la subestructura de acero que soporta la bóveda con dicha bóveda que alcanza valores de -1 MPa.

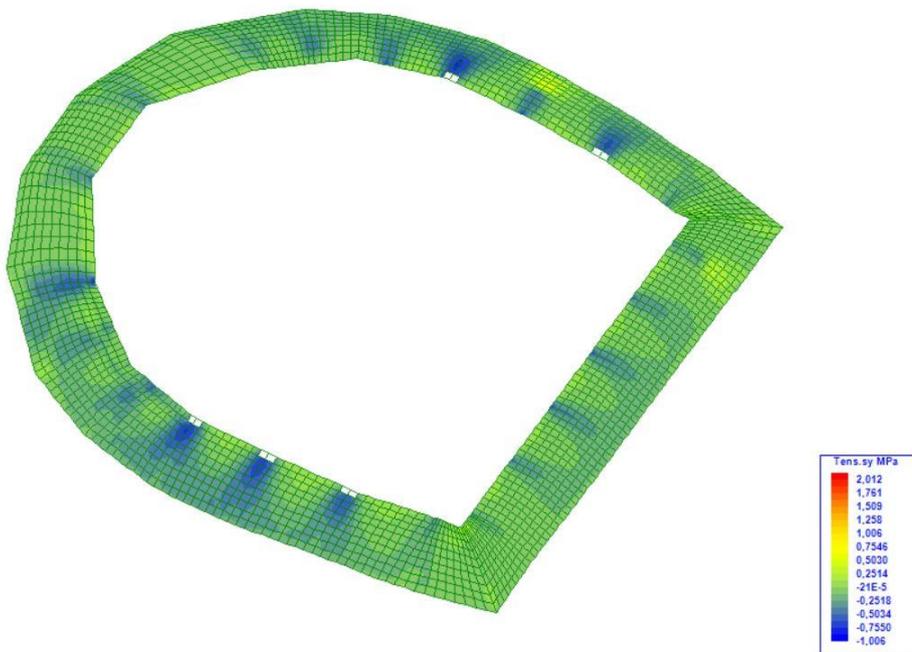


Imagen 28: Modelo de cálculo_tensiones modelo estructural_Boveda

_Cúpula

El diagrama de la cúpula (*img. 29*) se puede observar el comportamiento de la cúpula y se observa los intervalos de tensiones que varían entre -1 MPa a 2 Mpa. En el diagrama como el efecto de las tensiones más fuertes se hallan también en la unión entre la cúpula y los soportes metálicos, así como la tensión más representativa en la zona central de la misma.

