



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

LAS ESTRUCTURAS HISTÓRICAS ABOVEDADAS. EL CASO DE LA FÁBRICA AYMERICH, AMAT I JOVER

Candelaria Varela Camperchioli
Tutora: Verónica M^a Llopis Pulido
Cotutor: Adolfo Alonso Durá

Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Trabajo Final de Grado | Septiembre 2020



LAS ESTRUCTURAS HISTÓRICAS ABOVEDADAS. EL CASO DE LA FÁBRICA AYMERICH, AMAT I JOVER

Palabras clave

Estructuras abovedadas, Bóvedas tabicadas, Fábrica de ladrillo, Método de equilibrio, Metodo de los elementos finitos

Resumen

La conservación del Patrimonio Arquitectónico es, en la actualidad, una actividad clave en el ejercicio de la profesión. La historia de los pueblos se nos presenta siempre a través de sus permanencias arquitectónicas y pictóricas, que conforman lo que denominamos el Patrimonio Cultural, y que nos muestran tanto la evolución de las técnicas y del conocimiento, como las inquietudes y motivaciones de nuestros antepasados.

En el campo de las estructuras, es imprescindible aportar al proyecto de restauración arquitectónica, los conocimientos específicos basados en la relación entre la evolución histórica del análisis estructural y las técnicas actuales relacionadas con el comportamiento estructural de las estructuras de fábrica, y más concretamente las estructuras abovedadas que conformaron una tipología redundante en gran parte del espacio arquitectónico, sobre todo el religioso, entre los siglos XVI y XVIII, así como comprobar la validez de los distintos métodos de cálculo utilizados en la Restauración Arquitectónica Monumental.

Paraules clau

Estructures voltades, Voltes tabicades, Rajola, Mètode d'equilibri, Mètode dels elements finits

Resum

La conservació del Patrimoni Arquitectònic és, en l'actualitat, una activitat clau en l'exercici de la professió. La història dels pobles se'ns presenta sepre a través de les seues permanències arquitectòniques i pictòriques, que conformen el que denominem el Patrimoni Cultural, i que ens mostren tant l'evolució de les tècniques i del coneixement, com les inquietuds i motivacions dels nostres avantpassats.

En el camp de les estructures, és imprescindible aportar al projecte de restauració arquitectònica, els coneixements específics basats en la relació entre l'evolució històrica de l'anàlisi estructural i les tècniques actuals relacionades amb el comportament estructural de les estructures de fàbrica, i més concretament les estructures voltades que van conformar una tipologia redundat en gran part de l'espai arquitectònic, sobretot el religiós, entre les segles XVI i XVIII, així com comprovar la validesa dels distints mètodes de càlcul utilitzats en la Restauració Arquitectònica Monumental.

Key words

Vaulted structure, Vault, Brick structure, Balance method, Finite element method.

Abstract

The conservation of the Architectural Heritage is currently an important aspect in the practice of the profession. The history of the people is always presented to us through their architectural and pictorial permanences, which makes up what we call the Cultural Heritage, and shows us the evolution of the techniques and knowledge, as well as the concerns and motivations of our ancestors. In addition, the structural analysis is a key element and contributes tremendously to the architectural restoration project.

A specific knowledge of this matter is crucial to the project development. All we know nowadays is based on the relationship between the historical evolution of structures and the current techniques related to the structural behaviour of brick structures, and more specifically the vaulted structures that formed a typology very present in much of the architectural space, especially the religious one, between the sixteenth and eighteenth centuries, as well as checking the validity of the different calculation methods used in the Monumental Architectural Restoration.

Índice

- 0. Objetivos y método de trabajo
 - 0.1 Objetivos
 - 0.2 Método de trabajo
- 1. Desarrollo histórico y constructivo de las bóvedas tabicadas
 - 1.1 Introducción
 - 1.2 Origen y precedentes
 - 1.3 Evolución histórica
 - 1.4 Materiales y procesos de ejecución
 - 1.5 La expresividad de las bóvedas
 - 1.5.1 Sala de telares de la Fábrica Batlló
 - 1.5.2 Sociedad General de Electricidad
 - 1.5.3 Escuelas provisionales de la Sagrada Familia
 - 1.5.4 Terminal Municipal de Ómnibus de Salto
 - 1.5.5 Panteón de Villarreal
- 2.0 Comportamiento estructural
 - 2.1 Primeros estudios del cálculo estructural
 - 2.2 Descripción de los métodos de cálculo
 - 2.2.1 Análisis gráfico. Método del equilibrio
 - 2.2.2 Análisis numérico
 - 2.2.2.1 Método de los elementos Finitos

3.0 Aplicación del cálculo estructural

3.1 Introducción

3.2 Fábrica Aymerich, Amat i Jover.

3.2.1 Características arquitectónicas y constructivas.

3.2.2 Levantamiento geométrico

3.2.2 Particularidades de la estructura

3.3 Análisis por el método de equilibrio.

3.4 Análisis por el Método de Elementos Finitos

3.4.1 Modelado

3.4.2 Evaluación de cargas

3.4.2.1 Acciones permanentes

3.4.2.2 Acciones variables

3.4.3 Cálculo lineal

3.4.4 Cálculo no lineal

4.0 Conclusiones

5.0 Investigaciones futuras

6.0 Fuentes y Bibliografía

o. Objetivos y método de trabajo

0.1. Objetivos

El presente trabajo de fin de grado tiene como objetivo principal analizar el comportamiento estructural que presenta una bóveda tabicada de un edificio histórico, poniendo en valor una joya de la arquitectura del modernismo catalán como es la antigua Fábrica Aymerich, Amat i Jover, actual Museu de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya, construida por Lluís Muncunill en Terrassa, Barcelona.

El estudio se ha realizado a partir de un Modelo de Elementos Finitos, así como por los métodos clásicos de equilibrio, culminando en una comparación entre ambos procedimientos. Se inicia con un repaso histórico de las bóvedas tabicadas, con la finalidad de comprender mejor su naturaleza y funcionamiento, así como una breve presentación de los distintos métodos existentes para llevar a cabo el análisis estructural.

0.2. Método de trabajo

La metodología del trabajo consiste en un análisis estructural que permitirá obtener información acerca del funcionamiento y la naturaleza de las bóvedas tabicadas.

En primer lugar, se ha desarrollado el marco teórico de las bóvedas tabicadas a lo largo de la historia, así como la evolución que ha experimentado a través de los distintos movimientos arquitectónicos. Posteriormente, se ha hecho una exploración entre los diferentes métodos de cálculo, para después aplicarlos al edificio objeto de estudio.

Los programas utilizados son los siguientes:

- ANGLE

Programa de Análisis estructural No-lineal por elementos finitos
Autor_ Adolfo Alonso Durá (Universidad Politécnica de Valencia)

- STATICAL

Programa de Estática gráfica en 2D, en interfaz Autocad.
Autor_ Adolfo Alonso Durá (UPV)

Completada la labor de investigación de los aspectos mencionados y de análisis del edificio ha derivado en unas conclusiones y unas posibles líneas de investigación futura.

1. Desarrollo histórico y constructivo

1.1. Introducción

Una bóveda es un elemento estructural de superficie curva que se utiliza como cubierta o forjado. Entre los distintos tipos, se encuentra la bóveda tabicada, que se caracteriza por estar construida con ladrillos pequeños y delgados colocados «de plano», es decir, unidos por sus cantos, unos a continuación de otros, formando una especie de tabique curvado. Las bóvedas tabicadas son sistemas que trabajan a compresión, siendo su resistencia a tracción muy baja.

Este tipo de bóveda tuvo un gran éxito durante mucho tiempo, ya que se trata de una estructura que se construye de forma muy rápida y con un bajo costo, debido a su delgadez (entre 5 a 10 centímetros), ligereza y sencillez, siendo a la vez, muy resistente frente a las cargas y al fuego.

Como veremos más adelante, se trata de un invento constructivo surgido muy probablemente en el Levante durante la baja Edad Media, siendo conocida por distintas variantes como bóveda catalana, bóveda extremeña, bóveda de Rosellón, volta in foglio, vouite plate, o bóveda sarracena. En todos los casos se utiliza la misma técnica, que consiste en ir uniendo unos ladrillos a otros sin cimbra, por medio del yeso, cuya característica principal es su fraguado rápido, permitiendo formar arcos autoportantes.

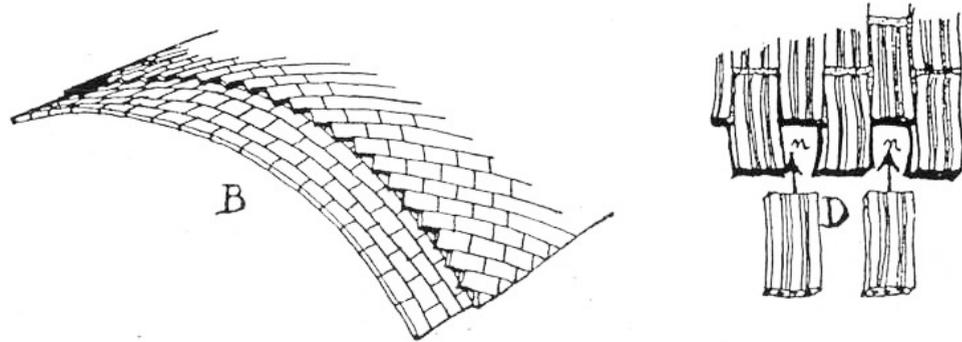


Fig 2 | *Bóvedas tabicadas*, Luis Moya
D: Encaje de rasillas
B: Aparejo para bóveda de rasilla

Respecto al comportamiento estructural de estos elementos, existen en la actualidad dudas y preguntas por responder, que siguen dos líneas de estudio. Por un lado, los métodos clásicos de equilibrio basados en la estática gráfica, como el Análisis Límite, desarrollado por Jacques Heyman. Por otro lado, los métodos numéricos, un enfoque Elástico-resistente, que busca una solución única para el equilibrio de la estructura de fábrica, el cual requiere ecuaciones complejas, datos del material y condiciones de apoyo. Éste último es el más utilizado en la actualidad ya que cuenta con la ayuda de programas informáticos capaces de resolver las ecuaciones.

1.2. Origen y precedentes

Históricamente, existe un debate abierto acerca del origen de este tipo de bóvedas. Mayoritariamente la opinión se decanta por una procedencia romana durante la época renacentista, pero en la actualidad y tras varias investigaciones, se abre la posibilidad de que se trate de una ascendencia árabe y su desarrollo en España durante el dominio musulmán, ya que encontramos ejemplos desde el siglo XIV en la zona de Valencia.

Para llegar a estas conclusiones se tienen en cuenta una serie de precedentes, todos desarrollados en la zona mediterránea en los cuales se utilizan algunos de los elementos que caracterizan la bóveda tabicada.[1]

- *Armaduras de ladrillo en las bóvedas romanas*

Debido a la escasez de madera en el territorio romano, utilizaban armaduras de ladrillo para realizar las armaduras. Esto no evitaba el uso de cimbras, si no que reducían su tamaño y aumentaban la rigidez del sistema de encofrado mientras fraguaba el hormigón.

- *Bóvedas bizantinas sin cimbra*

Este tipo de bóvedas se construían en su mayoría sin cimbras utilizando ladrillos más pequeños y colocados por hojas, siendo la superficie de contacto entre mortero y ladrillo más grande. Además, inclinan y curvan las hojas de ladrillo mejorando la adherencia y evitando así el deslizamiento. Formalmente no parecen tener relación con las bóvedas tabicadas, pero son el origen de las bóvedas autosostenidas.

- *Bóvedas de «tubos huecos»*

Este sistema se encontraba en el norte de África, en los que se utilizaban piezas cerámicas aglomeradas con yeso, siendo el verdadero elemento resistente, reduciéndose al mínimo los medios auxiliares. Las piezas no son ladrillos ni rasillas, pero la puesta en obra es idéntica a la de las bóvedas tabicadas.

[1] Esther Redondo Martínez. "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX: La transformación de un sistema constructivo."

- *La construcción islámica de yeso y ladrillo*

El yeso y el ladrillo fueron los materiales más empleados por la arquitectura islámica, llegando a España cuando tuvo lugar el califato de Damasco. El uso de estos materiales se mezcla con las bóvedas sin cimbra de origen bizantino, como por ejemplo en la torre de Romilla, en la vega de Granada (Almagro 1991) de época nazarí, hacia el siglo XIV.

A pesar de no estar claro el origen de las bóvedas tabicadas, se puede afirmar que en España alcanzan un mayor grado de desarrollo que en los demás países, debido principalmente al dominio árabe sobre la península ibérica. Los primeros ejemplos documentados de bóvedas tabicadas en España se datan entre los siglos XIV y XV, en la capilla de los Jofre, en el claustro del convento de Santo Domingo de Valencia. Esta técnica se extiende por el reino de Aragón, actualmente Valencia, Cataluña y Aragón.

Durante los siglos XVI al XVIII se extienden por toda la península, manteniéndose el lenguaje gótico e introduciéndose al Renacimiento. Se abandonan los arcos apuntados y se comienza a construir los de medio punto, para finalmente dominar los casquetes esféricos, algunos con decoración renacentista y otras todavía góticas.

1.3. Evolución histórica

Durante el siglo XVIII, la construcción de las bóvedas tabicadas se comenzó a extender por Francia, comenzando por la región del Rosellón [2], cuando el conde d'Espie escribe el libro *"Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles"* dando a conocer el sistema constructivo por todo el País.

A lo largo del siglo XIX, distintos tratados recogen innovaciones en el sistema constructivo, debido principalmente a la aparición del cemento. Comienza a utilizarse el cemento rápido para la primera capa y el lento para las siguientes, permitiendo el uso en exteriores de este tipo de bóvedas. Por otro lado, se extiende el uso del hierro, que en este caso se emplea en atirantamientos que permiten reducir el espesor de los muros de apoyo. Juan Torras se encargará de unificar la arquitectura del hierro impuesta en Europa con las bóvedas tabicadas, empleando las cerchas metálicas para la estructura principal y bóvedas de perfil cilíndrico para la estructura secundaria, construyendo naves industriales con este nuevo sistema. Más tarde, Sugrañes recogería el uso de bóvedas tabicadas atirantadas con hierro, así como los sistemas construidos sólo con ladrillos.

En el siglo XX, con el comienzo de la Revolución Industrial, predominan los edificios industriales y la vivienda masiva, generalmente en zonas urbanas. La importancia de las bóvedas de ladrillo se vio propulsada por la búsqueda de estructuras incombustibles, así como la necesidad de grandes espacios libres con un coste mínimo. Como se ha comentado, las bóvedas tabicadas se usaban como segundo orden de estructura. Sin embargo, Rafael Guastavino realizó una propuesta novedosa en una de las salas de la fábrica de Batlló, construida en 1868, donde la estructura completa se construye con un sistema tabicado. A partir de ahí, se produce una eclosión del uso de bóvedas tabicadas en la arquitectura industrial, utilizándose para solucionar la estructura completa, y apoyándose en pilares metálicos, permitiendo luces cada vez más grandes. Guastavino fue quien tras su traslado a los Estados Unidos, dio a conocer el sistema constructivo en América.

[2] El Condado del Rosellón fue uno de los condados catalanes en la Marca Hispánica durante los Edad Media, al sur de Francia. Su capital histórica es Perpiñán y desde 1659 forma parte de Francia.

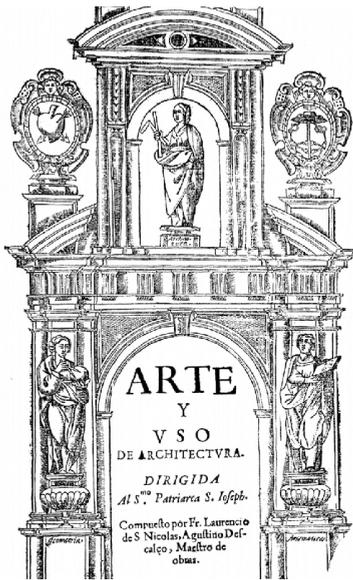


Fig 3 | Portada de 'Arte y Vso de la Architectvra'

[3] Fray Lorenzo de San Nicolás es el autor que más se extiende sobre los procesos de ejecución de las bóvedas. Nació en Madrid en 1593. Fue fraile agustino y arquitecto de su orden. Aprendió de su padre, también maestro de obra de los agustinos. El Tratado de 'Arte y Vso de la Architectvra' tiene una clara intención docente, pues recoge cuestiones teóricas de la arquitectura, así como prácticas, presupuestos, uso de materiales o responsabilidades de un maestro de obras.

1.4. Materiales y procesos de ejecución

Para la construcción de las bóvedas tabicadas se utilizan rasillas, un formato de ladrillo hueco, colocados en plano, formando una o varias hojas, los cuales deben ser ligeros para quedar sujetos sin necesidad de una cimbra continua. Se deben disponer cerrando arcos o anillos sucesivos, hasta completar la bóveda. Para conseguir la sujeción de los ladrillos se emplea aglomerante de fraguado rápido. El yeso, debido a su abundancia de materia prima en la península, fue el material más utilizado, y recibía al menos la primera capa, y en la mayoría de los casos, todas. Sin embargo, presenta un mal comportamiento a la humedad, por lo que se utilizaba sólo en interiores protegidos. Otro material utilizado fue el mortero de cal, y más tarde el cemento.

Las bóvedas tabicadas permiten su construcción con espesores muy pequeños, normalmente de dos hojas, pero existen de una. Podemos encontrar ejemplos muy esbeltos, que salvan grandes luces, como la bóveda sobre crucero de la Catedral de San Juan el Divino en Nueva York, siendo la más grande con 33 m de luz.

Existen tratados españoles escritos entre XVII y XVIII, como los de Fray Lorenzo de San Nicolás [3], donde se describen los distintos tipos de bóvedas y la forma en la que deben construirse. A pesar de que la característica principal de este tipo de construcción es sin la utilización de cimbras, prácticamente todos los ejemplos utilizan un medio auxiliar para el control de la forma, utilizando distintos elementos dependiendo del tipo de bóveda.

1.5. La expresividad de las bóvedas

La Edad Contemporánea trae consigo un nuevo uso de esta técnica constructiva. Si bien en la antigüedad se encuentran bóvedas tabicadas en iglesias, palacios o castillos, ahora aparecen en edificios públicos o de uso industrial, como fábricas o almacenes, incluso en viviendas. Este interés por recuperar la técnica se ve reflejado en la aparición de publicaciones que buscan reflexionar sobre este sistema constructivo, así como en la realización de edificios con geometrías arriesgadas y novedosas.

Este periodo se caracteriza por dejar sin recubrir la fábrica de las bóvedas, dando expresión y valor al material. Sin embargo, tras la aparición de nuevos materiales como el acero y el hormigón armado, las bóvedas tabicadas han ido perdiendo protagonismo paulatinamente.

A continuación, se exponen algunas de las grandes figuras y obras de la época, con geometrías que salían de lo convencional y resultaban muy atractivas. Se trata de algunos precedentes a la obra estudiada en este trabajo, las cuales sería interesante desarrollar en una futura investigación, con el fin de comparar la relación entre las distintas formas que puede presentar una bóveda y su resistencia frente a cargas gravitatorias o sismo.

1.5.1. Sala de telares de la Fábrica Batlló

Arquitecto: Rafael Guastavino
Barcelona, España 1868-1869

La fábrica Batlló fue construida por Rafael Guastavino en el año 1868, ocupando cuatro manzanas del Ensanche de Barcelona. La sala de telares, como se ha mencionado anteriormente, fue una propuesta novedosa, ya que se empleó un sistema de bóvedas tabicadas para formar la estructura completa de la sala. La retícula de pilares de fundición forman módulos de 3,7x5,2m, sobre los que apoyan arcos en dos direcciones y bóvedas tabicadas baídas. En la parte cenital se abre un lucernario que permite el paso de la luz. El gran tamaño de la sala, 79x100m supuso un gran hito, así como la rapidez de ejecución, la cual duró sólo 2 años.

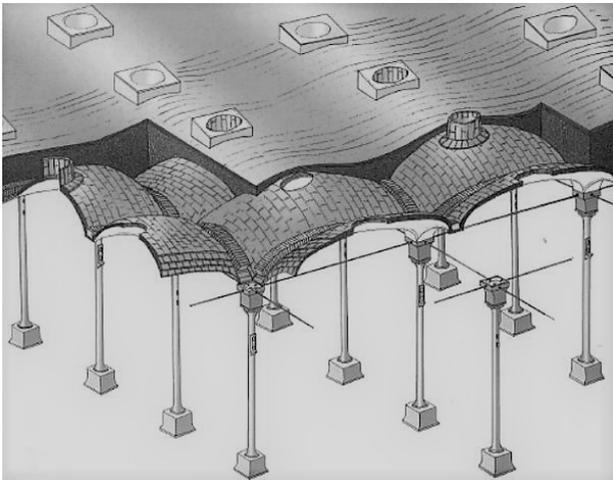


Fig 4 | Dibujo de la Sala de telares de la fábrica Batlló. Fuente: Ramón Muñoz.