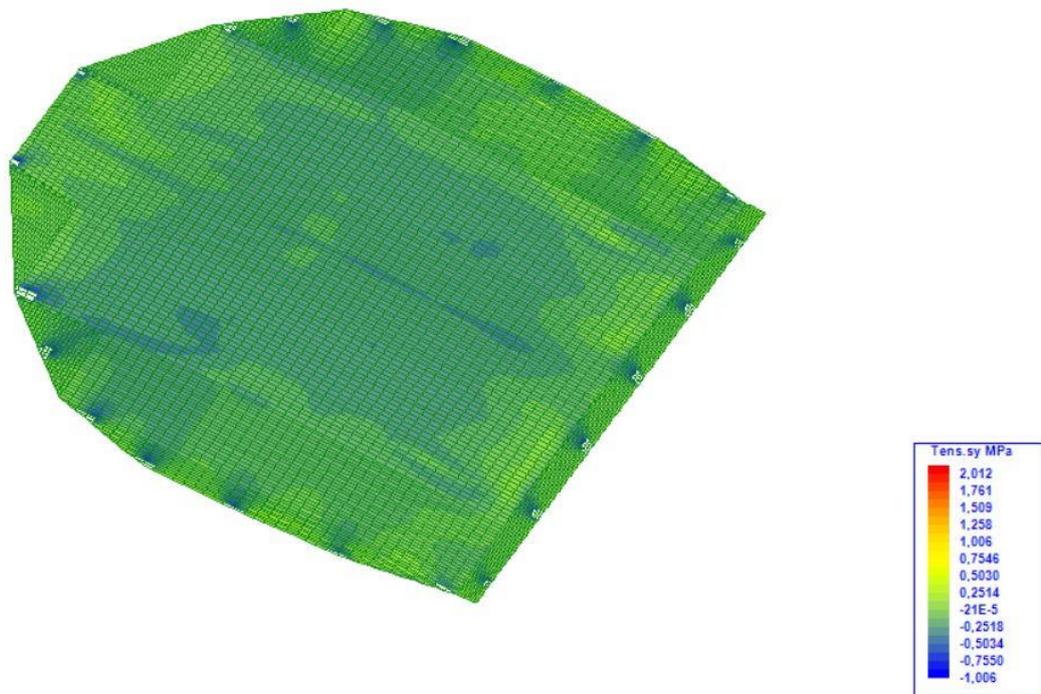


Imagen 29: Modelo de cálculo_tensiones modelo estructural_cúpula

_Cerchas

En el diagrama de las cerchas (*Img. 30*) se puede observar el esfuerzo axial a los que están sometidos las distintas barras que conforman la celosía. En el diagrama se aprecia como las barras de los cordones superior e inferior de las cerchas tienen la mayor sollicitación, por el contrario las piezas de la subestructura que soporta la cúpula en el perímetro apenas tienen esfuerzo axial. Al igual que el resto de la estructura los valores son inferiores a la resistencia de las secciones como podemos observar en la sección más desfavorable en el cordón inferior de la segunda cercha. En ese cordón hay un axil de 120 KN (*Img.31*) y la sección del perfil es 4050 mm² (*Img. 32*), por lo que hay una tensión de 30 KN/mm².

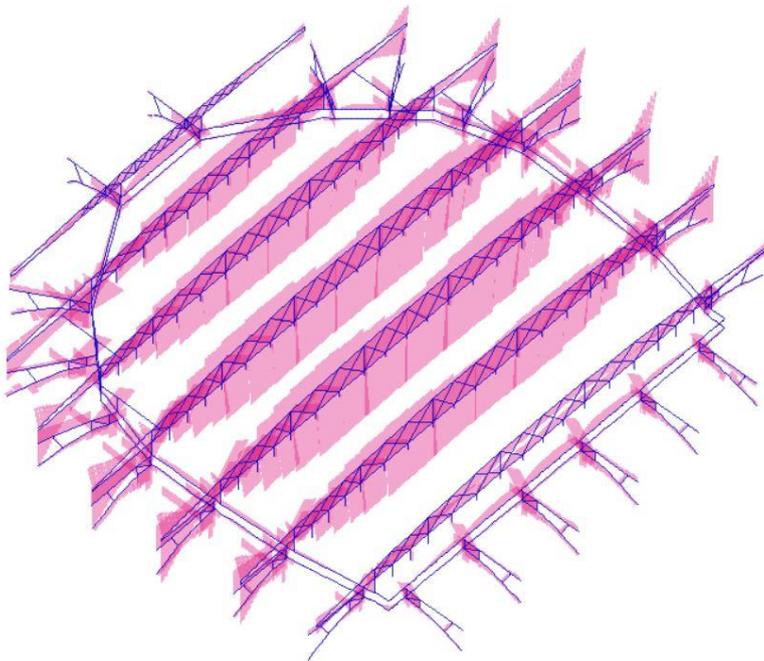


Imagen 30: Modelo de cálculo_axiles modelo estructural_cerchas

SOLICITACIONES de la Barra 1547							
BARRA 1547 Nodos 13680-13681 Luz 0,77 1 1							
Esfors	Nx	Vy	Vz	Mx	My	Mz [kN mkN]	
Inicio	-119,69	-1,22	0,06	0,00	-0,02	-0,74	
Final.	119,69	1,71	-0,06	0,00	-0,02	-0,39	

Imagen 31: Solicitaciones de la sección de la barra del cordón inferior de la cercha.