Fig 5 | Sala de telares de la fábrica Batlló. Fuente: Galería temática del ministerio de industria, comercio y turismo

1.5.2. Sociedad General de Electricidad

Arquitecto: Lluís Muncunill
Terrassa, Barcelona, España 1910

La sociedad general de electricidad fue un edificio construido por Lluís Muncunill para albergar el primer sistema de distribución eléctrico de Terrassa. El arquitecto recurrió al ladrillo visto y a la bóveda catalana con un corte modernista y formas simples, dotando al edificio de personalidad mediante curvaturas muy pronunciadas. La cubierta está dividida en siete secciones en las que se ubicaron ventanales que siguen esa forma ondulada, haciendo énfasis en la sinuosidad del edificio.



Fig 6 | Sociedad General de Electricidad. Fuente: *Espais recobrats*



Fig 7 | Interior de la Sociedad General de Electricidad. Fuente: Jacques Lasseme

1.5.3. Escuelas provisionales de La Sagrada Familia

Arquitecto: Antonio Gaudí i Cornet
Barcelona, España 1909



Fuente: Blog Sagrada Família.

La conocida arquitectura de Gaudí se caracteriza por su carácter escultórico. Un ejemplo de ello es la construcción en 1909 de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Familia. Como el propio nombre indica, se trata de un edificio de carácter provisional en el que la cubierta ondulada se compone de dos conoides de plano director contrapuestos, cuya directriz común se sitúa en la jácena principal de la estructura. Originalmente, la cubierta era de viguetas de madera de 5 m apoyadas en una viga central, que a su vez descargaban en 3 soportes. El nervio central, que sobresalía y estaba a la vista desde el exterior, fue suprimido en la rehabilitación de 1940 realizada por el arquitecto Quintana tras un incendio que destruyó la cubierta.

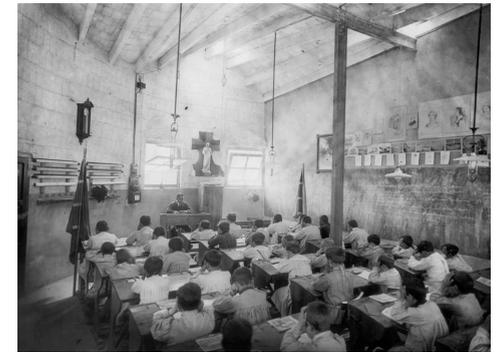


Fig 9 | Interior original de las Escuelas Provisionales. Fuente: Blog Sagrada Família.

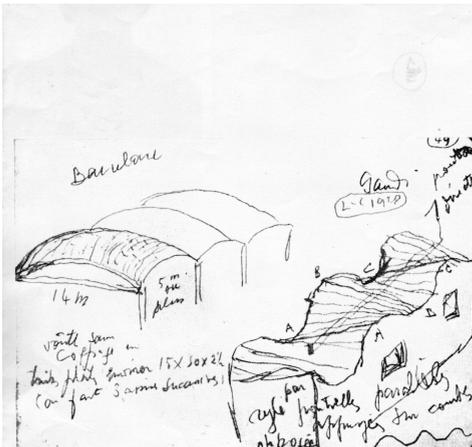


Fig 11 | Croquis de La cubierta realizada por Le Corbusier. *Jaume Prat*

En una de sus visitas a Barcelona, Le Corbusier quedó impactado con las líneas puras y funcionales que presentaba el edificio. Le Corbusier dibujó en su bloc de notas un croquis con la envolvente volumétrica del edificio, resaltando la viga que sobresale por la parte superior de la cubierta, dejando así claro que el nervio central de la cubierta estaba a la vista.

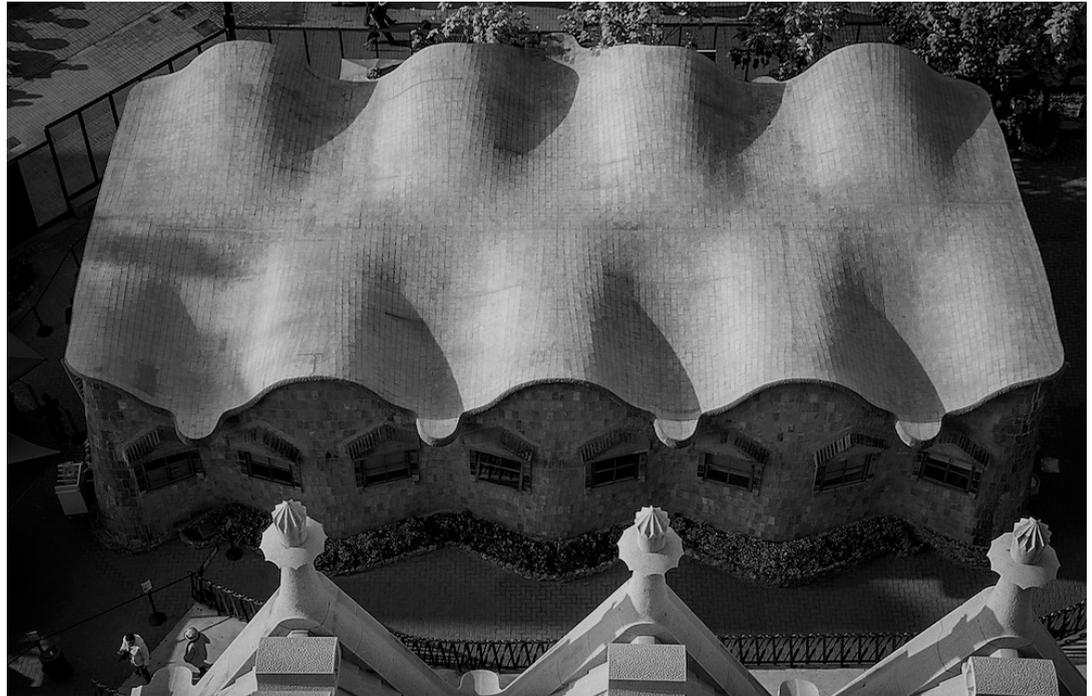


Fig 10 | Cubierta actual de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Familia. *Fuente: Blog Sagrada Familia.*

1.5.4 Terminal Municipal de Ómnibus de Salto

Arquitecto: Eladio Dieste
Salto, Uruguay 1973

La terminal de ómnibus de Eladio Dieste fue resuelta con una estructura compuesta por siete bóvedas autoportantes precomprimidas de 6m de luz en dirección transversal. Las bóvedas se apoyan sobre una línea de pilares de hormigón armado, volando 13,50 m a cada lado del soporte. Eladio Dieste lleva la liviandad de las bóvedas tabicadas al límite, introduciendo armadura de acero y un mínimo de hormigón, creando un nuevo material: la cerámica armada.



Fig 12 | Terminal de Ómnibus de Salto. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay



Fig 13 | Terminal de Ómnibus de Salto. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay

1.5.5 Panteón de Villarreal

Arquitectos: Fernando Vegas y Camila Mileto
Cálculo estructural: Adolfo Alonso Durá
Cementerio Municipal de Villarreal, Castellón (2015)



Fig 14 | Panteón funerario para la familia Soriano Manzanet. Fuente: Res-Arquitectura.

El panteón de Villarreal fue levantado para albergar los restos mortales de José Soriano, fundador de Porcelanosa. Se trata de una estructura abovedada, conformada por cuatro paraboloides hiperbólicos encadenados entre sí. El diseño fue realizado mediante programas informáticos, tras diversas variantes que buscaban un diseño óptimo tanto estético como estructural. Todas las curvas responden al perfil de la catenaria, optimizando el funcionamiento estructural debido a la rigidez de las mismas, lo que permite soportar incluso posibles terremotos. En sus arranques se colocaron heces de varillas de fibra de vidrio, capaces de absorber esfuerzos rasantes.



Fig 15 | Panteón funerario para la familia Soriano Manzanet. Fuente: *Res-Arquitectura*.

2. Comportamiento estructural

2.1 Primeros estudios del cálculo estructural

Históricamente, esta solución constructiva fue ejecutada y diseñada gracias a la acumulación de conocimientos empíricos, transmitidos de generación en generación, sin ningún tipo de análisis estructural. Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica, por lo que tienen poca resistencia a tracción, se agrietan y empujan. No son estructuras monolíticas ni cohesivas, y deben calcularse como cualquier otra bóveda de fábrica. A lo largo de la historia, se desarrollaron múltiples tratados relacionados con reglas y maneras de ejecutar este tipo de sistemas constructivos, algunos de los cuales se recogen a continuación.

Fray Lorenzo de San Nicolás, además de describir la manera de construir este tipo de bóvedas, introduce en su tratado el funcionamiento mecánico. En él indica "la necesidad de macizar el trasdós de los arranques hasta el primer tercio de la altura de la bóveda y de disponer muros o tabiques de estribo, que llama "lengüetas", hasta alcanzar el segundo tercio [...] permiten que la bóveda resista sobrecargas asimétricas o cargas móviles" [4]. Además, menciona el cálculo de estribos, estableciendo una serie de reglas para su uso.

El Conde D'Espie, en el libro nombrado anteriormente "Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles" describe la forma de empuje que tienen las bóvedas de fábrica, comparándolas con las bóvedas convencionales. Espie concluye que las primeras no empujan contra los muros, y lo atribuye al carácter monolítico de la bóveda una vez es finalizada. Su libro fue traducido al castellano en 1776 por Joaquín Sotomayor, precedido de una censura de D. Ventura Rodríguez en la que cita varios casos de agrietamientos y desplomes en edificios construidos con bóvedas, demostrando el empuje de estas, lo que desmontaría la teoría monolítica del Conde d'Espie.

Rafael Guastavino Moreno fue el primero en intentar explicar de forma científica el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas. En 1892 publicó "Essay on the Theory and History of Cohesive Construction, Applied Especially to the Timbrel Arch"

[4] Santiago Huerta, 2004

en el que recoge sus ideas sobre el funcionamiento de este tipo de bóvedas. Guastavino diferencia entre dos grupos de construcciones según su comportamiento mecánico: la "construcción mecánica" y la "construcción cohesiva", e incluye las bóvedas tabicadas en estas últimas. Guastavino realizó distintos ensayos sobre probetas en los que obtuvo valores de tensiones de rotura a compresión, tracción, cortadura, cortante y flexión, con el fin de verificar la seguridad de sus bóvedas. Más tarde, ejecutó los mismos ensayos sobre bóvedas tabicadas con una flecha $1/10$ de la luz. Su cálculo es un cálculo de equilibrio, en el cual, mediante expresiones sencillas, obtiene un valor de empuje con el que calcula un sistema capaz de contrarrestar dicho valor, utilizando estribos o algún sistema de tirantes de hierro forjado. Este método, entra en contradicción con su propia teoría cohesiva.

Su hijo, Rafael Guastavino Expósito, realizó un método por el cual pretendía estimar las tensiones de tracción para poder calcular y disponer los refuerzos de hierro. El hecho de estimar las tracciones implicaba que el empuje se mantendría constante en una cúpula de fábrica sin refuerzos, siendo un método completamente original para el cálculo de cúpulas.

Más tarde, Domenech comenzó a cuestionar el análisis elástico que se utilizaba en la época. Para él, el éxito de las bóvedas tabicadas venía dado por su capacidad de resistir flexiones de tal forma que anularan el empuje horizontal.

Por otro lado, Jaime Bayó defiende que las bóvedas empujan, siendo este empuje del arco biarticulado elástico correspondiente, por lo que sería necesario hallar la línea de empujes que estuvieran en equilibrio con las cargas, y que a su vez cumplieran las condiciones de compatibilidad elástica de deformación.

Tras tantos fracasos y contradicciones para poder realizar el cálculo estructural, las bóvedas tabicadas se convirtieron en imposibles de calcular, sin embargo, se seguían construyendo mediante cálculos sencillos que determinaban las dimensiones de los elementos principales.

2.2 Descripción de los métodos de cálculo

Las bóvedas tabicadas deben calcularse, como se ha mencionado anteriormente, de la misma forma que una estructura de fábrica. Una característica importante del comportamiento mecánico de la mampostería es su alta resistencia a compresión comparada con la de tensión, lo que produce una asimetría en su comportamiento al no ser lineal, impidiendo así el uso de técnicas de cálculo modernas.

Otro factor que complica el cálculo estructural de las bóvedas es la gran heterogeneidad y el carácter compuesto del material presente en estas construcciones, lo que dificulta asignar propiedades mecánicas globales al modelo. Del mismo modo, hay que tener especial cuidado con las juntas, ya que presentan planos de debilidad.

En los últimos años se han desarrollado una gran cantidad de modelos de análisis para construcciones históricas de mampostería, utilizando diversos modelos estructurales. La elección de los modelos dependerá del grado de precisión buscado en el análisis para cada caso en particular.

2.2.1 Análisis gráfico. Método del equilibrio.

La teoría del Análisis Límite de las estructuras de Fábricas fue desarrollada por el profesor Heyman, cuyo enfoque se basa en el equilibrio. El trabajo del calculista consiste en estudiar únicamente los posibles estados de equilibrio de la estructura, la cual trabaja a compresión. "Una construcción segura es una construcción en equilibrio" [5], afirmación que consolida las disposiciones geométricas de los arquitectos de la antigüedad, y se aplican en la teoría moderna.

Como se ha mencionado anteriormente, se considera la fábrica como un material compuesto, heterogéneo, resistente a compresión, muy débil a tracción y sin peligro de deslizamientos entre las piedras, siendo éstos los principios en los que se basa el Análisis Límite.

Para comprender el funcionamiento estructural de una bóveda, se debe partir por conocer cómo trabaja el arco, puesto que se trata del elemento básico de la arquitectura de fábrica para salvar luces con un material que no resiste a tracción. En cada junta existe una distribución de tensiones, siendo su fuerza resultante una fuerza de compresión cuyo punto de aplicación es el centro de empuje, contenido dentro del plano de la junta. Los empujes de ambos lados de la junta mantienen las piezas en equilibrio, pues se trata de dos fuerzas con la misma magnitud, pero opuestas.

La línea que forma el lugar geométrico de los centros de empuje se denomina línea de empuje. Este término fue formulado por Moseley en 1835. Se trata de una línea imaginaria contenida dentro del arco, cuya forma dependerá de la geometría de este, de sus cargas y de la familia de juntas planas consideradas. Cuando todas las piezas del arco tienen el mismo tamaño, la línea de empujes se aproxima mucho a una catenaria invertida, afirmación que realiza Hooke hacia el año 1670.

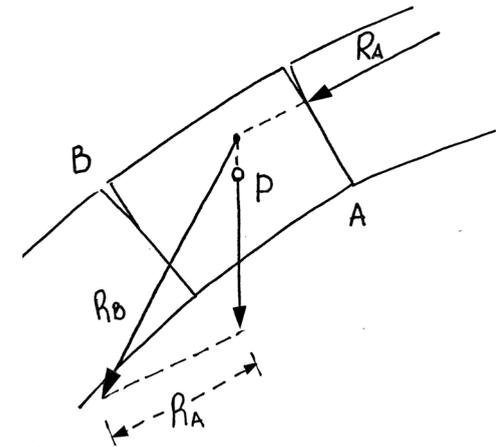


Fig 16 | Equilibrio elemental de la dovela.
Fuente: *Elaboración propia.*

[5] S. Huerta, 2004

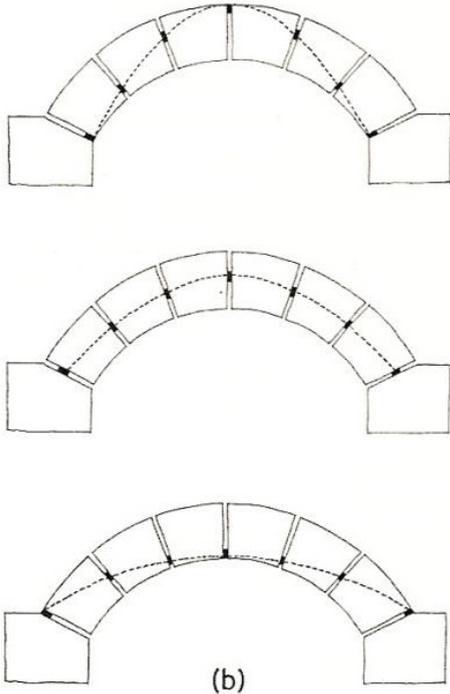


Fig 17 | Línea de empujes.

Fuente: *Evaluación de estructuras abovedadas.*
Adolfo Alonso Durá.

[6] S. Huerta, 2004

La línea de empuje no es una solución única, si no una posible solución de equilibrio, ya que, teniendo el arco un espesor suficiente, se puede encontrar un número infinito de catenarias invertidas. No obstante, lo que se sabe con seguridad es que cualquiera que sea la línea de empujes, deberá estar contenida en el grosor del arco, por lo que se pueden establecer unos límites máximos y mínimos para el valor real del empuje [6].

Con el fin de obtener una solución única, Poncelet propuso en 1852 la aplicación de la teoría elástica a los arcos de fábrica, pero sería Winkler quien lo trataría en profundidad en 1897, añadiendo comentarios sobre las "perturbaciones", las cuales podrían afectar la posición de la línea de empujes. Se trata de situaciones como la deformación de la cimbra, el cedimiento de estribos, un fraguado incompleto del mortero de las juntas, y el efecto de las variaciones de temperatura. Estas perturbaciones podrían afectar notablemente la posición de la línea de empujes y ocasionarían agrietamientos y deformaciones. Winkler propuso calcular el arco para "su estado normal", en el que no ocurriría ninguna de las situaciones anteriormente nombradas.

El cálculo elástico (Heyman, 1999) se lleva a cabo en tres pasos. En primer lugar, se escriben las ecuaciones de equilibrio. Después, se escriben las ecuaciones elásticas, las cuales relacionan los esfuerzos internos con las deformaciones que afectan a la estructura. Por último, se hacen consideraciones sobre la compatibilidad de las deformaciones, como el modo en el que los elementos están conectados o las condiciones de contorno. El sistema de ecuaciones resultante puede resolverse obteniéndose una solución elástica única. Se calculan las tensiones y se comparan con valores admisibles, los cuales se obtienen dividiendo los valores de la tensión de rotura a compresión simple del material, cuyo valor se consigue con ensayos de laboratorio.

Este método resulta muy sensible a pequeñas variaciones en las condiciones de equilibrio, aspecto que Heyman tuvo muy presente en sus tratados. La condición de "estado normal" se ve afectada entre otras cosas porque los estribos reales no son rígidos, y pueden ceder. Cuando esto sucede, la luz del arco se incrementa, produciendo grietas

en el intradós y en el trasdós de los apoyos. Las grietas en sí no son peligrosas, por lo que la estabilidad de la estructura depende de su capacidad de adaptarse a las agresiones del entorno, es decir, a su capacidad de agrietamiento. Cuando la grieta alcanza el borde del arco, se crea una articulación. Tres articulaciones hacen del arco una estructura estable, y es posible trazar una única línea de empuje. Sin embargo, cuando se forman más articulaciones, transforman el arco en un mecanismo provocando el colapso sin que se produjera una rotura del material.

El enfoque del equilibrio permite analizar las bóvedas empleando la teoría de los arcos, si se imagina una bóveda dividida en una serie de arcos y se busca una línea de empujes dentro de cada uno de ellos. La tarea del calculista es la de elegir una familia de planos de corte adecuada, lo cual dependerá de la forma de la bóveda en cada caso en particular.

Por otro lado, cabe tener en cuenta el comportamiento de los estribos. A lo largo de los años, el estudio de la seguridad de las bóvedas de fábrica se ha basado en el comportamiento de los arcos, dejando a los estribos en segundo plano [7]. Sin embargo, la seguridad depende fundamentalmente de la estabilidad de los mismos. Para su cálculo, basta con conocer el empuje de la bóveda, cuyo momento desestabilizante debe ser contrarrestado por el peso del estribo. Como se ha mencionado anteriormente, si el empuje se aproxima al borde exterior de la fábrica, se formaría una rótula, pudiéndose producir un colapso por vuelco del estribo. Para evitarlo, se deben emplear factores geométricos de seguridad, con el fin de mantener la trayectoria de la línea de empujes dentro de unos límites.

[7] S. Huerta, 2003

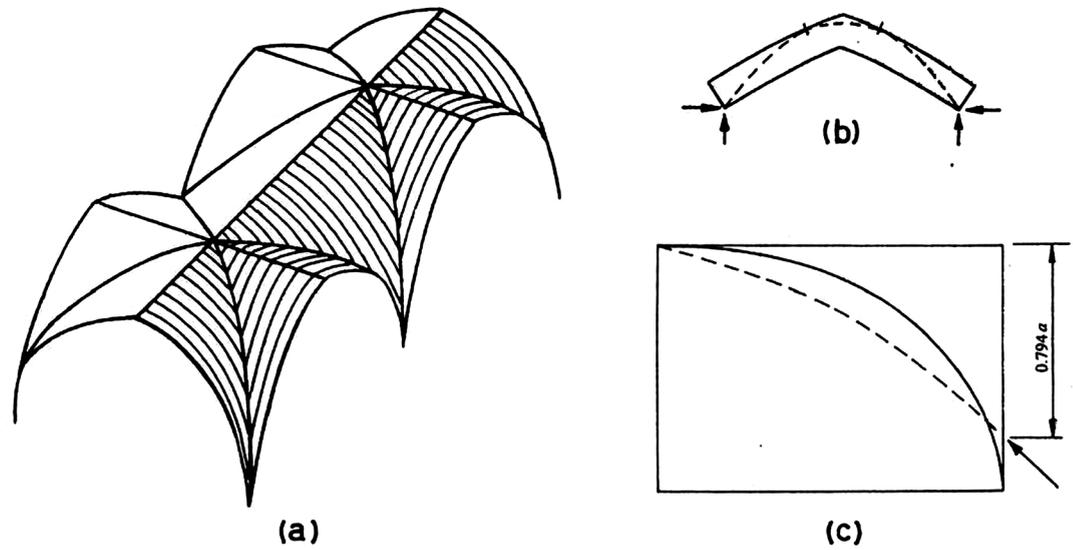


Fig 18 | Análisis límite de una bóveda gótica por el método de los cortes. Fuente: Heyman, 1995.

2.2.2 Análisis numérico.

El análisis numérico de una estructura consiste en establecer ciertas hipótesis mecánicas y físicas sobre el comportamiento de las mismas. Este análisis diferencia entre cálculo lineal o no lineal, dependiendo de si en las ecuaciones de las hipótesis establecidas en el modelo matemático existe una proporción directa o no.

El cálculo lineal suele ser el método de análisis escogido para dimensionar el comportamiento de una estructura en la fase de diseño, puesto que los factores de seguridad y las restricciones de los estados límites de servicio suelen ser más estrictas que las exigencias de seguridad de los estados límite último. En este cálculo, las fuerzas son directamente proporcionales a los desplazamientos, es decir, existe una relación lineal entre estas dos variables.

El cálculo no lineal se utiliza cuando tienen lugar grandes desplazamientos y pequeñas deformaciones, así como para la reparación y rehabilitación de estructuras, ya que en estos casos ya se ha superado algún estado límite, e interesa que la estructura no empeore. El análisis no lineal consiste en resolver de forma iterativa un sistema de ecuaciones no lineales, cuya solución obtenida dependerá de la aproximación inicial utilizada.

El análisis elástico lineal no es capaz de reproducir el comportamiento real de las estructuras de fábrica, puesto que no considera la baja resistencia a tracción del material. Éste nos permite obtener una evaluación rápida, y se recomienda emplearlo como método complementario. Por ello, se han desarrollado diversos métodos de análisis dentro del comportamiento no lineal, los cuales introducen las ecuaciones constitutivas del material. Se divide en dos grupos, el método de los elementos rígidos (MER) y el Método de los Elementos Finitos (MEF). En este trabajo se utilizará el segundo.

2.2.2.1 Método de los Elementos Finitos

El método de elementos finitos (MEF) es un método numérico de resolución y diagnóstico de problemas de análisis estructural, dentro de la Mecánica de Sólidos. Se trata de una herramienta de cálculo que permite la obtención los desplazamientos, deformaciones y tensiones, con un nivel de precisión muy alto (si es utilizado adecuadamente). Se aplican los criterios de resistencia, rigidez o fatiga, pudiendo así representar diferentes escenarios, con el fin de evaluar el rendimiento del producto.

Para aplicar el método a un sólido sometido a cargas, es necesario subdividir en pequeñas partes a las que se les denomina elementos. Éstos estarán interconectados entre sí por puntos llamados nodos, siendo la suma de ambos lo que se conoce como malla. A continuación, se determina la matriz de rigidez de cada elemento, para después ensamblarlos, obteniendo así los desplazamientos en los nudos de cada unión. A partir de los desplazamientos se determina, de forma aproximada, las tensiones y deformaciones del interior de cada elemento [Fig 19]. La precisión de los resultados dependerá de la subdivisión inicial. Cuanto mayor sea el número de elementos, y menor sea su tamaño, el resultado se aproximará más a la realidad.

El MEF se utiliza en los softwares modernos para el cálculo estructural, siendo necesario conocer bien los parámetros de los materiales utilizados. Se trata de un método que requiere una gran cantidad de recursos, consumiendo mucho tiempo de pre- y post- procesamiento.

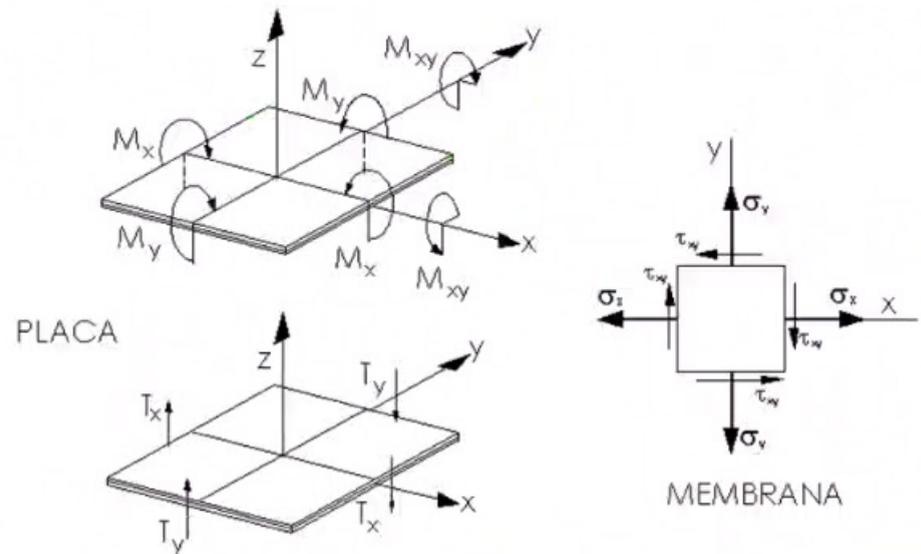


Fig 19 | Sentidos positivos de las solicitaciones de las láminas. Fuente: Adolfo Alonso Durá

3. La fàbrica Aymerich, Amat i Jover. Anàlisi estructural

3.1 Introducció.

En este capítulo se aplican los métodos descritos anteriormente a la fábrica Aymerich, Amat i Jover, actual Museu de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya.

La elección del edificio viene motivada por un interés personal, ya que tras una visita quedé impresionada con la magnitud de la cubierta, la sinuosidad de sus curvas y la aparente ligereza que presenta desde el interior. Posteriormente a esta visita quise profundizar en el proyecto, y observé que la documentación relativa al edificio era escasa siendo prácticamente nula la concerniente a su comportamiento estructural, lo que despertó en mí un gran interés. Con este estudio se pretende poner en valor una joya del modernismo catalán.

3.2 Fábrica Aymerich, Amat i Jover.

La fábrica Aymerich, Amat i Jover, fue proyectada originalmente por el arquitecto Lluís Muncunill i Parellada para albergar una fábrica textil, siendo hoy en día la sede del Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña.

Las obras comenzaron en 1907, pero no fue hasta 1908 que se inauguró la fábrica, dentro de un contexto arquitectónico donde el modernismo catalán estaba en un momento de plenitud. En 1912 muere uno de los socios, Francesc Jover, y su viuda se separa de la sociedad, pero no de la propiedad del edificio. En 1920 la fábrica se traslada debido a problemas de abastecimiento de agua y se especializa en tejidos. En 1962 Terrassa sufrió unas importantes riadas que afectaron al edificio, provocando una pérdida de interés en su compra y uso, siendo finalmente en 1976 cuando se cierra definitivamente. En 1983 La Generalitat adquiere el edificio y propone la creación de un Museo en las instalaciones de la fábrica.



Fig 20 | Fábrica Aymerich, Amat i Jover a principios del siglo XX. Fuente: Memòria Digital de Catalunya.



Fig 21 | Fábrica Aymerich, Amat i Jover a principios del siglo XX. Fuente: José Luis Montoya.

3.2.1 Características arquitectónicas y constructivas.

La nave central tiene una superficie de 11.000 m², cubierta por 160 bóvedas campaniformes tabicadas, apoyadas en muretes de ladrillo formados por arcos de directriz parabólica rebajada.

Las bóvedas están formadas por dos hojas de tres capas cada una, separadas 10-12 cm por una cámara de aire. Cada 50 cm hay un ladrillo de canto. Se encuentran apoyadas en una retícula de 300 columnas de hierro forjado con una sección de 18 cm que cumplen a su vez la función de bajantes. La separación entre ellos es de 8,2m en dirección transversal y de 4,1m en dirección longitudinal, alcanzando los 5m de altura. La disposición de las bóvedas en forma de diente de sierra permite el paso de luz natural a través de unos grandes lucernarios con una inclinación de 70°. Los pilares disponen de unas pequeñas vigas, y las bóvedas están atirantadas con tirantes de 30 mm de diámetro.

Las fachadas son de piedra, con un grosor de 70 cm y un acabado exterior enfoscado de mortero. En la parte central de la nave hay un patio de 16x16m que unen la planta baja con el sótano. La cimentación original es de piedra natural.

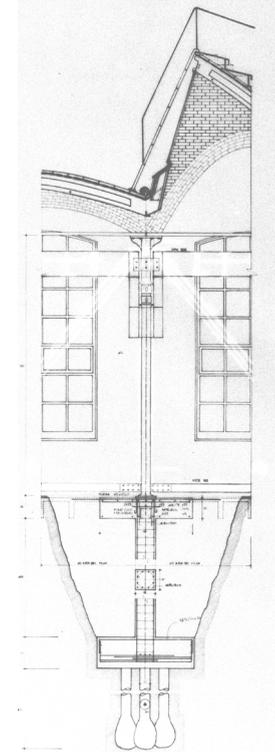


Fig 22 | Sección longitudinal de la Nave.
Fuente: Extracto del proyecto de ejecución de las obras de adecuación de la Fábrica Aymerich, Amat y Jover, como sede del Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña. Estudio profesional Margarit i Buxadé.

3.2.2 Levantamiento geométrico

Los arquitectos Buxadé y Margarit fueron los encargados de realizar la restauración de la fábrica entre 1986 y 1996. Intervinieron eliminando las pinturas, otorgando así protagonismo al ladrillo de las bóvedas mediante un acabado de barniz con resina. Además, se restauraron las bóvedas de la cubierta aplicando una impermeabilización y un acabado igual que el original.

Para el levantamiento geométrico, me puse en contacto con el estudio 2BMFG ARQUITECTES, quienes me proporcionaron imágenes de su intervención y documentación gráfica de los planos originales, a partir de los cuales he elaborado los planos y secciones que se presentan a continuación. Dicho levantamiento ha servido de base para elaborar el modelo de cálculo.

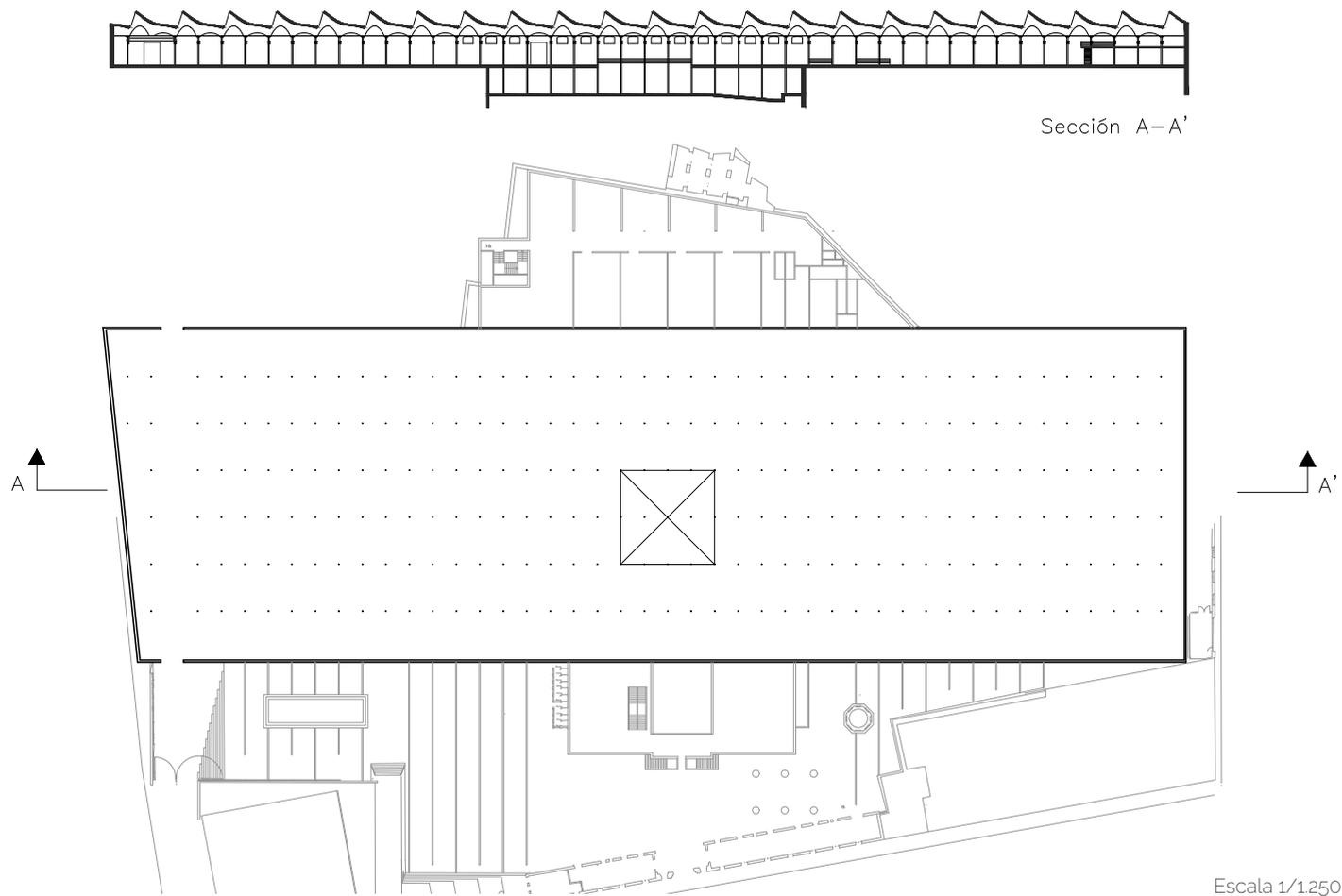
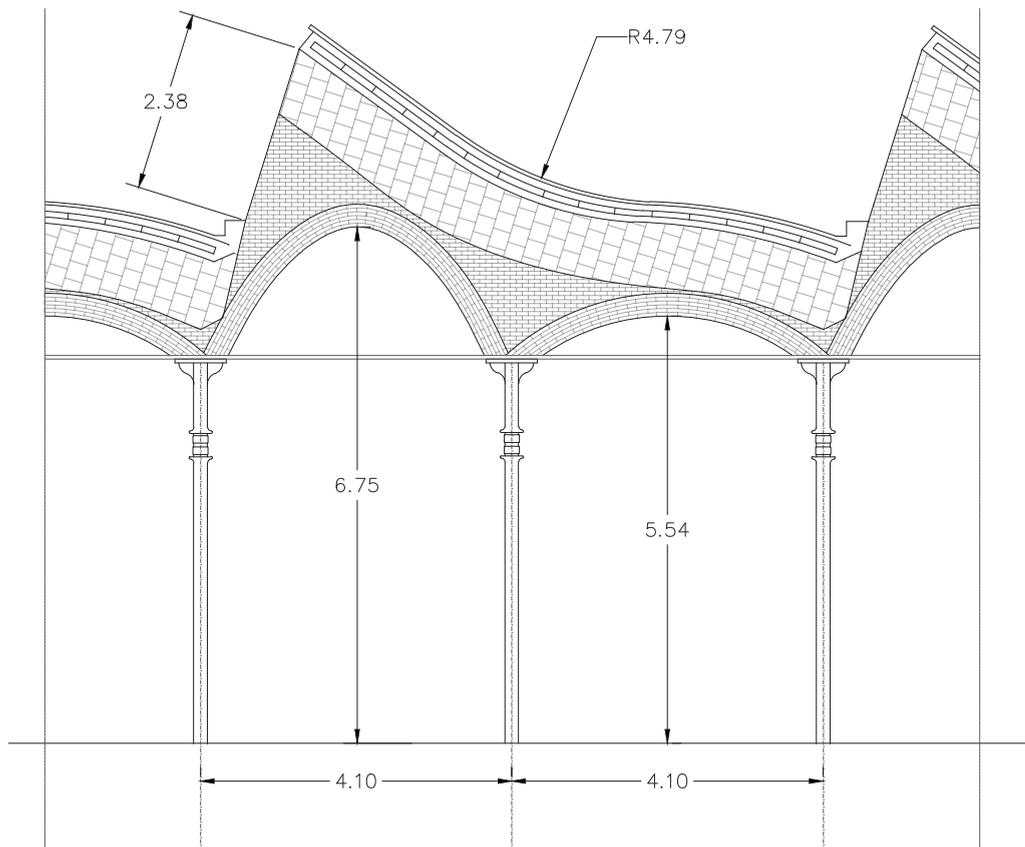
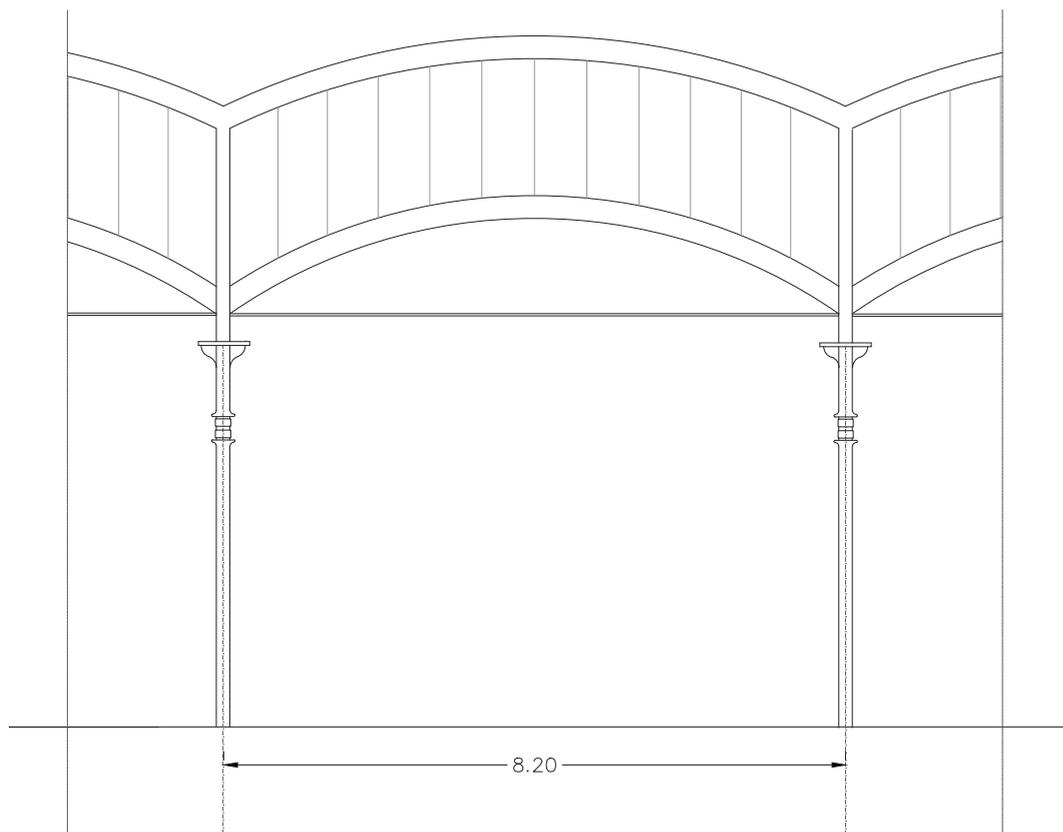


Fig 23 | Planta y sección longitudinal de la fábrica. Fuente: *Elaboración propia.*



Escala 1/100

Fig 24 | Detalle en sección longitudinal. Fuente: *Elaboración propia.*



Escala 1/100

Fig 25 | Detalle en sección transversal. Fuente: *Elaboración propia a partir de la documentación proporcionada por el estudio 2BMFG ARQUITECTES, encargados de realizar la restauración de la fábrica entre 1986 y 1996.*

3.2.2 Particularidades de la estructura

Entre los pórticos 1 y 2 [Fig 28] se produce una interrupción de la retícula de pilares, debido a la necesidad de disponer de una entrada y una salida lo suficientemente grande como para permitir el paso de maquinaria y mercancía. Para ello, el pilar se sustituyó por una viga de perfil IPN 500 dispuesta de canto [Fig 28]. La misma técnica fue utilizada por el estudio 2BMFG ARQUITECTES cuando realizaron la reforma de la fábrica, con la finalidad de introducir unos tubos PVC dentro de los pilares debido a la existencia de obstrucciones ya que actúan como bajantes. [Fig 26]



Fig 26 | Proceso de ejecución de la introducción de tubos de PVC en los soportes huecos.
Fuente: Estudio 2BMFG ARQUITECTES.