Propiedades de la Barra 1610	
->Nodos 13749-13750 Luz 0,770 mt. Capa Perfil doble L 8,5	
PERFIL perfildobleL*85 Girada 0º	
Ax: 40,5 cm ² Ay: 22,5 cm ² Az: 15,0 cm ²	
Ix: 62,0 cm ⁴ Iy: 502,9 cm ⁴ Iz: 287,6 cm ⁴	
Material S-275 E= 210000 MPa P.esp= 7850 kg/m ³	

Imagen 32: Propiedades de la sección de la barra del cordón inferior de la cercha

Calculo no-lineal

ELU_Tensiones

Para analizar los resultados del cálculo no lineal se han sacado imágenes en diferentes pasos de carga, para poder ver la evolución de las tensiones dependiendo de la degradación de los materiales. De los 20 pasos de carga en los que está dividido el cálculo la estructura solo resistió llegar hasta el 17, en el paso 18 la bóveda del Teatro colapsó. Para poder ver la evolución de tensiones a medida que la carga iba aumentando se han analizado 3 pasos de carga:

Paso_10 En este paso la carga es del 100 %. En este diagrama se puede ver que las tensiones están en un intervalo de 0.2 MPa y -2 MPa, (*Img. 33*) que son los valores de resistencia a tracción y compresión del material en régimen inelástico. Se observa como los puntos de apoyo de la cúpula con la subestructura de la bóveda aparecen unas tensiones máximas de 0.2 MPa.