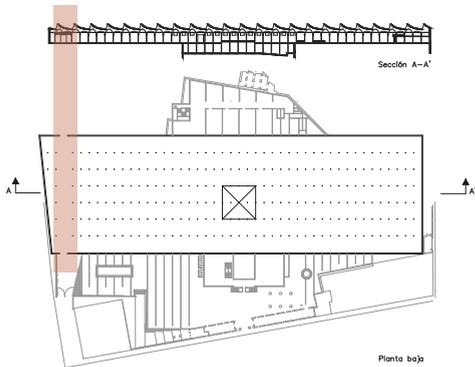


Fig 28 | Planta y sección longitudinal de la fábrica. indicando el pórtico donde se encuentra la viga. Fuente: *Elaboración propia.*

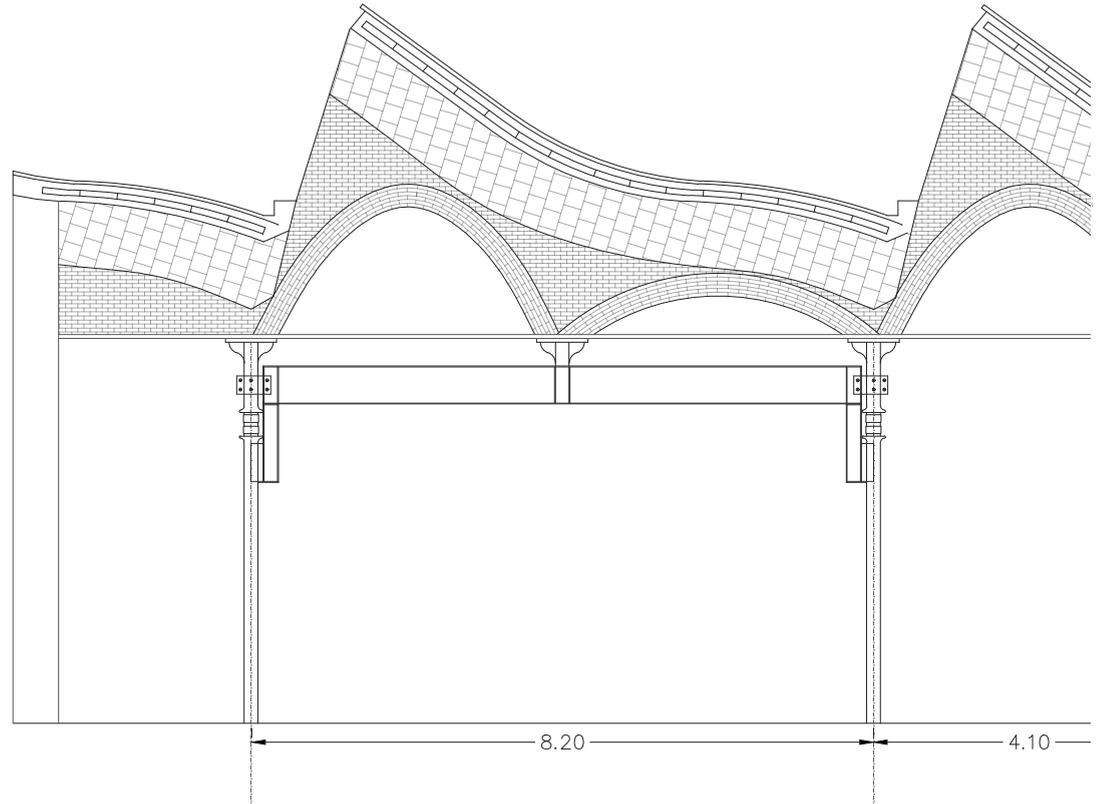


Fig 27 | Detalle en sección longitudinal de la viga. Fuente: *Elaboración propia a partir de la documentación proporcionada por el estudio 2BMFG ARQUITECTES, encargados de realizar la restauración de la fábrica entre 1980*

Escala 1/100



Fig 29 | Fàbrica Aymerich, Amat i Jover a principis del siglo XX. Fuente: Josep Maria Torra.

3.3. Análisis por el Método de equilibrio

Para el cálculo mediante el método de equilibrio se utilizará la aplicación de autoCAD STATICAL. Para ello, se necesita conocer la densidad del material, en este caso fábrica de ladrillo, el cual se ocupa para todo el conjunto de bóveda y arcos. El valor que se toma es de $1,8 \text{ T/m}^3$ [8].

En primer lugar, se obtiene el peso que ejerce la bóveda sobre el muro, la cual se encuentra en dirección perpendicular a éste [Fig 30]. Para ello, se divide la bóveda en 4 partes, tal y como se indica en la imagen [Fig 31], con el fin de distribuir el peso en los soportes correspondientes.

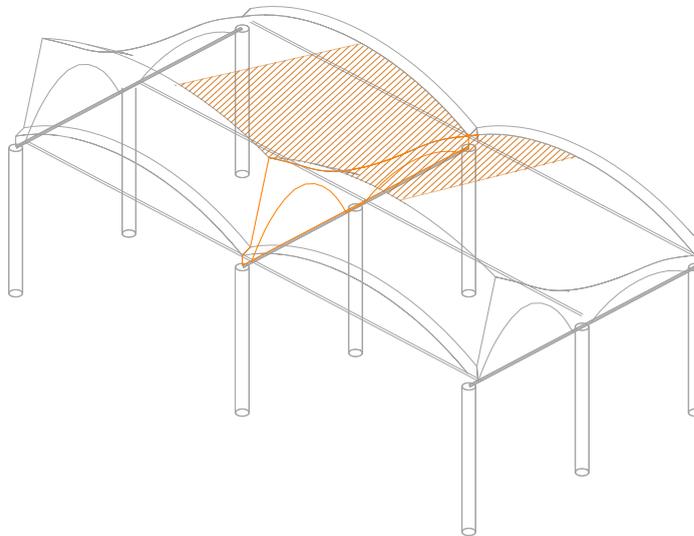


Fig 30 | Axonometría indicando el área de bóveda que recae sobre los arcos. Fuente: elaboración propia

[8] Información obtenida de la ficha técnica de la empresa Cerámica Zaratán

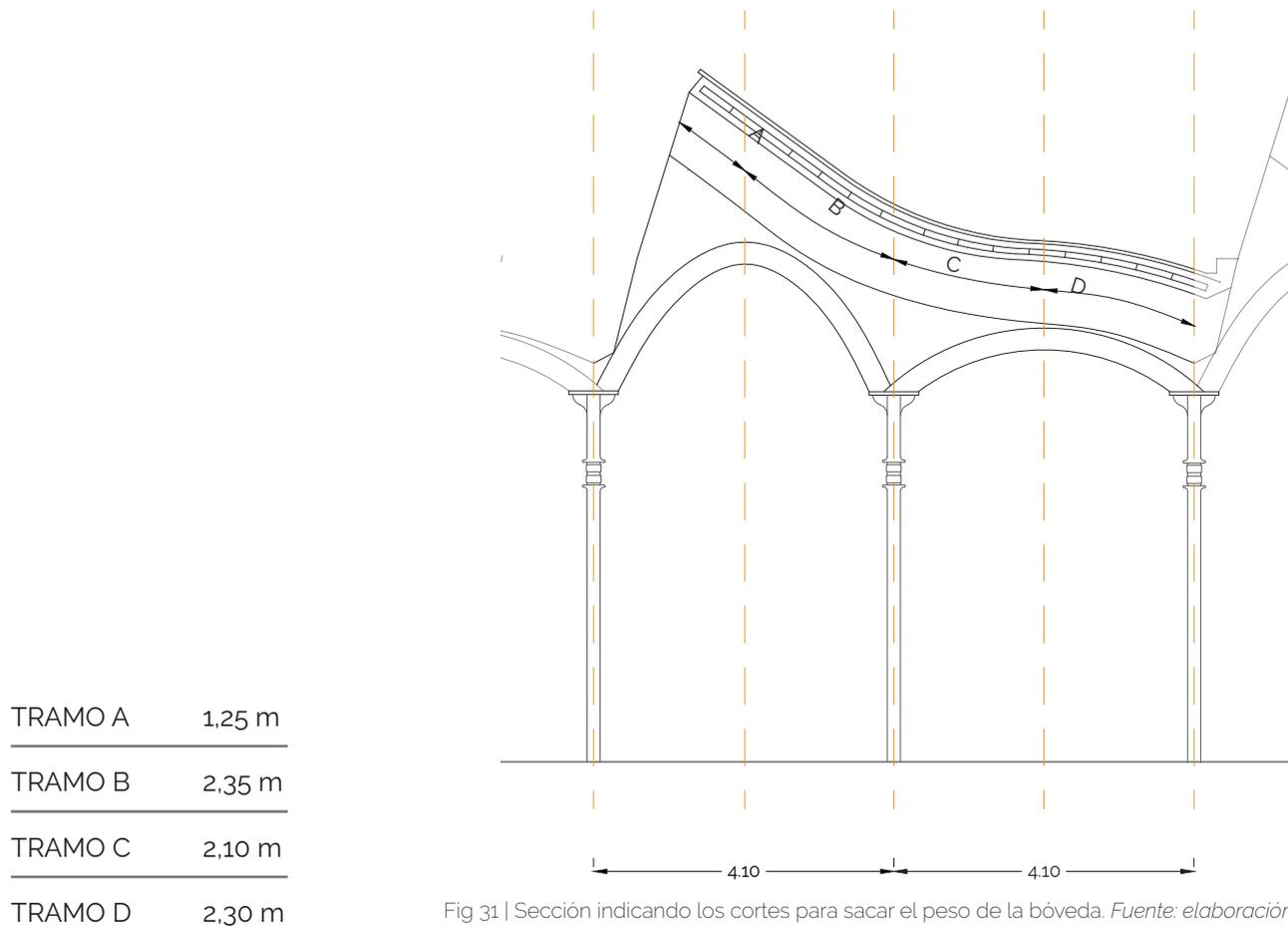


Fig 31 | Sección indicando los cortes para sacar el peso de la bóveda. Fuente: elaboración propia

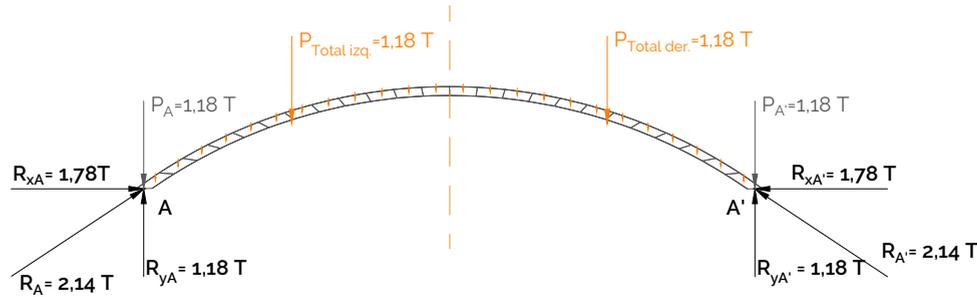
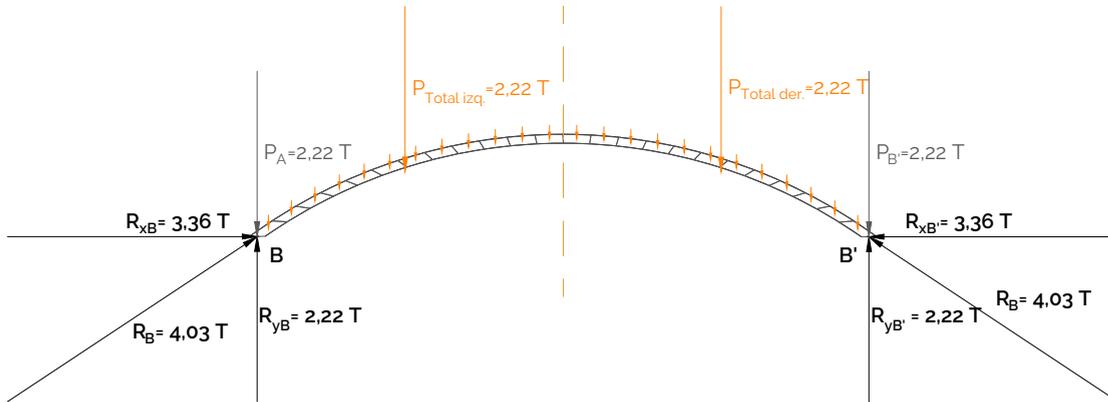


Fig 32 | Esfuerzos en tramo A de la bóveda. Fuente: elaboración propia



- Peso total de la mitad de la bóveda
- Peso que ejerce el tramo de la mitad de bóveda sobre el muro
- Reacción en el apoyo

Fig 33 | Esfuerzos en tramo B de la bóveda. Fuente: elaboración propia

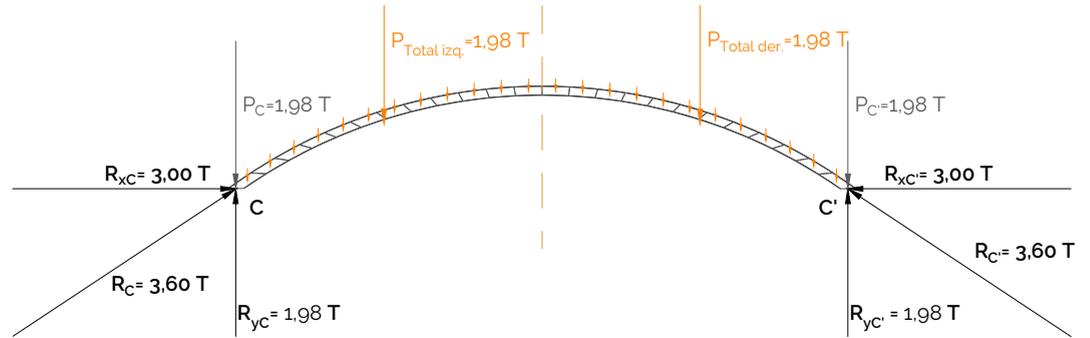
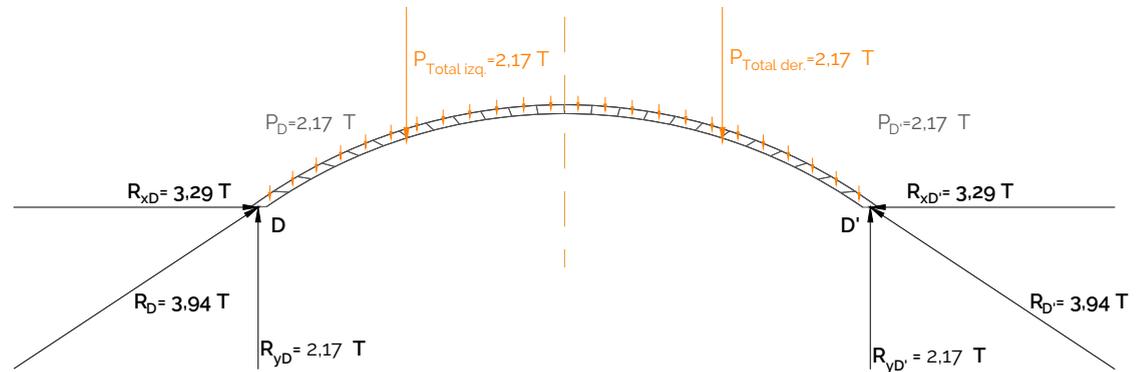


Fig 34 | Esfuerzos en tramo C de la bóveda. Fuente: elaboración propia



- Peso total de la mitad de la bóveda █
- Peso que ejerce el tramo de la mitad de bóveda sobre el muro █
- Reacción en el apoyo █

Fig 35 | Esfuerzos en tramo D de la bóveda. Fuente: elaboración propia

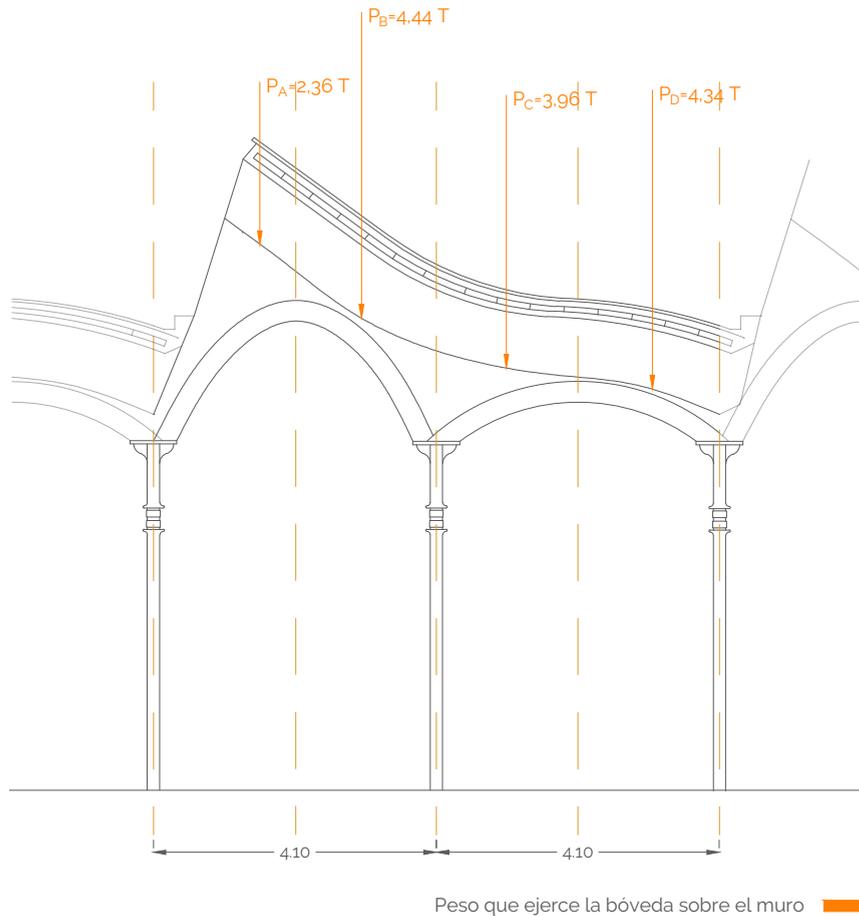
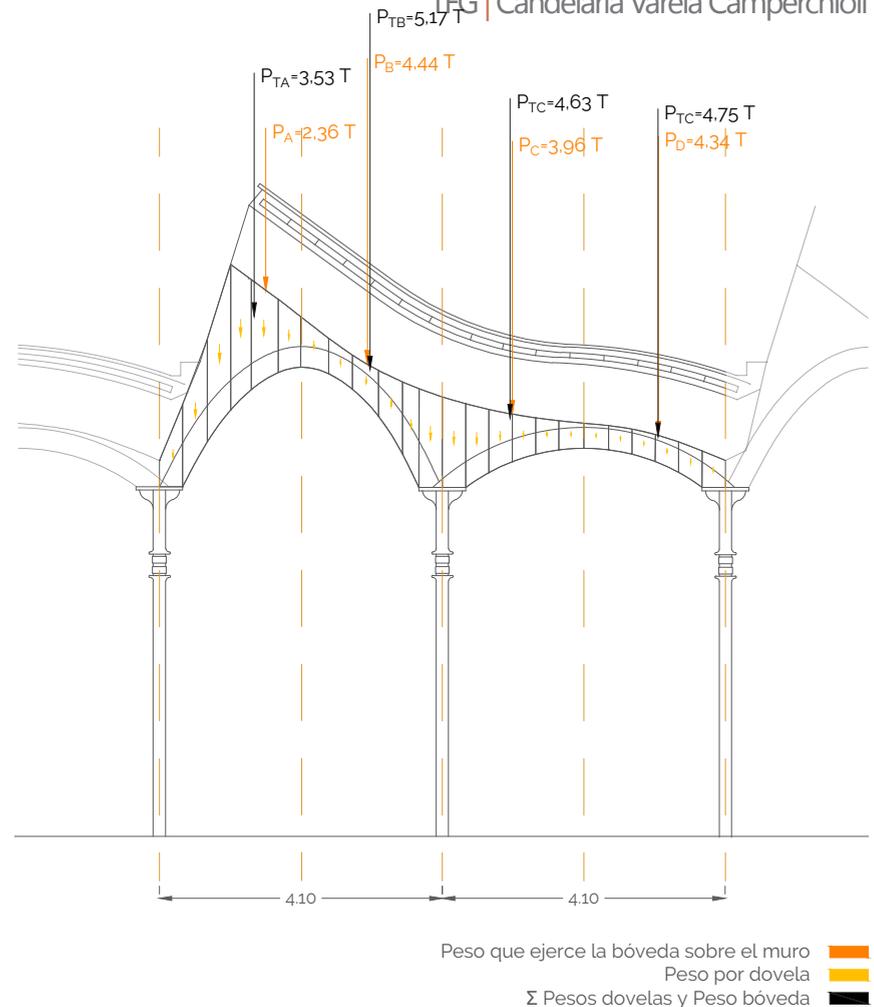


Fig 36 | Peso de la bóveda sobre el muro. Fuente: elaboración propia

Cada tramo de bóveda se representa con un arco dividido en dovelas, en este caso 24, cuya profundidad corresponde a la distancia de dichos tramos (A, B, C y D).

Con estos datos, el programa es capaz de generar el peso de cada dovela. Éstos se reparten en los apoyos, la mitad en cada uno, generando así las reacciones correspondientes. Al descomponer la reacción, obtenemos el valor de R_x y R_y . Las reacciones horizontales (R_x) no se tendrán en cuenta, ya que se contrarrestan unas con otras al ser del mismo valor, pero contrarias. Cada reacción vertical (R_y) se multiplicará por 2, ya que cada tramo del muro recibe el peso de dos bóvedas, una por cada lado. En la Fig 36 se puede observar como quedaría finalmente la repartición del peso de la bóveda sobre el muro.



Posteriormente, se divide el muro en dovelas tal y como se indica en la imagen [Fig 37]. En este caso, la profundidad de cada dovela es de 0,24 m, lo que mide la soga del ladrillo. El sumatorio de pesos de cada dovela, junto con el que ejerce la bóveda, nos proporciona el peso total por cada tramo. Dicho peso total, genera unas reacciones en los apoyos.

Fig 37 | Pesos unitarios por dovelas y total. Fuente: elaboración propia

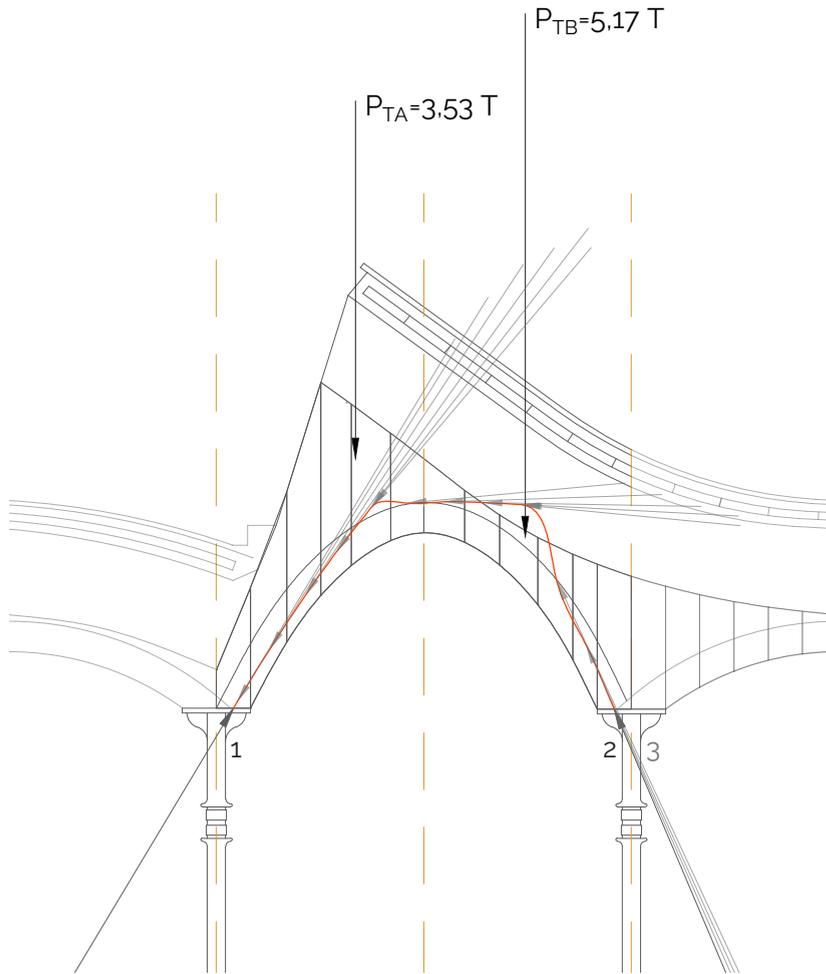


Fig 38 | Primer tanteo de línea de empuje. Fuente: elaboración propia

A continuación, se divide el análisis en dos, uno por cada arco. En un primer tanteo, se colocan las reacciones en el centro de los apoyos 1 y 2, y se procede a trazar la línea de empujes. Como se puede observar [Fig 38], la línea sale del muro, por lo que se debe seguir buscando.

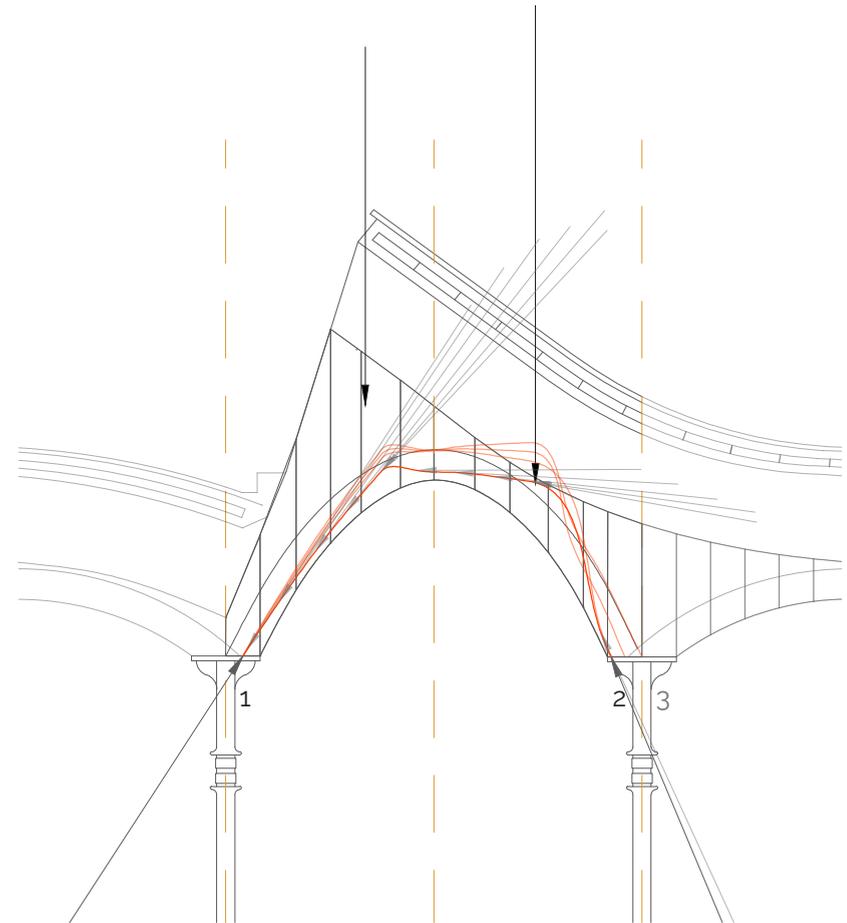


Fig 39 | Líneas de empuje. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, se decide mantener la posición de la reacción en el apoyo 1, ya que no presenta ningún punto crítico, y se cambia la del apoyo 2. Tras realizar distintas pruebas, se consigue encontrar una línea de empujes contenida dentro del muro, por lo que, según el Teorema de la Seguridad, no se producirá colapso [Fig 39].

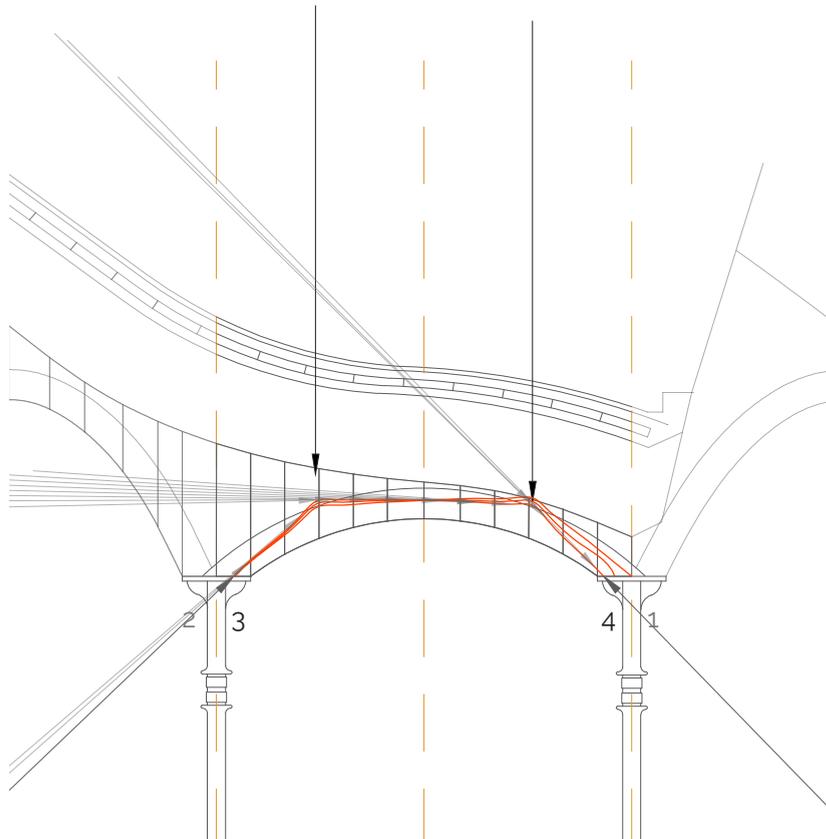


Fig 40 | Pesos unitarios por dovelas y total. Fuente: elaboración propia

Para el segundo arco [Fig 40], se realiza el mismo procedimiento. Se encuentra más de una línea de empujes contenida dentro del muro, variando la posición de la reacción en el apoyo 4, ya que la línea a pesar de estar dentro, se encuentra muy próximo al borde del muro. También se descarta la posibilidad de colapso.

3.4 Análisis por el Método de Elementos Finitos

Con la finalidad de simplificar y sintetizar los elementos del edificio, se ha optado por reducir el número de pórticos, rematando con la fachada correspondiente debido a su interés dentro del conjunto estructural [Fig 41 y 42]. Por otro lado, no se han tenido en cuenta los edificios colindantes ya que actúan como arriostramientos de la nave central, siendo éste el objeto de interés.

Para el cálculo mediante el Método de los Elementos Finitos se utilizará la versión de investigación del programa informático ANGLE, creado por el profesor Adolfo Alonso Durá en el Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de las Estructuras de la Universidad Politécnica de Valencia. El programa se utiliza tanto para el cálculo de estructuras de nueva construcción como para el peritaje de las estructuras existentes. Gracias a su versatilidad, es posible calcular todo aquello que el programa AUTOCAD permita dibujar. El cálculo se realiza en dos fases: la primera consiste en dibujar el modelo en CAD y mediante la aplicación que se implementa sobre el programa, asignar los parámetros de cálculo a los distintos elementos. La segunda fase se realiza en el propio programa de ANGLE, donde se lleva a cabo el cálculo y análisis de solicitaciones y dimensionado, obteniendo finalmente los datos buscados.

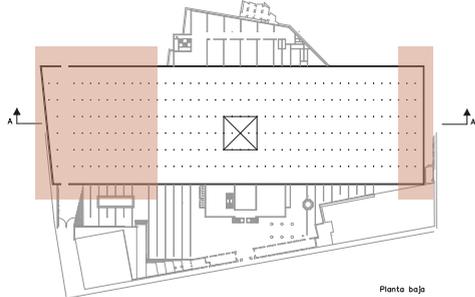


Fig 41 | Planta de la fábrica indicando el ámbito del estudio estructural. Fuente: *Elaboración propia*

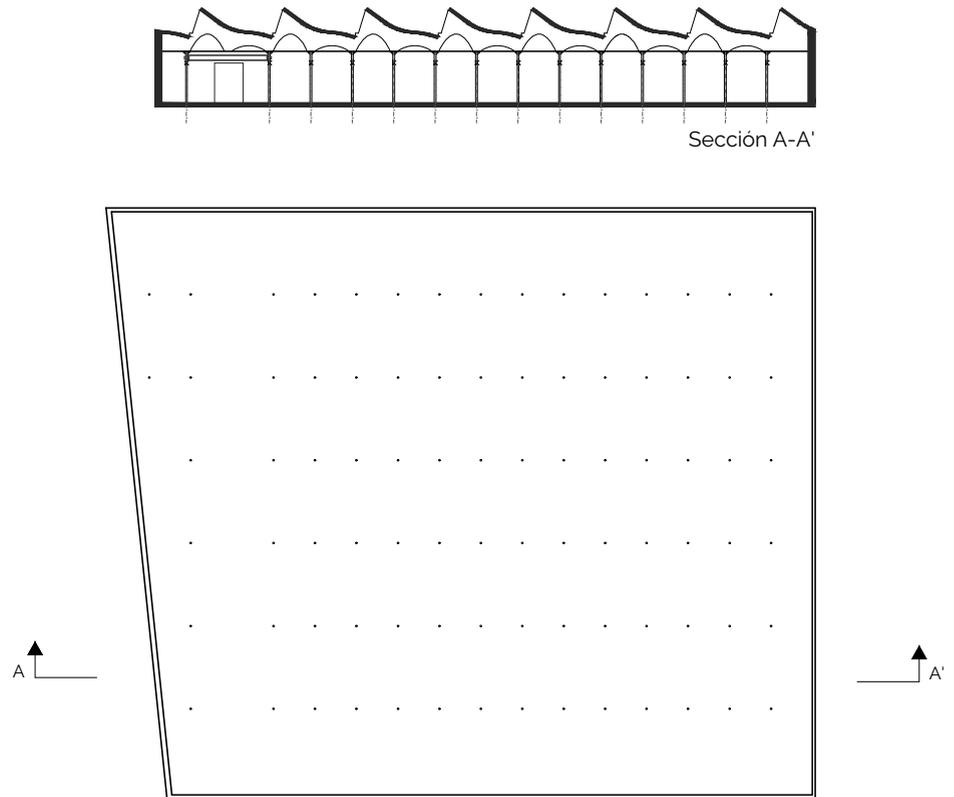


Fig 42 | Planta y sección de la fábrica del ámbito de estudio estructural. Fuente: *Elaboración propia*

3.4.1 Modelado

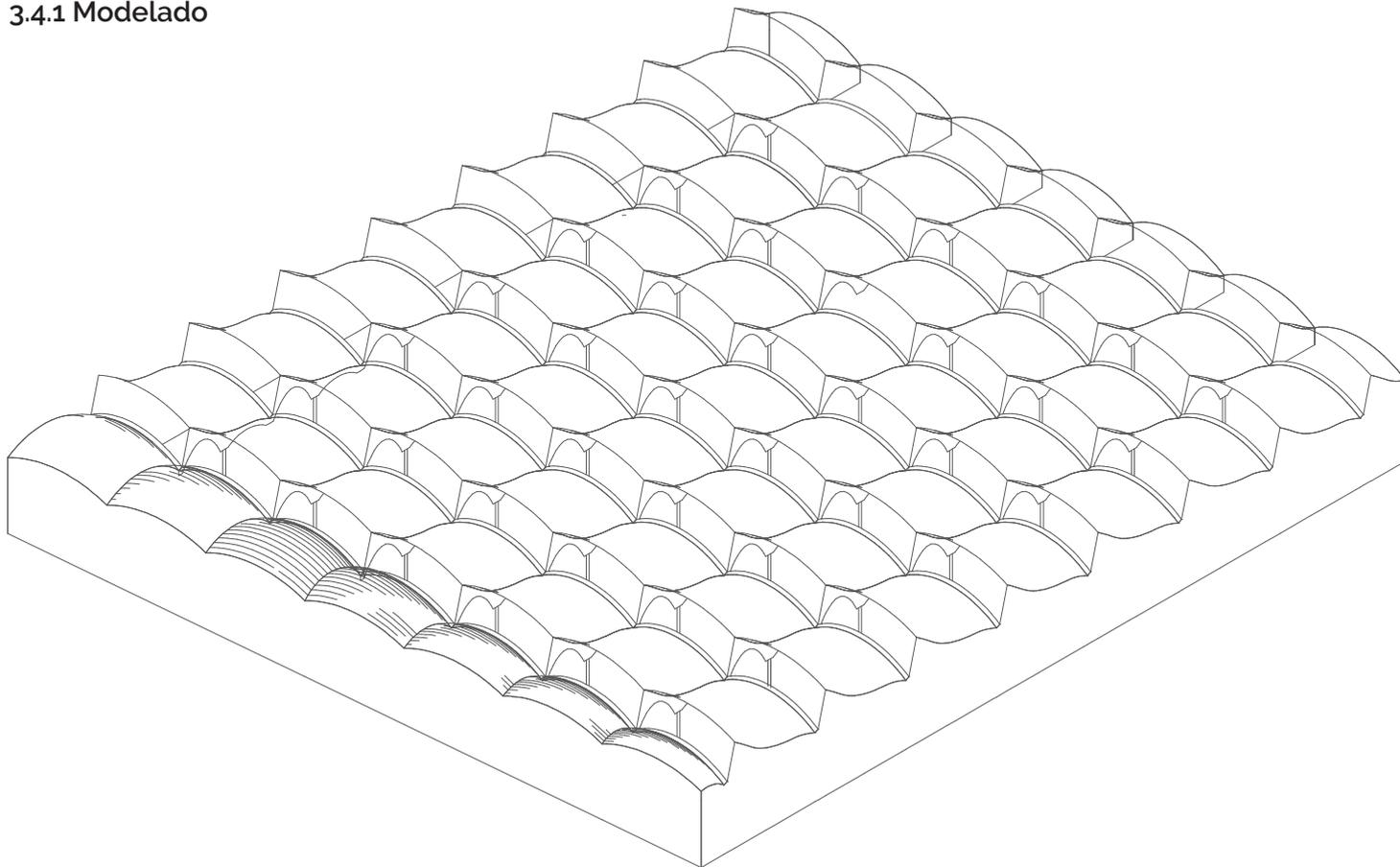


Fig 43 | Axonometría del levantamiento de la fábrica. Fuente: *Elaboración propia*

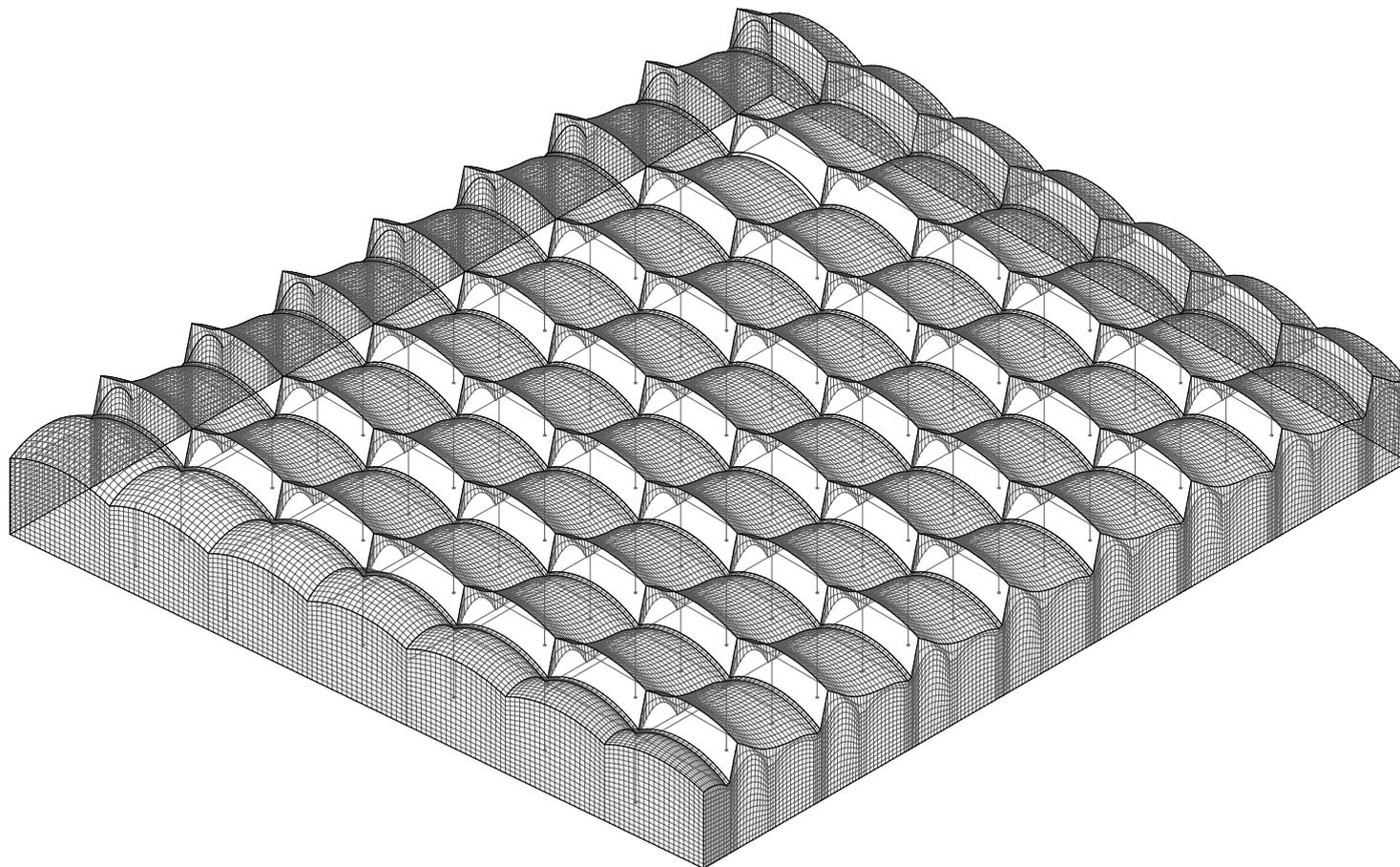
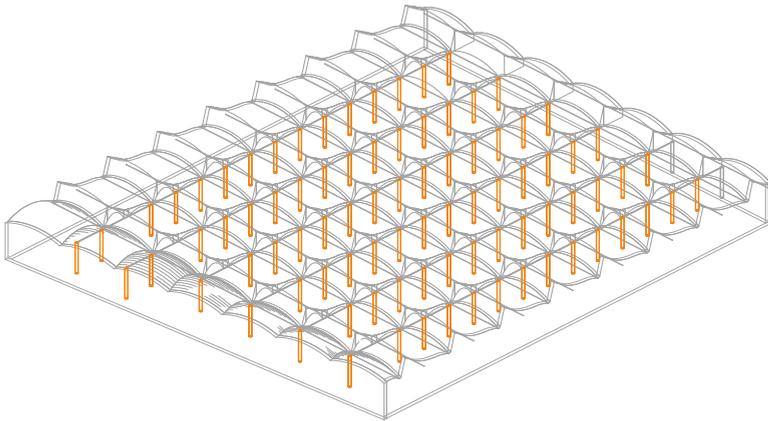