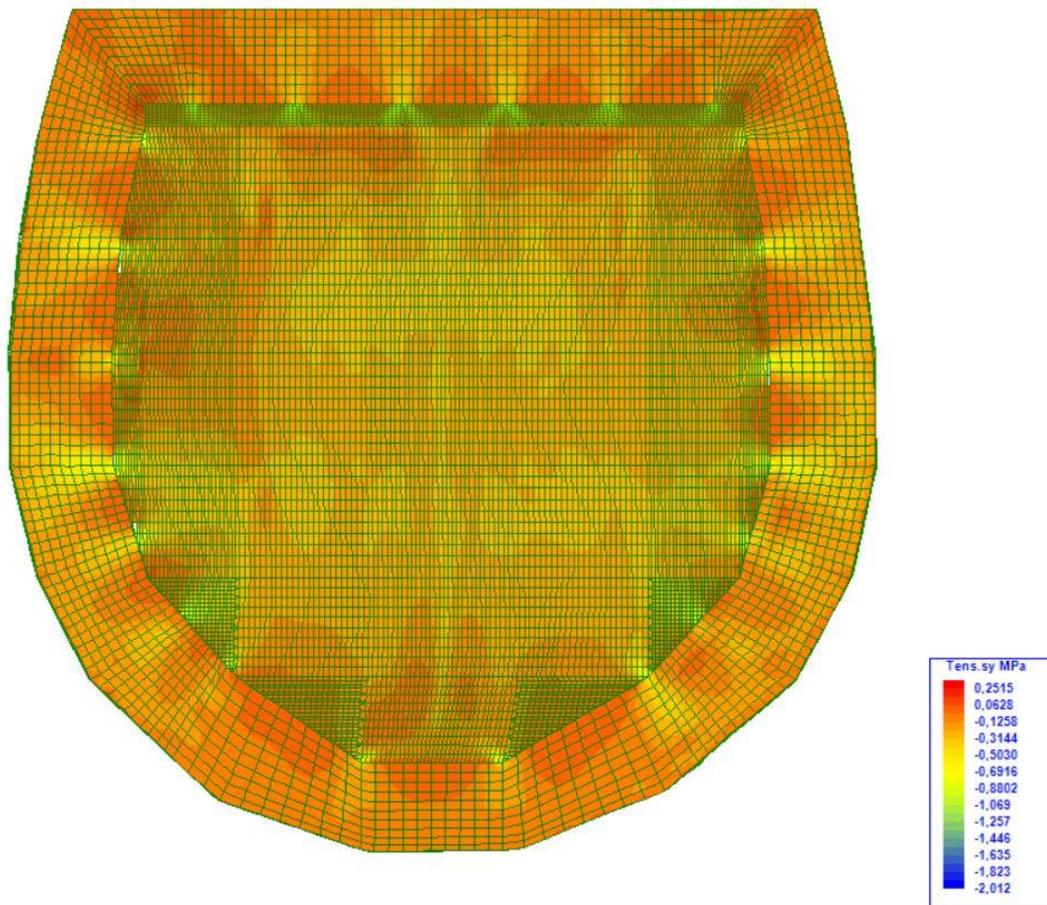


Imagen 33: Modelo de cálculo_tensiones modelo estructural_completo_paso 10

El siguiente paso a analizar es el último antes de la rotura:

Paso_17 En este paso la carga es del 160 %. En este diagrama podemos ver que las tensiones están en un intervalo de 0.2 MPa y -2 MPa, (img. 34) al igual que en el paso anterior. La diferencia de un paso a otro es la cantidad de puntos que tienen la tensión máxima del material a tracción (0,2 MPa). Esto se debe a que en el cálculo no lineal, cuando un punto de la estructura llega a la resistencia máxima, el cálculo asume que no puede recibir más tensión y por tanto las solicitaciones se reparten en los nodos anexos a estos.

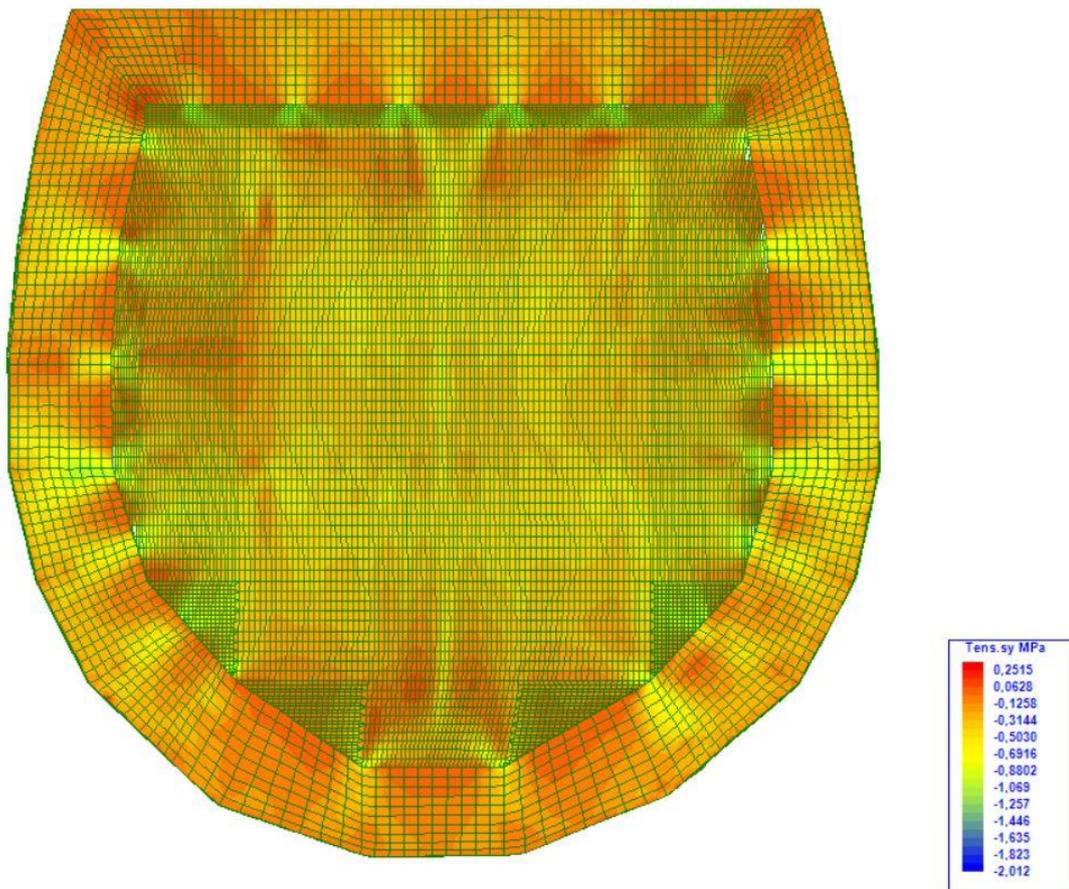
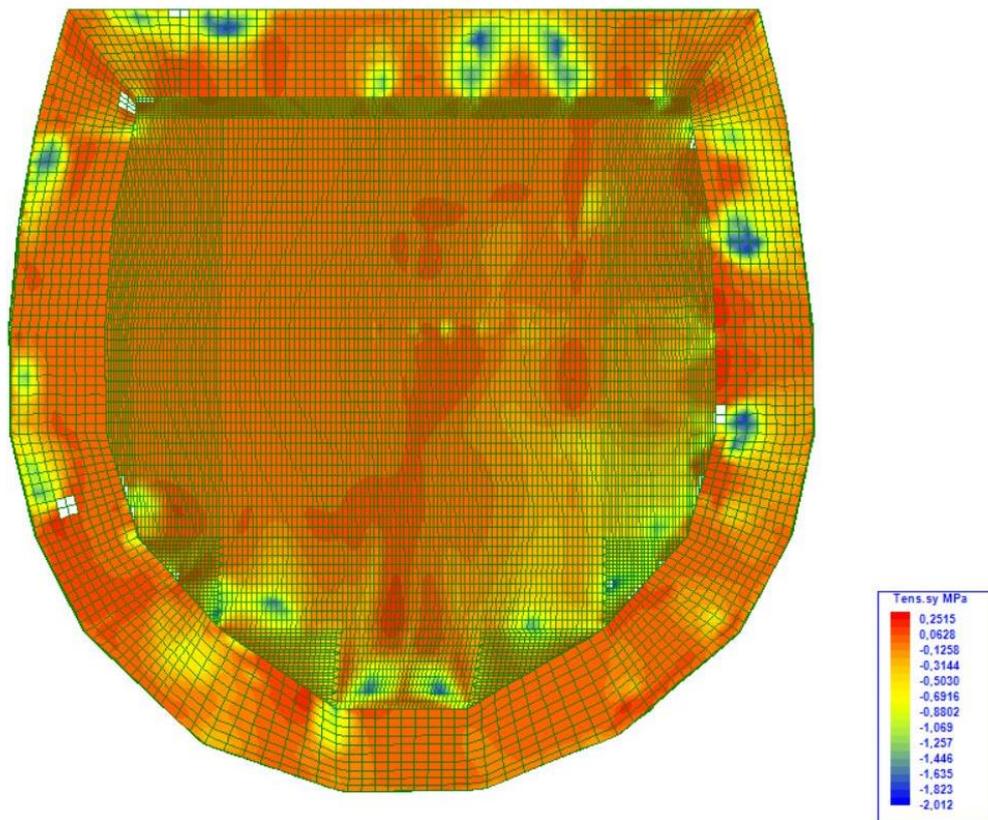


Imagen 34: Modelo de cálculo_tensiones modelo estructural_completo_paso 17

El siguiente paso analizado es el 18 donde se ha producido la rotura debido a la excesiva carga asignada a la estructura.