Fig 44 | Axonometría del mallado del modelo de cálculo. Fuente: *Elaboración propia*

3.4.2. Evaluación de cargas

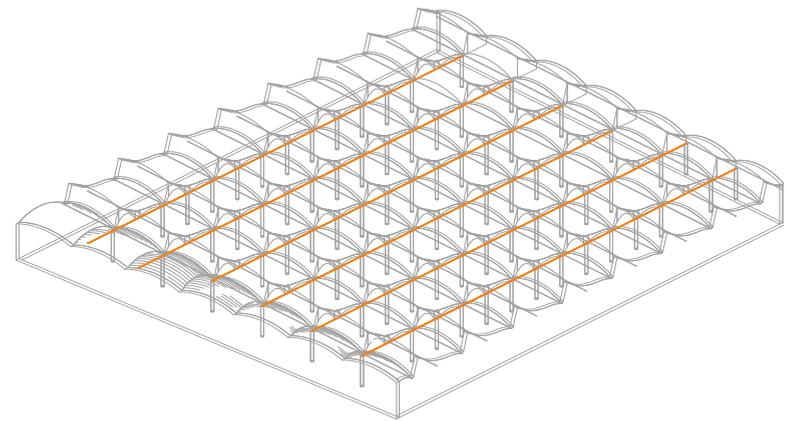
3.4.2.1. Acciones permanentes

- Peso propio



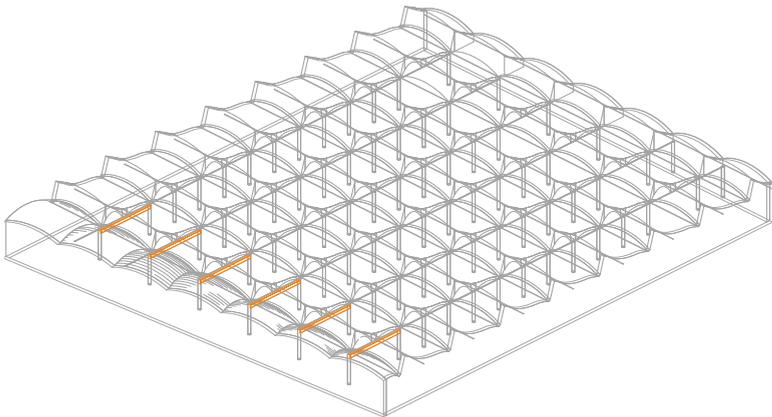
Soportes

Pilares de hierro forjado de sección circular hueca de $\text{Ø}18\text{cm}$ y 5m de altura, situados cada 8,2m en dirección transversal y cada 4,10 en dirección longitudinal.



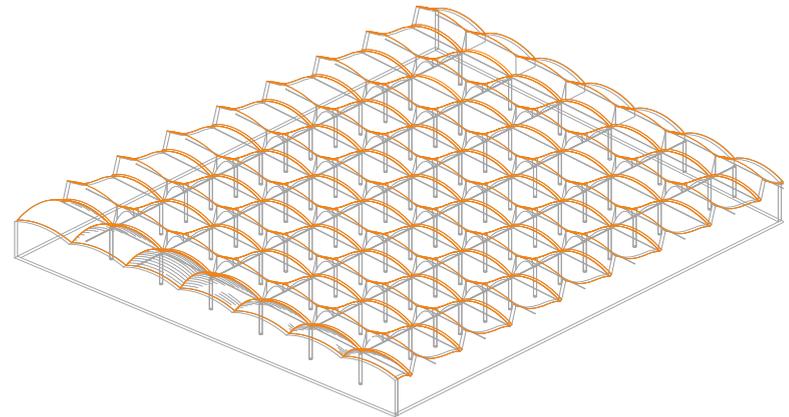
Perfiles

Perfiles en L dispuestos en la dirección longitudinal de la nave.



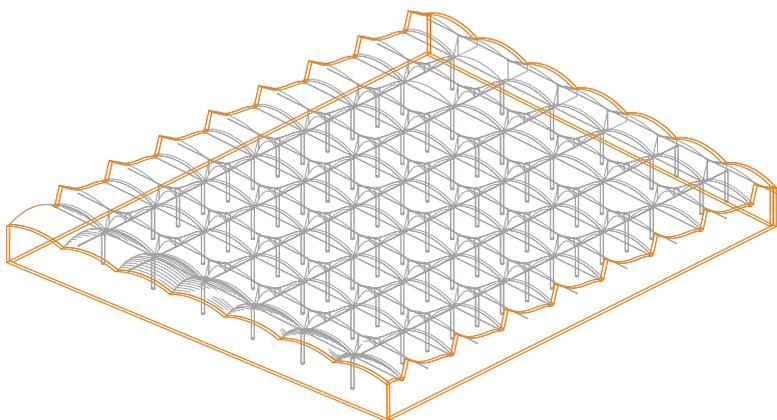
Viga IPN

Viga de perfil IPN 500 dispuesta de canto que absorbe los esfuerzos que debería recibir el soporte al que sustituye.



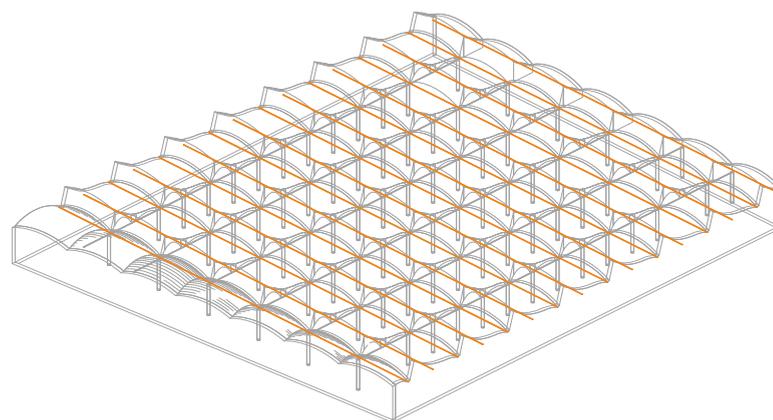
Bóvedas

Cubierta compuesta por bóvedas tabicadas compuestas por 3 capas de rasillas, con un espesor final de 12 cm.



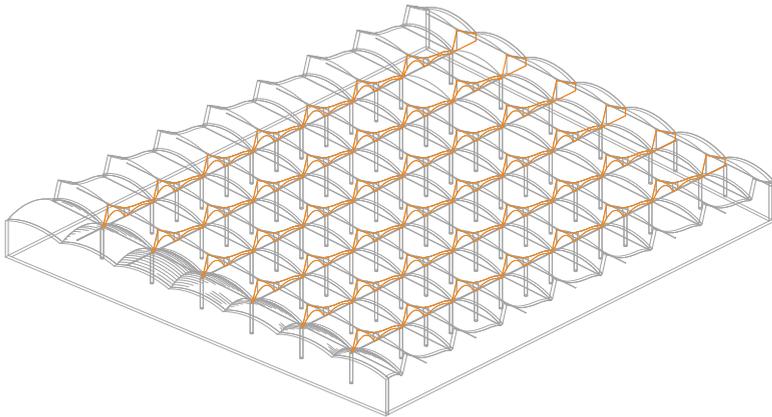
Muro perimetral

Muro perimetral de hormigón que actúa de fachada, de 70 cm de profundidad.



Tirantes

Tirantes de Ø30mm.



Viga

Cada dos tramos, los pilares están unidos por dos arcos de ladrillo, uno rebajado y otro elíptico, que actúan de viga de borde, de 24 cm de espesor. En el extradós común, se adapta a la forma sinusoidal de la bóveda.

3.4.2.2 Acciones variables

- Sobrecarga de uso

Siguiendo el CTE DB SE-AE [9], para asignarle un valor a la sobrecarga de uso a la cubierta se utiliza la tabla 3.1. La cubierta es transitable accesible sólo privadamente, sin embargo existen visitas para una parte de la misma [Fig 46]. En dicha zona, que se ha situado en el pórtico central [Fig 47] se aplicará una carga uniforme de valor 3 kN/m², mientras que en el resto será de 1 kN/m², tal y como indica el CTE [Fig 45].

Tabla 3.1 Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	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 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ⁽⁴⁾	2
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Fig 45 | Valores característicos de las sobrecargas de uso. Fuente: CTE DB SE-AE



Fig 46 | Paseo por las bóvedas organizado por el mNATEC. Fuente: mNATEC

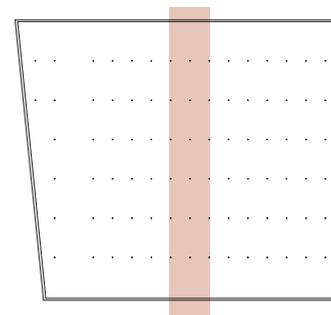


Fig 47 | Planta indicando los pórticos transitables de uso público. Fuente: elaboración propia.

[9] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural: Acciones en la Edificación.

- Viento

La aplicación de ANGLE facilita el cálculo de la carga provocada por el viento, ya que permite introducir los datos de la zona y entorno, dirección del viento y superficie afectada, y genera por sí mismo las cargas tanto de sotavento como de barlovento. La fábrica Aymerich, Amat i Jover se encuentra en Terrassa, Barcelona, situada en zona C [Fig 48] y se ha escogido un entorno "urbano y forestal".

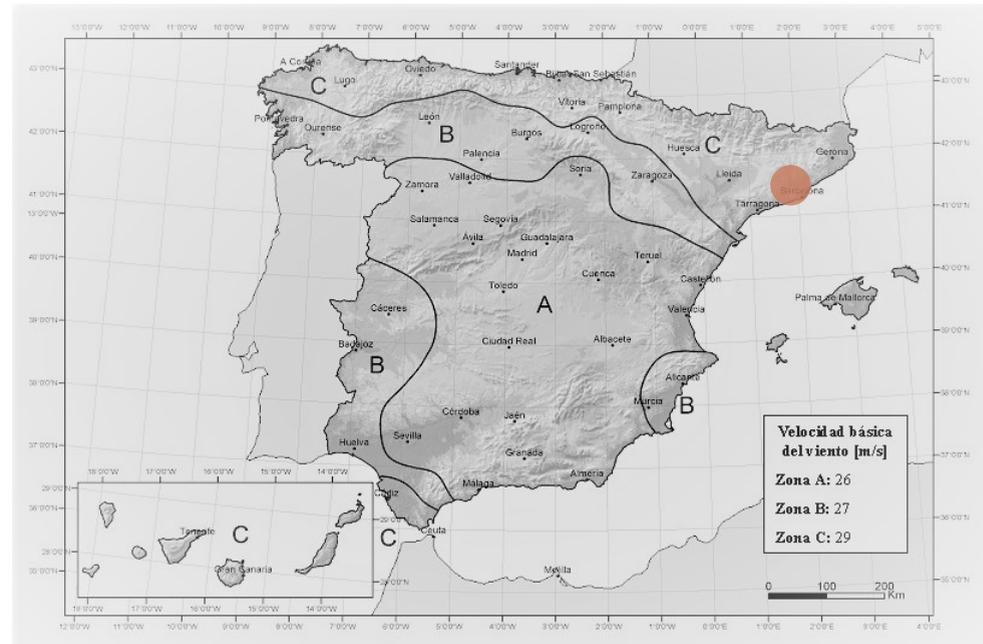


Fig 48 | Mapa clasificación de zonas según la presión dinámica del viento. Fuente: CTE DB SE-AE

- Nieve

Siguiendo el CTE DB SE-AE, la distribución y la intensidad de la carga de nieve dependerá del clima del lugar, del tipo de precipitación, del relieve del entorno, de la forma del edificio o de la cubierta, de los efectos del viento, y de los intercambios térmicos en los parámetros exteriores. Al no ser plana la cubierta, el valor de carga de nieve por unidad de superficie, q_n , se estimará de la siguiente manera:

$$q_n = \mu \cdot s_k$$

siendo:

μ = Coeficiente de forma de la cubierta.

Se tomará $\mu=1$, ya que la inclinación de la bóveda permite el deslizamiento del agua gracias a su geometría.

s_k = Valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal según la tabla 3.7 del CTE DB SE-AE.

La fábrica Aymerich, Amat i Jover se encuentra en Terrassa, Barcelona.

Capital	Altitud m	s_k kN/m ²	Capital	Altitud m	s_k kN/m ²	Capital	Altitud m	s_k kN/m ²
Albacete	690	0,6	Guadalajara	680	0,6	Pontevedra	0	0,3
Alicante / Alacant	0	0,2	Huelva	0	0,2	Salamanca	780	0,5
Almería	0	0,2	Huesca	470	0,7	SanSebastián/Donostia	0	0,3
Ávila	1.130	1,0	Jaén	570	0,4	Santander	0	0,3
Badajoz	180	0,2	León	820	1,2	Segovia	1.000	0,7
Barcelona	0	0,4	Lérida / Lleida	150	0,5	Sevilla	10	0,2
Bilbao / Bilbo	0	0,3	Logroño	380	0,6	Soria	1.090	0,9
Burgos	860	0,6	Lugo	470	0,7	Tarragona	0	0,4
Cáceres	440	0,4	Madrid	660	0,6	Tenerife	0	0,2
Cádiz	0	0,2	Málaga	0	0,2	Teruel	950	0,9
Castellón	0	0,2	Murcia	40	0,2	Toledo	550	0,5
Ciudad Real	640	0,6	Orense / Ourense	130	0,4	Valencia/València	0	0,2
Córdoba	100	0,2	Oviedo	230	0,5	Valladolid	690	0,4
Coruña / A Coruña	0	0,3	Palencia	740	0,4	Vitoria / Gasteiz	520	0,7
Cuenca	1.010	1,0	Palma de Mallorca	0	0,2	Zamora	650	0,4
Gerona / Girona	70	0,4	Palmas, Las	0	0,2	Zaragoza	210	0,5
Granada	690	0,5	Pamplona/Iruña	450	0,7	Ceuta y Melilla	0	0,2

Tabla 3.7 Sobrecarga de nieve en capitales y ciudades autónomas. Fuente: CTE DB SE-AE

Finalmente, la carga de nieve será:

$$q_n = \mu \cdot s_k = 1 \cdot 0,4 = 0,4$$

- Sismo

Las acciones sísmicas se definen mediante métodos estadísticos y de probabilidad ya que son imprevisibles. La aplicación de ANGLE presenta una opción que permite hacer la hipótesis de cálculo a sismo.

En primer lugar, se define el espectro de cálculo y las hipótesis. Según la NCSE-02, el valor de aceleración para la zona de Barcelona es de 0,08g [10]. El resto de parámetros se puede observar en la fig 49

Parámetros sísmicos

Espectro Aceleraciones

NCSE-02 EC-8 ACELER. USUARIO OK

Espectro

aX aY aZ aXYZ

Dib. Espectro

A/g Max 0.5 max.(seg) 5

Coeff.Riesgo 1.0
Ta=0.16 Tb=0.64
aX=0.11g
ac=0.09

Parámetros de cálculo NCSE-02

Acel.b. a/g 0.08

K contrib 1.00

C-S.suelo 1.60 III (1.6 Suelo medio 200 < vs < 400 m/s)

A.AmX % 5.00

A.AmY % 5.00

A.AmZ % 5.00

Duct.X 2.0 2 Ductilidad Baja

Duct.Y 2.0 1 Sísmos Gran

Duct.Vert 2.0

C.Import 1.3 II (1.3 Importancia Especial)

Vida.años 100 Periodo de Retorno: 475 años

a/g 0.01434 T(seg) 5.000

USUARIO

a/g 0.30 T.(seg) 0.50

Hipótesis Sísmicas ANÁLISIS MODAL- ESPECTRAL

Ax 0.00 Ay 1.00 Az 0.00

Número de HIPÓTESIS SÍSMICAS = 2

2.Hipotesis=10 Acción Sísmica Y (N->S) ::INSTANTÁNEA

--- Combin. Modal --- Combin. Direccional

CQC SRSS CQC3 SRSS

Carga PUSH-OVER

Análisis Modal

Masa x aceleración

[10] Información obtenida a través del mapa de peligrosidad sísmica del Instituto Geográfico Nacional.

Fig 49 | Parámetros sísmicos del espectro elástico de diseño. Fuente: Elaboración propia, programa ANGLE

3.4.3 Cálculo lineal

Posteriormente se le asigna a cada elemento la materialidad con sus propiedades mecánicas, para después exportar el archivo al programa ANGLE.

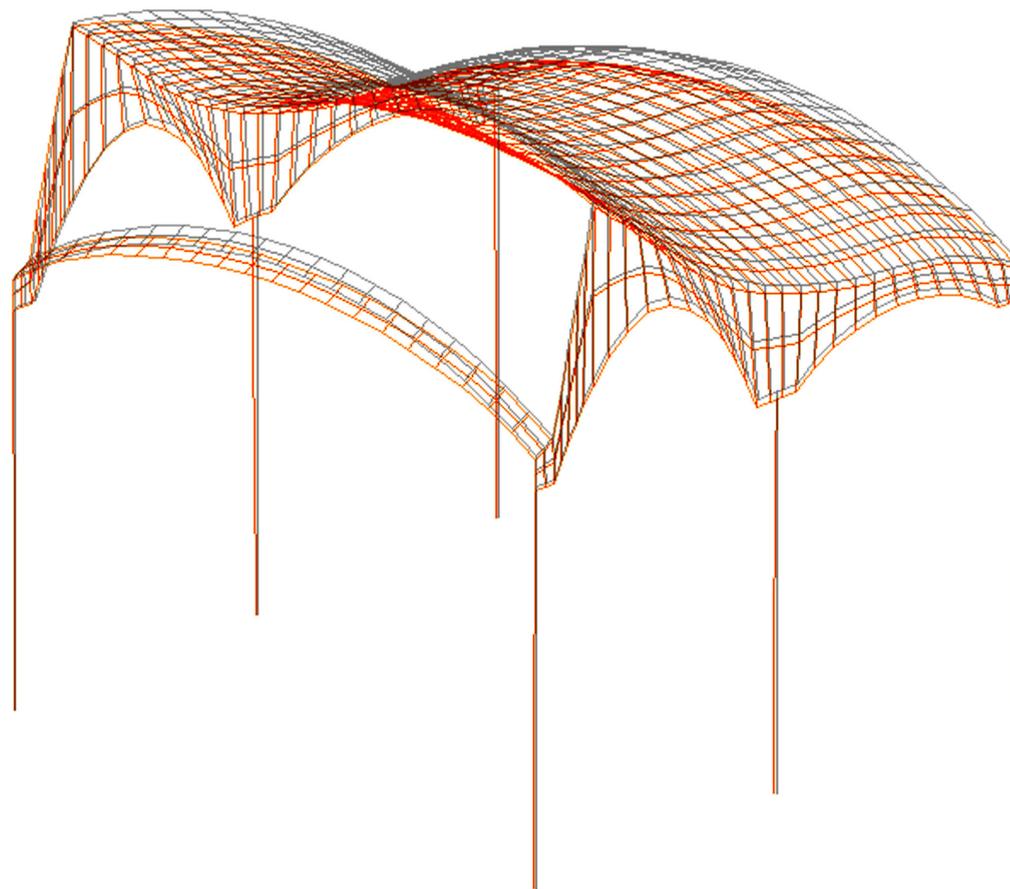
En primer lugar, se hará un análisis lineal a partir de las combinaciones de las hipótesis [Fig 50]. Para poder observar y analizar con mayor claridad los resultados obtenidos, se aísla una bóveda tipo dentro de la interfaz de visualización, siendo los valores obtenidos los correspondientes a todo el conjunto.

Dado que los resultados que pueden exponerse son infinitos, este trabajo presentará sólo puntos que llamen la atención, ya sea porque salgan de los valores medios o porque se trate de puntos constructivamente interesantes. Por la misma razón, no se presentarán todas las combinaciones, ya que, tras comprobar todos los resultados, éstos son muy similares.

Hipótesis

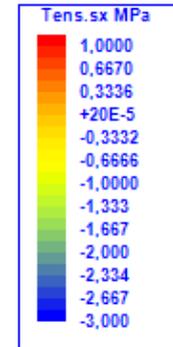
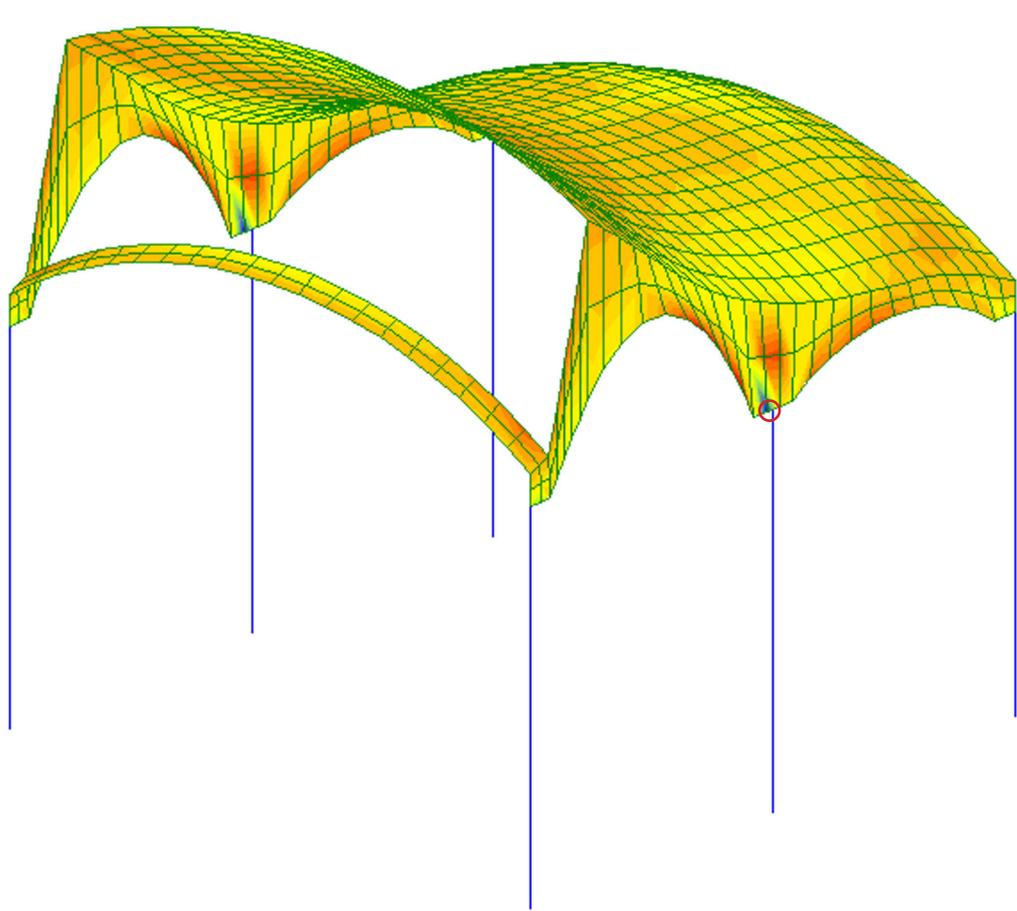
H1	Peso propio	Permanente
H2	Sobrecarga de Uso	Media
H3	Nieve	Media
H4	Viento Norte	Corta
H5	Viento Este	Corta
H6	Viento Sur	Corta
H7	Viento Oeste	Corta
H9	Acción sísmica X	Instantánea
H10	Acción sísmica Y	Instantánea

Fig 50 | Hipótesis establecidas. Fuente: Elaboración propia, programa ANGLE



Deformada

Combinación 1 E.L.S:
 $1,00 \times H1 + 1,00 \times H2 + 0,70 H3$
Tipo: Característica



**Isovalores Esfuerzos
Tensiones en x (MEMBRANA)**

Combinación 4 E.L.U.:
 $1,35 \times H1 + 1,05 \times H2 + 1,05 H3 + 1,50 \times H4$

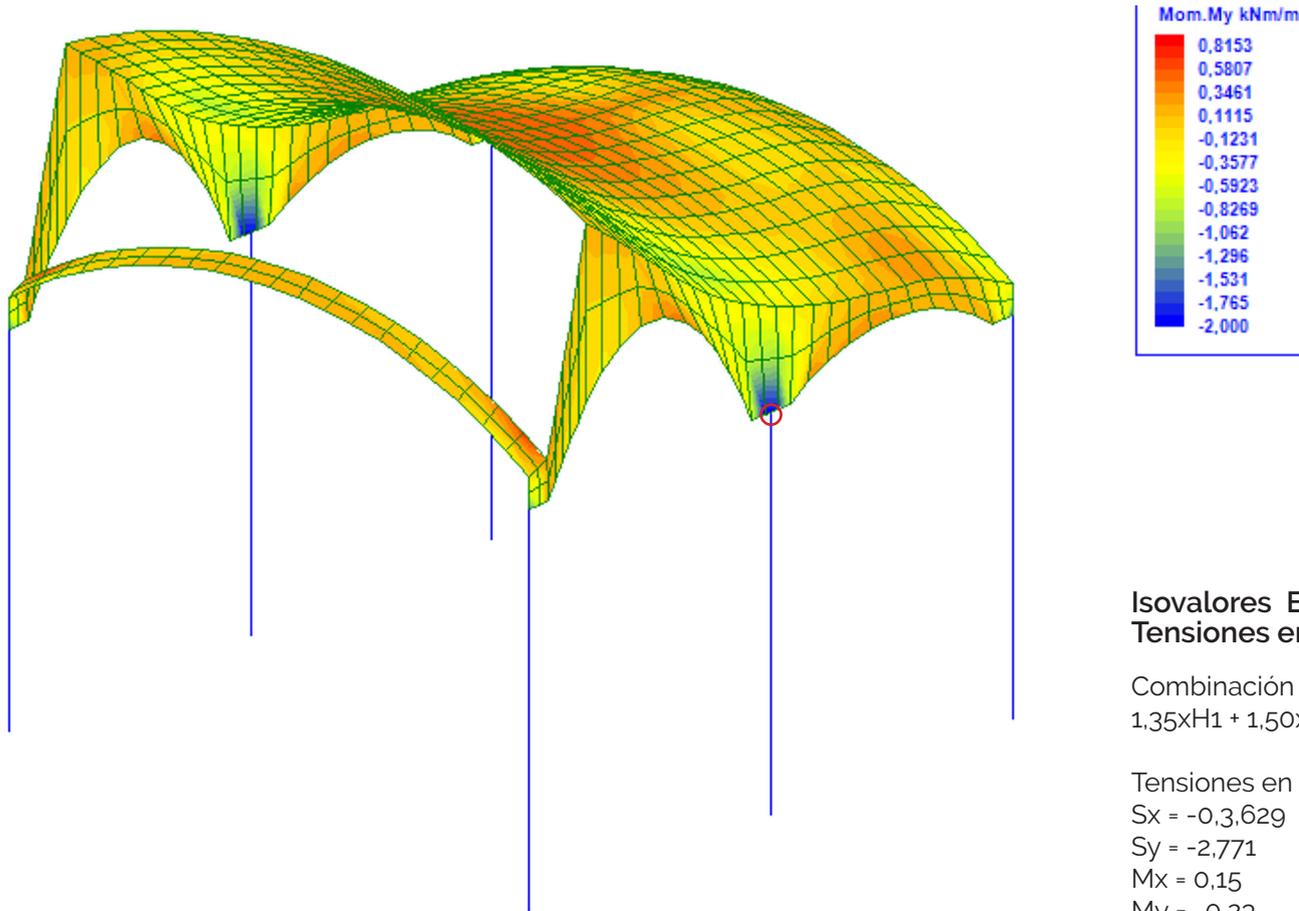
Tensiones en el punto ○

$S_x = -3,3038$

$S_y = -2,325$

$M_x = 0,19$

$M_y = -,027$



Isovalores Esfuerzos
Tensiones en y (MEMBRANA)

Combinación g E.L.U.:
 $1,35xH1 + 1,50xH2 + 1,05xH3 + 0,9xH7$

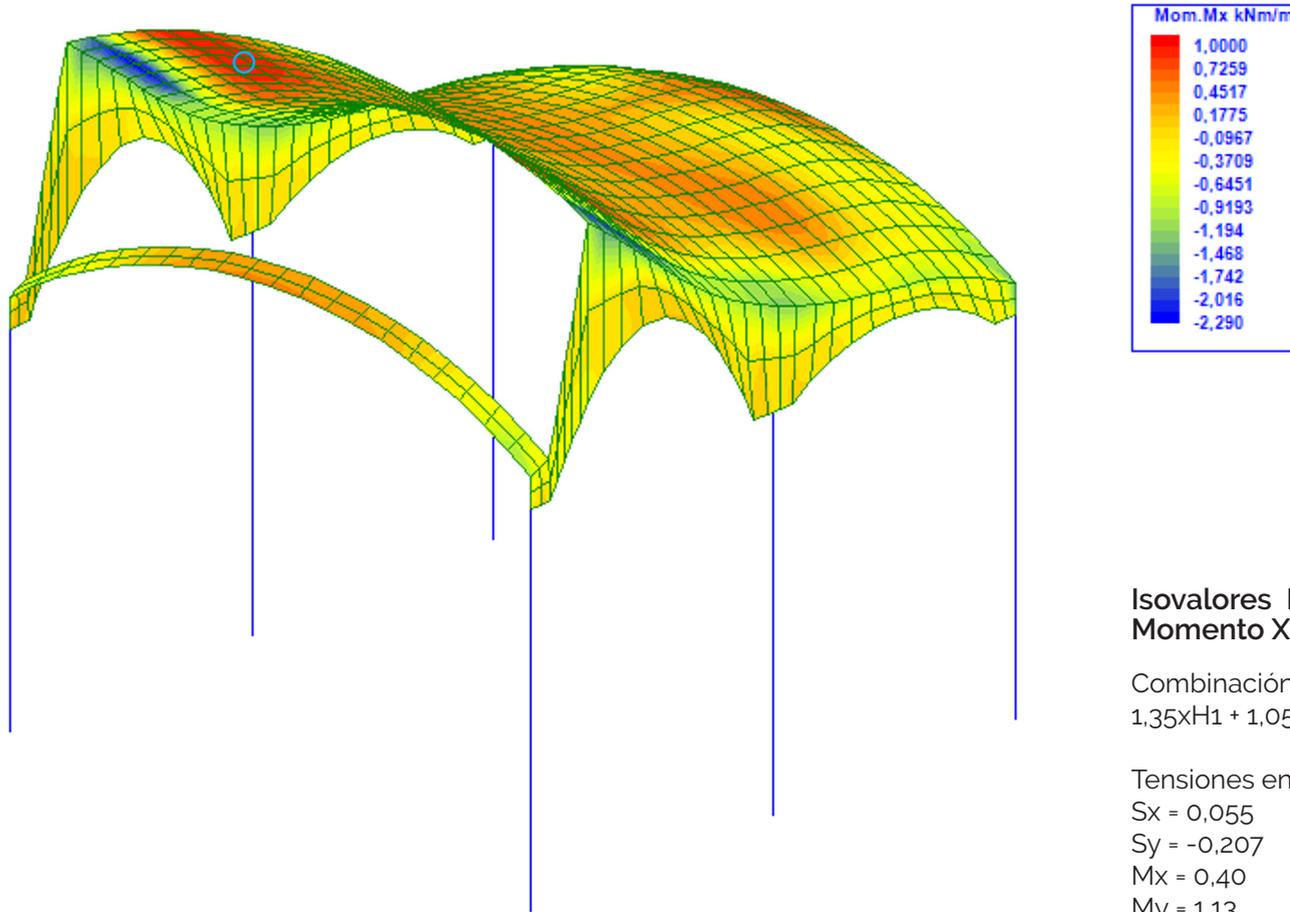
Tensiones en el punto ○

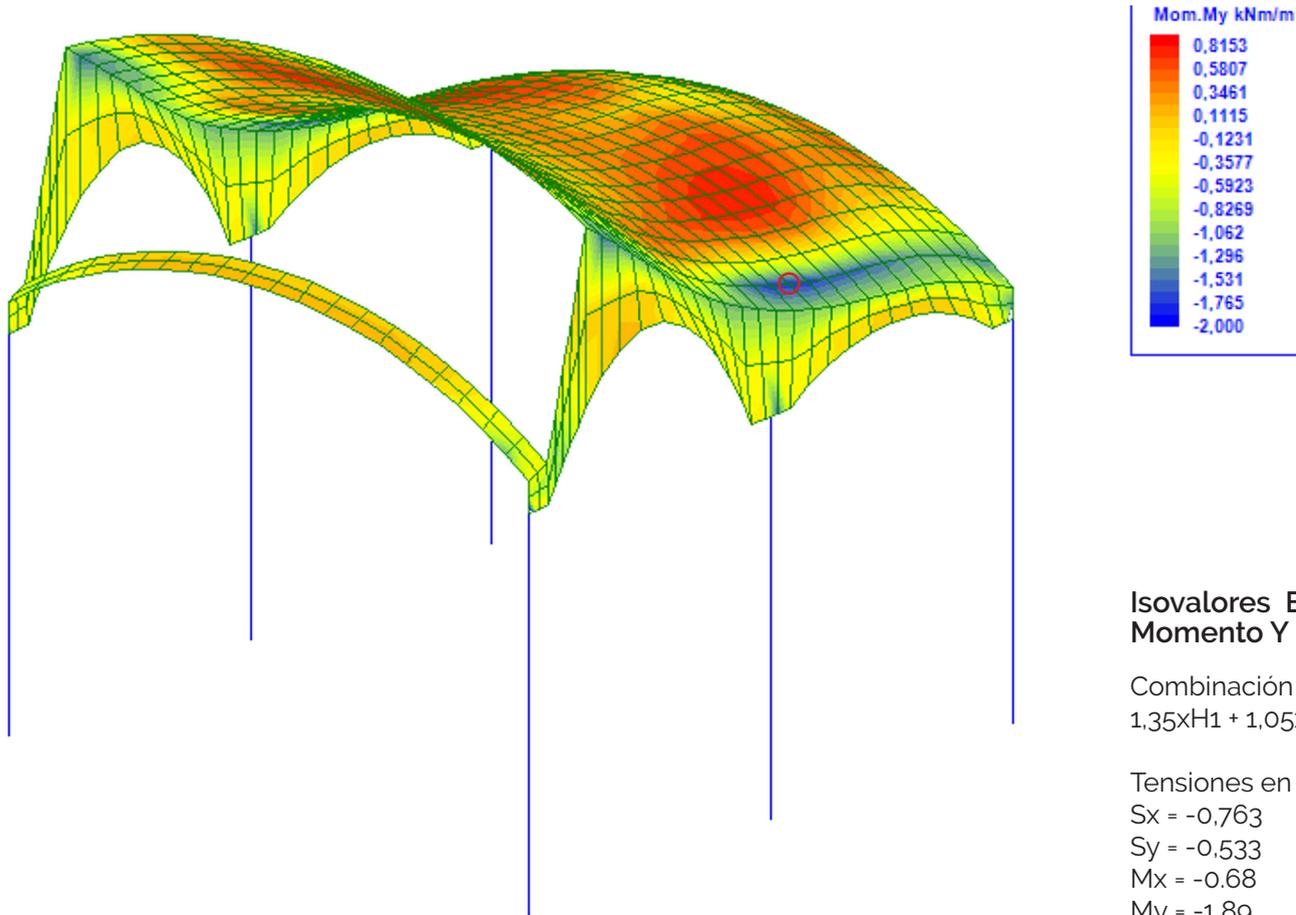
$S_x = -0,3,629$

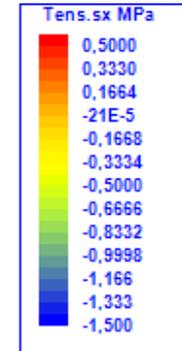
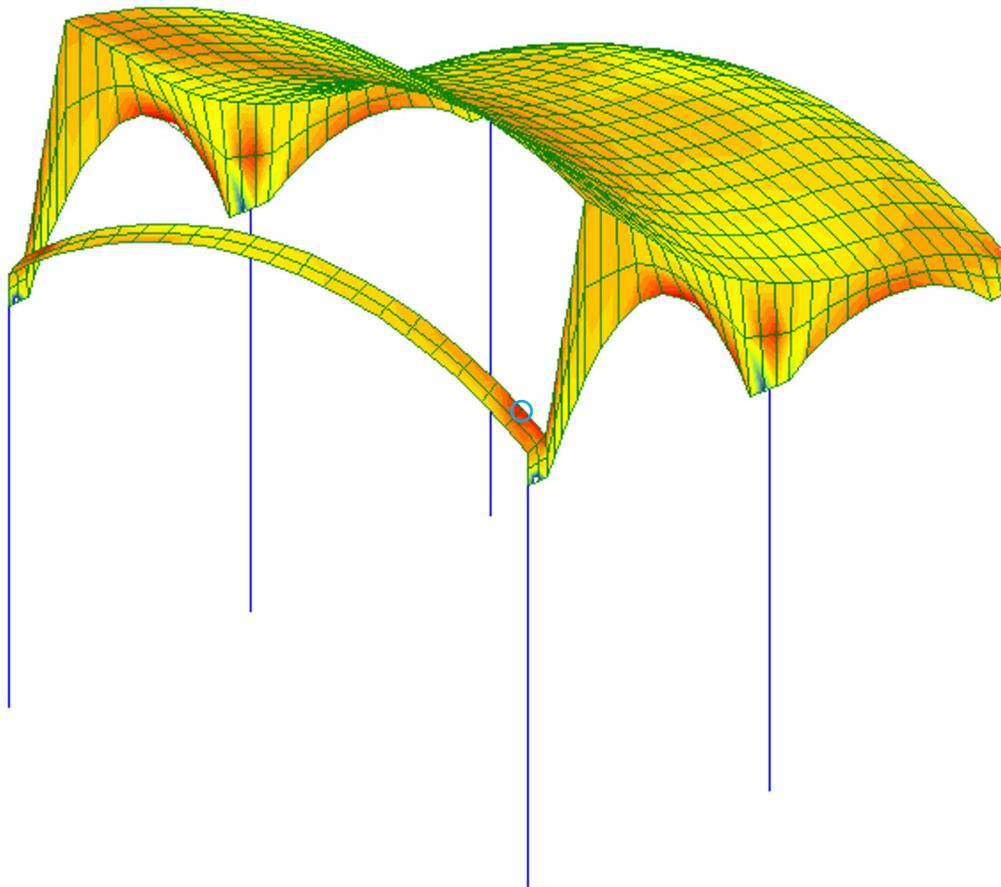
$S_y = -2,771$

$M_x = 0,15$

$M_y = -0,23$







Isovalores Esfuerzos Tensiones en x (MEMBRANA)

Combinación 11 E.L.U.:

$$1,0 \times H1 + 0,3 \times H2 + 0,6 \times H3 + 1,0 \times H9 + 0,3 \times H10$$

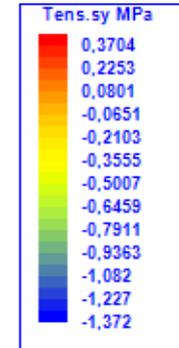
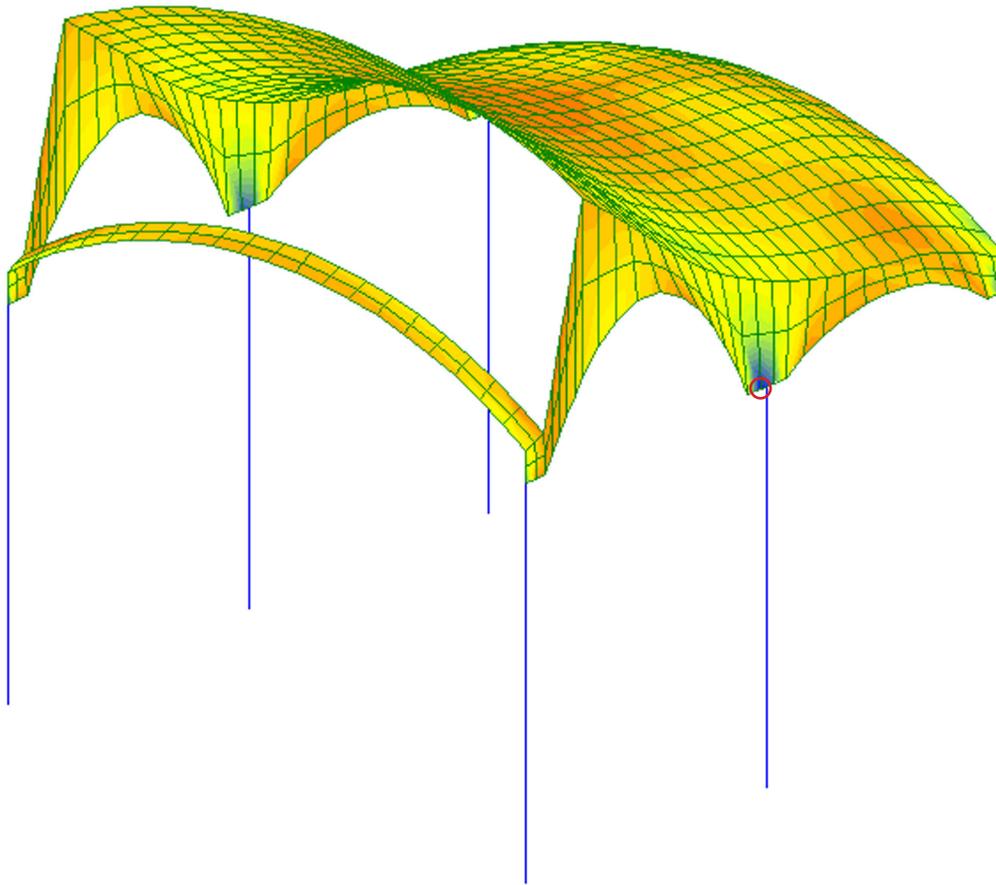
Tensiones en el punto

$$Sx = 0,364$$

$$Sy = 0,098$$

$$Mx = -0,96$$

$$My = -0,45$$



Isovalores Esfuerzos Tensiones en y (MEMBRANA)

Combinación 14 E.L.U.:

$$1,0 \times H1 + 0,3 \times H2 + 0,6 \times H3 - 0,3 \times H9 - 1,0 \times H10$$

Tensiones en el punto ○

$$S_x = -1,748$$

$$S_y = -1,316$$

$$M_x = -1,12$$

$$M_y = 1,68$$

3.4.4 Cálculo no lineal

El presente trabajo me ha llevado a meterme en el cálculo no lineal, desarrollando brevemente un modelo de daño que será el comienzo de futuras líneas de investigación en el campo del análisis estructural de las bóvedas tabicadas.