Paso_18 En este paso la carga es del 170. En este paso el modelo sufre una fractura, y los materiales ya no pueden aguantar más carga, se puede deducir, según los datos obtenidos con el cálculo, que el margen de seguridad de la cúpula es de 1,7 veces la carga actual. Cuando el modelo tiene una gran cantidad de elementos a la tensión máxima se produce el colapso. Además se han obtenido las tensiones de una lámina que conforma la cúpula donde se puede apreciar con detalle el espesor y todos los esfuerzos a los que está sometida un punto conflictivo de la estructura como es una unión entre la cúpula y la subestructura de acero. (Img. 36)



Imgen 35: Modelo de cálculo_tensiones modelo estructural_completo_paso 18

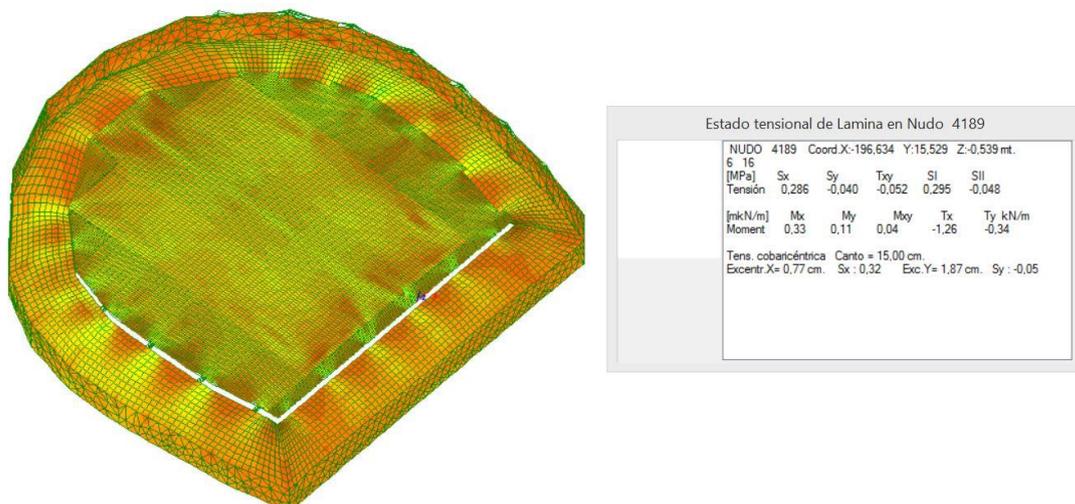


Imagen 36: Modelo de cálculo_tensiones modelo estructural_completo_paso 18

8. Conclusiones

Después de haber analizado en profundidad tanto el sistema constructivo, como el modelo estructural de la bóveda del Teatro Principal de Castellón, y como hemos comentado al inicio de este trabajo, concretamente en los objetivos del mismo, podemos dar una respuesta al estado estructural en el que se halla la bóveda.

Para hablar del estado en el que se encuentra la bóveda se debe analizar los elementos que la componen y las uniones entre ellos. Tras una visita al lugar y una observación exhaustiva se ha confirmado el buen estado en el que se encuentran los componentes que forman la estructura de la bóveda que están a la vista. Entre ellos están los perfiles de acero que componen las cerchas, así como las cartelas y los roblones. Por otro lado la bóveda está pintada en la cara inferior, por tanto no se puede ver el estado en el que se encuentra. Sin embargo se observan unas pocas grietas en la pintura aunque son poco significativas. Además por la cara superior, que está al descubierto, se puede ver que tampoco hay fisuras de importancia, lo que hace pensar que la bóveda no está fisurada de gravedad.

En cuanto al enlace entre los diferentes elementos constructivos también se encuentran en buenas condiciones, no hay partes oxidadas ni sueltas, por lo que podemos asumir que toda la estructura colabora de manera adecuada para su correcto funcionamiento.

Gracias a este análisis se ha podido generar un modelo bastante fiable, debido a que a pesar de las simplificaciones realizadas se ha podido afinar mucho en los enlaces entre elementos y en los tipos de perfiles y espesores de los elementos finitos.

Como indica el CTE se ha mayorado las cargas que actúan en el cálculo lineal sobre el modelo y reducido la resistencia de materiales, por lo que se puede considerar correcto el modelo según el DB_SE_AE.

Tras haber analizado el modelo de cálculo en ambos regímenes, lineal y no lineal, se pueden sacar unas cuantas conclusiones, en cuanto a las deformaciones de la cúpula en ambas combinaciones y también a través de las tensiones del modelo global y por separado.

En el cálculo lineal los desplazamientos verticales rondan los valores máximos de 0,8 cm de deformada en una luz de 17,6 m que equivale a 1/2187, al ser una deformada tan pequeña y por ser una estructura de tanta antigüedad y no estar contemplada en el CTE se asumirá que no dará ningún problema significativo. Los resultados generados de cada elemento constructivo también están dentro de la normativa, siendo la cúpula la parte más afectada, puesto que los muros, la bóveda y las cerchas se encuentran solicitadas muy por debajo de su capacidad.

Otro indicativo del estado estructural del edificio son las solicitaciones. Para analizar las solicitaciones diferenciaremos entre las láminas y las barras.

En el caso del muro se puede ver como las tensiones son equilibradas y hay una tensión que ronda los -0,2 MPa, por lo que están muy por debajo de su tensión máxima admisible. La bóveda tiene una tensión también bastante homogénea en casi toda su geometría, y está alrededor de los -0,15 MPa, salvo en algunos puntos donde conecta con los perfiles que la sujetan que hace que esa tensión ascienda a -0,25 MPa.

Cuando analizamos la cúpula sí que vemos que un mayor rango de distribución de tensiones que se mueve entre los -2 MPa a 1 MPa, aunque de manera generalizada la tensión en toda la superficie ronda los 0,3-0,5 MPa, y solo en puntos conflictivos aparecen unas tensiones mayores, como son los encuentros con los elementos metálicos que la unen. Aunque estas tensiones también están por debajo de la capacidad del material que entre los 0,25 MPa y -2 MPa.

Sin embargo, cuando analizamos los elementos unidireccionales como son las cerchas hay varios diagramas de solicitaciones, los que más interesan son los axiles. Tras analizar este diagrama podemos deducir que todas las barras se encuentran con solicitaciones muy bajas, y que ninguna corre el peligro de colapsar.

Hay mucha diferencia entre las solicitaciones de unas barras y otras, puesto que hay barras que trabajan con un axil de 120 KN y otras con 10 KN, pero todas ellas son válidas ya que tienen una sección superior a la necesaria para no superar la tensión máxima del material.

En el cálculo no lineal se han sacado las siguientes conclusiones, la estructura no tiene peligro de colapsar, como ya adelantó el cálculo lineal, pero ahora se puede estimar con una mayor exactitud cuál es la carga máxima y el margen de seguridad que tiene dicha estructura. Ésta estructura podría llegar a soportar un 70 % más de la carga que ahora mismo tiene. Después de comparar los resultados de ambos cálculos sacamos varias conclusiones.

Las tensiones de los elementos del modelo de cálculo son diferentes, y esto se debe a que el cálculo lineal no tiene en cuenta la resistencia máxima de los materiales al contrario que el no lineal, por eso muestra unas tensiones más reales, puesto que se ha restringido los valores máximos de compresión y tracción.

En rasgos generales podemos verificar que la estructura de la cúpula del Teatro Principal de Castellón, a pesar de la antigüedad de la construcción, está en buenas condiciones. Ya que tras el análisis del modelo se ha llegado a la conclusión de que cada elemento por separado y en conjunto están correctamente.

9. Bibliografía

- BLAAUWENDRAAD, J. (2006) *Plates and FEM*. Waterloo: University of Waterloo.
- LLOPIS, V (2014) *La catedral de Valencia: Construcción y estructura. Análisis del Cimbório*. Universitat Politècnica de València.
- McGUIRE, W., GALLAGHER, R.H., ZIEMIAN, R. D. (2002) *Matriz Structural Analysis*. Nueva York: [editorial]
- VAZQUEZ, V, LOPEZ.E. (2001) *El método de los elementos finitos*. Editorial Noela [Madrid]
- <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/83473/ariadna-01-02_10.pdf?sequence=1>
- <http://www.castello.es/web30/pages/generico_web10.php?cod1=18&cod2=176>

Referencia de Imágenes:

- [1] Fotografía principios de siglo XX.
(<http://castello.es/web30/pages/generico_web10.php?cod1=18&cod2=176>)
- [2] Boceto de la fachada principal del teatro.
(<http://castello.es/web30/pages/generico_web10.php?cod1=18&cod2=176>)
- [3] Planta de butacas.
(<http://castello.es/web30/pages/generico_web10.php?cod1=18&cod2=176>)
- [4] Fotografía del interior de la escena del teatro.
(<http://castello.es/web30/pages/generico_web10.php?cod1=18&cod2=176>)
- [5] Fotografía vista cenital del interior de la bóveda del teatro.
(<http://castello.es/web30/pages/generico_web10.php?cod1=18&cod2=176>)
- [6] Plano de la planta de estructura y sección de la cercha 1. (Generación propia)
- [7] Plano de las cerchas que sujetan la cúpula. (Generación propia)
- [8] Plano de despiece de la cercha 1 y la descripción de sus componentes. (Generación propia)
- [9] Fotografía de los cordones de la cercha. (Generación propia)
- [10] Fotografía del detalle de una cercha. (Generación propia)
- [11] Sección constructiva encuentro bóveda y cúpula sujeta mediante cercha metálica. (Generación propia)
- [12] Fotografía sistema de descuelgue de la semibóveda tabicada. (Generación propia)
- [13] Fotografía sistema de descuelgue de la cúpula tabicada. (Generación propia)
- [14] Modelo de cálculo estructural completo. (Generación propia)
- [15] Modelo de cálculo estructural del muro perimetral. (Generación propia)

- [16] Modelo de cálculo estructural de la bóveda. (Generación propia)
- [17] Modelo de cálculo estructural de la subestructura metálica que sujeta la bóveda. (Generación propia)
- [18] Modelo de cálculo estructural de las cerchas metálicas que sujeta la cúpula. (Generación propia)
- [19] Modelo de cálculo estructural de la cúpula. (Generación propia)
- [20] Modelo de cálculo estructural desplegado. (Generación propia)
- [21] Esquema del comportamiento del material degradado. (LLOPIS, V (2014) *La catedral de Valencia: Construcción y estructura. Análisis del Címborio.*)
- [22] Gráfica de la pendiente de la rigidez dependiendo del grado de degradación. (LLOPIS, V (2014) *La catedral de Valencia: Construcción y estructura. Análisis del Címborio.*)
- [23] Propiedades del ladrillo (Generación propia)
- [24] Diagrama de deformada del modelo de cálculo estructural completo. (Generación Propia)
- [25] Diagrama de deformada de la bóveda del modelo de cálculo estructural. (Generación Propia)
- [26] Diagrama de deformada de la cúpula del modelo de cálculo estructural. (Generación Propia)
- [27] Diagrama de tensiones del modelo de cálculo estructural completo. (Generación Propia)
- [28] Diagrama de tensiones de la bóveda del modelo de cálculo estructural. (Generación Propia)
- [29] Diagrama de tensiones de la cúpula del modelo de cálculo estructural. (Generación Propia)
- [30] Diagrama de axiles de la cercha del modelo de cálculo estructural. (Generación Propia)
- [31] Solicitaciones de la sección de la barra del cordón inferior de la cercha. (Generación Propia)
- [32] Propiedades de la sección de la barra del cordón inferior de la cercha. (Generación Propia)
- [33] Diagrama de tensiones del modelo completo en régimen no lineal (Paso 10). (Generación Propia)
- [34] Diagrama de tensiones del modelo completo en régimen no lineal (Paso 17). (Generación Propia)
- [35] Diagrama de tensiones del modelo completo en régimen no lineal (Paso 18). (Generación Propia)
- [36] Diagrama de tensiones de un punto del modelo en régimen no lineal (Paso 18). (Generación Propia)