Se denomina cálculo no-lineal de estructuras al que tiene en cuenta efectos como el comportamiento inelástico real de los materiales y la influencia de los cambios de geometría de la estructura en las combinaciones de equilibrio y de compatibilidad de deformaciones.

Para llevarlo a cabo, se utiliza nuevamente el programa ANGLE. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

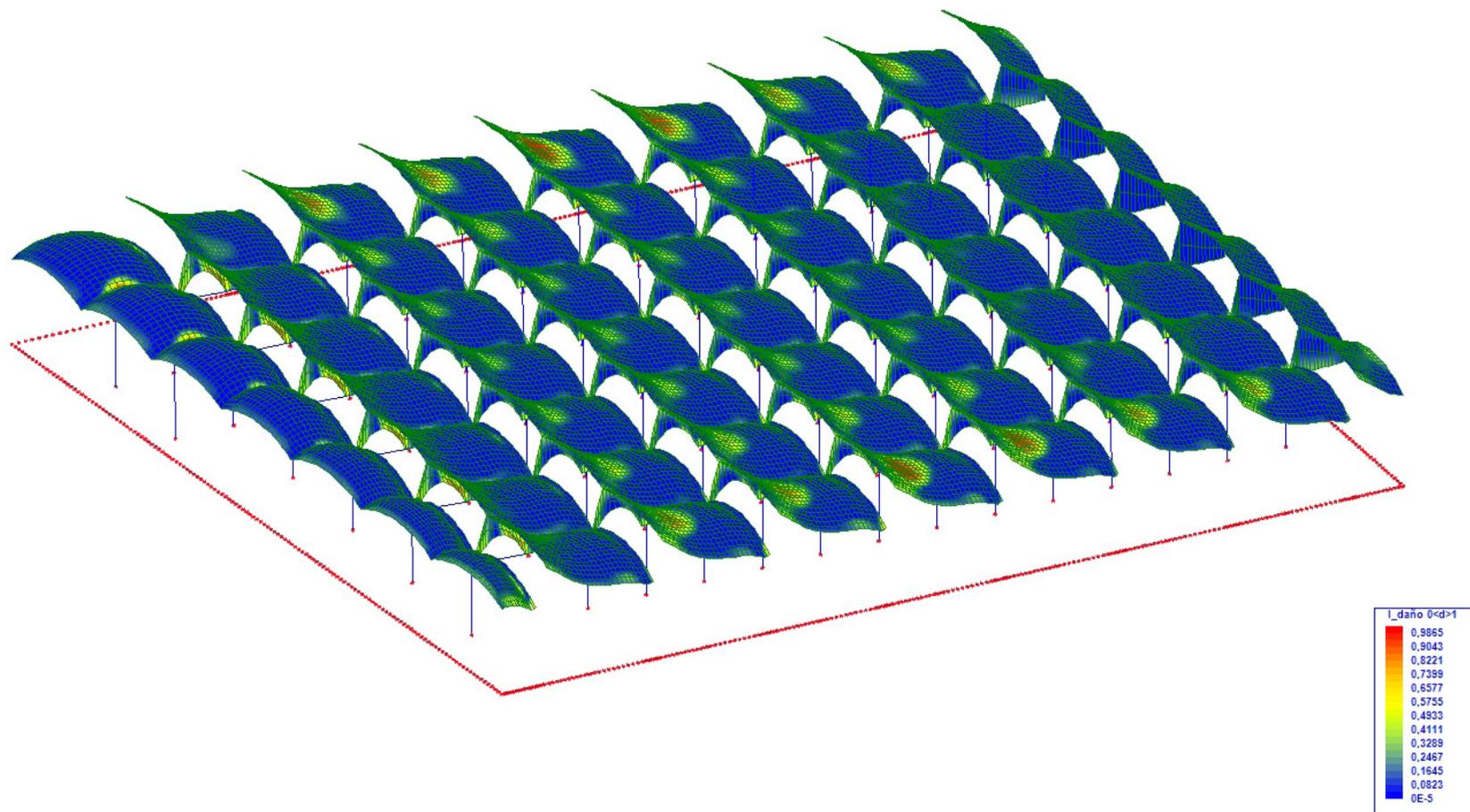


Fig 51 | Deformada del modelo de daño. Fuente: *Elaboración propia*

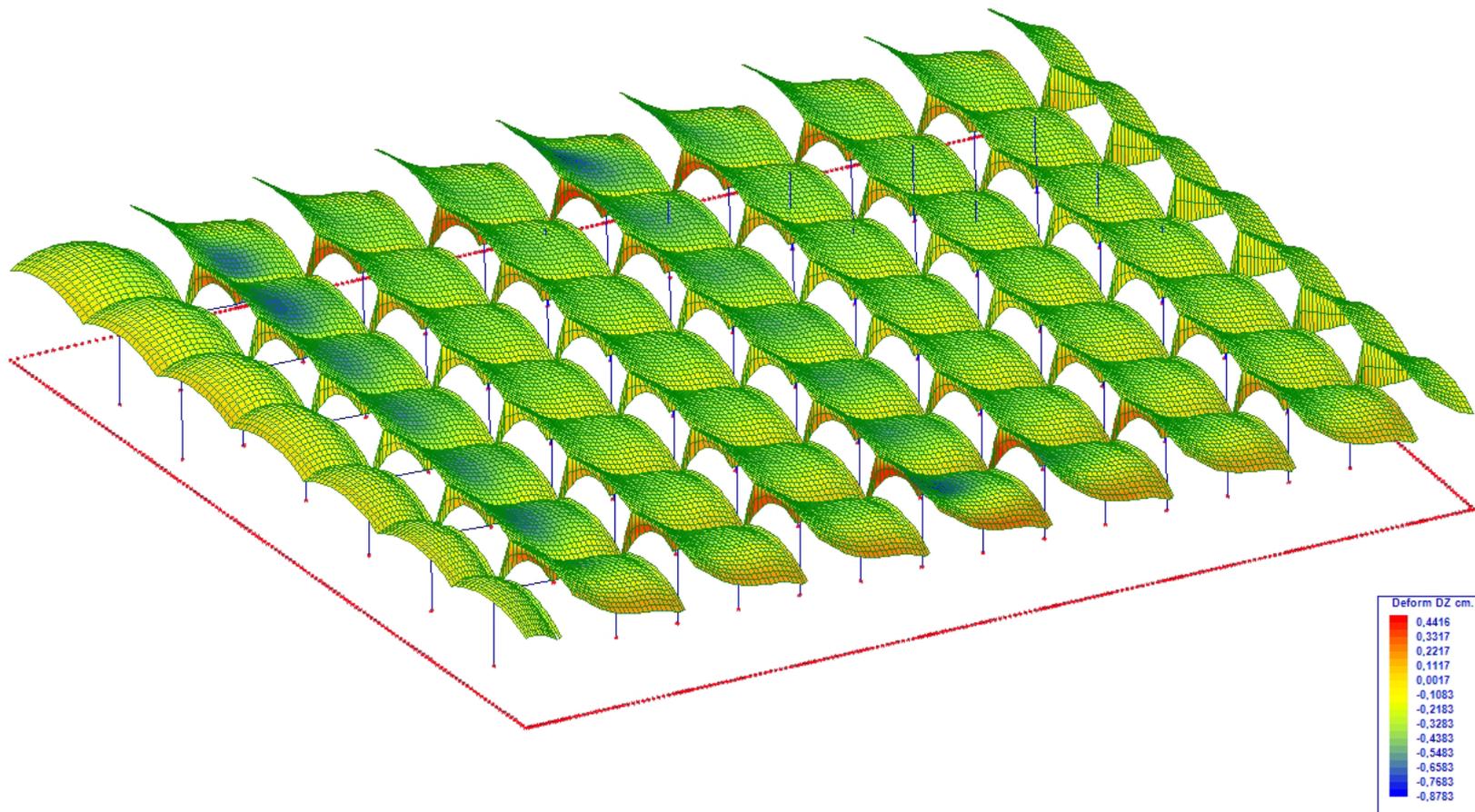


Fig 52 | Índice de daño. Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

Las bóvedas tabicadas fueron un elemento constructivo de gran importancia en toda la zona del levante. Debido a la larga historia que traen consigo, estas se asocian a la antigüedad. Sin embargo, se puede afirmar que hoy en día resulta una solución práctica y viable para edificios de obra nueva o de rehabilitación.

El principal material es el ladrillo, el cual se puede fabricar en muchas partes del mundo, ya que la materia prima de la que está compuesta está disponible y en gran cantidad, siendo el mayor obstáculo el del clima, el cual afecta en los procesos de secado. Su puesta en obra es económica que, con operarios experimentados, no requiere de cimbra, lo que reduce tanto el tiempo como el costo de la construcción. Por otro lado, presenta una gran ligereza en relación a su capacidad portante. Este aspecto ha permitido desarrollar ensayos con sistemas prefabricados, lo que disminuyen el tiempo de construcción, pudiendo llevar a cabo otros elementos constructivos mientras se realiza en paralelo la bóveda. Además, resulta ser un sistema constructivo de alta eficiencia energética, ya que, tanto en su producción como en la eficacia de la edificación terminada, presenta un bajo consumo energético. Desde este punto de vista, se trata de un sistema constructivo óptimo para zonas donde existe una falta de infraestructuras de transporte, principalmente en países en vías de desarrollo. Un ejemplo es el "Droneport", de la Norman Foster Foundation. [Fig 53]



Fig 53 | Imagen hiperrealista del "Droneport". Norman Foster Foundation. Fuente: Norman Foster Foundation

El estudio de la cubierta abovedada de la Fábrica Aymerich, Amat i Jover permite concluir que sus singulares curvas conforman una estructura estable y de interés geométrico.

La época en la que fue construido ha permitido la obtención de toda la información geométrica necesaria para el modelado en 3D. De no ser así, los métodos de cálculo utilizados requieren de conocimientos avanzados para el levantamiento de información, tales como el escáner láser.

A partir del análisis límite se ha demostrado que, como era de esperar, el edificio es estable frente a cargas gravitatorias, puesto que la resultante de las presiones se sitúa dentro de la sección del arco.

En general las bóvedas de la Fábrica Aymerich, Amat i Jover presentan una forma optimizada, las tensiones de tracción son muy bajas y no presenta prácticamente excentricidades. Resulta muy importante destacar que estamos frente a una obra que se ejecutó con los métodos de cálculo utilizados a principios del Siglo XX, por lo tanto el resultado morfológico de las bóvedas se ha aproximado muy bien a la forma que se obtendría en la actualidad con los métodos numéricos de hoy en día.

5. Investigaciones futuras

La primera Línea de investigación que me gustaría llevar adelante en relación al caso de estudio, sería la modificación de la forma de las bóvedas, introduciéndome en el diseño paramétrico. Se trata de un proceso iterativo, en el que se va variando la forma de la malla hasta conseguir la minimización de momentos y la optimización de la forma, para que todos los puntos trabajen como membrana

Otro punto interesante consistiría en la elaboración de un modelo numérico de una obra de Eladio Dieste con la implementación de las armaduras, elaborando un modelo en paralelo donde no se considere este refuerzo, comparando así ambos modelos y analizando las diferencias en el comportamiento estructural.

Otra línea de investigación sería aplicar la metodología empleada en esta investigación (estudio histórico y constructivo, el levantamiento geométrico y análisis estructural) a los sistemas abovedados del resto de ejemplos referenciados en el punto 1.5 Expresividad de las bóvedas.

6. Fuentes y bibliografía

Bibliografía

- ADELL, J. M.; GARCÍA, A. "*Gaudí y las bóvedas de las escuelas de la Sagrada familia*". Informes de la Construcción, Vol. 56, nº 496, pp. 31-45 (marzo-abril 2005).
- "*Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural: Acciones en la edificación*"
- D'ANSELMO, M. "*Las geometrías de las estructuras abovedadas*" Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla (octubre 2000)
- GARCÍA-GUTIÉRREZ, J. "*La bóveda de ladrillo y la imagen del cielo*" La arquitectura religiosa de Luis Moya. pp. 35-57
- GARCÍA-GUTIÉRREZ, J. "*El sistema de bóvedas tabicadas en Madrid: de Juan Bautista Lázaro (1849-1919) a Luis Moya (1904-1990)*" Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid. (1996)
- GARCÍA, J.; BELTRÁN, M.A. "*La prefabricación de bóvedas de ladrillo. Una utopía latinoamericana*" Rita, nº2 pp. 92-99 (octubre 2014)
- GONZÁLEZ, J.L. "*La bóveda tabicada: entre la conservación y la destrucción*" Informes de la Construcción, Vol. 56, nº 496, pp. 67-72 (marzo-abril 2005).
- HUERTA, S. "*Mecánica de las bóvedas de fábrica: el enfoque del equilibrio*". Informes de la Construcción, Vol. 56, nº 496, pp 73-89 (marzo-abril 2005).

- MILETO, C.; VEGAS F. "*El panteón de la familia Soriano Manzanet en Vila-Real (Castellón)*" en CyTET. Ciudad y Territorio. Estudios territoriales Vol.XLVIII, nº 190. pp. 725-732 (2016).
- MILETO, C.; VEGAS F. "*Panteón de la familia Soriano-Manzanet*" en CONarquitectura nº 58. pp. 56-58 (2016)
- MOYA, L. "*Bóvedas tabicadas*" (1947)
- ORDUÑA, A.; ROEDER, G.; PEÑA F. "*Evaluación sísmica de construcciones históricas de mampostería: comparación de tres modelos de análisis*" Revista de Ingeniería Sísmica Nº 77, pp. 71-88 (2007)
- OCHSENDORF, J. A.; HERNANDO, J. I.; HUERTA, S. "*Análisis a rotura de estribos de fábrica*" Revista de obras públicas. Nº 3.439, pp. 27-42 (Diciembre 2003)
- REDONDO, E. "*La bóveda tabicada en España en el siglo XIX: La transformación de un sistema constructivo*" Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. (2013)
- TRUÑÓ, A. "*Construcción de bóvedas tabicadas*" (2004)
- ZARAGOZÁ, A.; SOLER, R.; MARÍN, R. "*Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio internacional sobre bóvedas tabicadas*". (2011).

Fuentes

- <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/> (20016)
- <https://arquiterrassa.wordpress.com/2016/04/11/sociedad-general-de-eletricidad/> (2016)
- <https://art.nouveau.world/ex-sociedad-general-de-electricidad> (2017)
- <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/terminal-municipal-de-omnibus/> (2017)
- http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/terminal-municipal-de-omnibus/?utm_medium=website&utm_source=plataformaarquitectura.cl (2017)

Relación de figuras

Fig 1 | Portada. Cubierta Fábrica Aymerich, Amat i Jover

Fuente: https://visitmuseum.gencat.cat/media/cache/700x400/uploads/objects/photos/5a65d674c766a_14-coberta-de-ledifici.jpeg

Fig 2 | Bóvedas tabicadas, Luis Moya

Fuente: <https://bovedastabicas.wordpress.com/la-boveda-tabicada/>

Fig 3 | Portada de "Arte y Vso de la Architectvra"

Fuente: https://image.isu.pub/100202005308-92ed50c0a02349cddb7f02f73adeb374/jpg/page_1_thumb_large.jpg

Fig 4 | Dibujo de la Sala de Telares de la Fábrica Batlló.

Fuente: <http://rutaguastavino.vilassardedalt.cat/pagines/p01.html>

Fig 5 | Sala de Telares de la Fábrica Batlló.

Fuente: http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Guastavino%20Moreno,%20Rafael.xml

Fig 6 | Sociedad General de Electricidad

Fuente: <https://www.espaisrecobrats.cat/sociedad-general-de-electricidad-restaurant-viena/>

Fig 7 | Interior de la Sociedad General de Electricidad

Fuente: <https://www.espaisrecobrats.cat/sociedad-general-de-electricidad-restaurant-viena/>

Fig 8 | Interior actual de las Escuelas Provisionales.

Fuente: <https://blog.sagradafamilia.org/es/divulgacion/las-escuelas-de-la-sagrada-familia/>

Fig 9 | Interior original de las Escuelas Provisionales.

Fuente: <https://blog.sagradafamilia.org/es/divulgacion/las-escuelas-de-la-sagrada-familia/>

Fig 10 | Cubierta actual de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Familia.

Fuente: <https://blog.sagradafamilia.org/es/divulgacion/las-escuelas-de-la-sagrada-familia/>

Fig 11 | Croquis de La cubierta realizada por Le Corbusier.

Fuente: <http://jaumeprat.com/turismo-de-calidad/>

Fig 12 | Terminal de Ómnibus de Salto.

Fuente: http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/terminal-municipal-de-omnibus/?utm_medium=website&utm_source=plataformaarquitectura.cl

Fig 13 | Terminal de Ómnibus de Salto.

Fuente: http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/terminal-municipal-de-omnibus/?utm_medium=website&utm_source=plataformaarquitectura.cl

Fig 14 | Panteón funerario para la familia Soriano Manzanet.

Fuente: https://resarquitectura.blogs.upv.es/?page_id=157

Fig 15 | Panteón funerario para la familia Soriano Manzanet.

Fuente: https://resarquitectura.blogs.upv.es/?page_id=157

Fig 16 | Equilibrio elemental de la dovela.

Fuente: Elaboración propia

Fig 17 | Línea de empujes.

Fuente: Evaluación de estructuras abovedadas. Adolfo Alonso Durá y Verónica Llopis Pulido.

Fig 18 | Análisis límite de una bóveda gótica por el método de los cortes.

Fuente: Heyman, 1995

Fig 19 | Sentidos positivos de las solicitaciones de las láminas.

Fuente: Adolfo Alonso Durá

Fig 20 | Fábrica Aymerich, Amat i Jover a principios del siglo XX.

Fuente: <https://www.espaisrecobrats.cat/vapor-aymerich-amat-i-jover-museu-nacional-de-la-ciencia-i-de-la-tecnica-de-catalunya/>

Fig 21 | Fábrica Aymerich, Amat i Jover a principios del siglo XX.

Fuente: <https://arquiterrassa.wordpress.com/2014/10/05/vapor-aymerich-amat-y-jover/#jp-carousel-324>

Fig 22 | Sección longitudinal de la Nave.

Fuente: Estudio profesional Margarit i Buxandé

Fig 23 | Detalles constructivos originales.

Fuente: Extracto del proyecto de ejecución de las obras de adecuación de la Fábrica Aymerich, Amat y Jover, como sede del Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña. Estudio profesional Margarit i Buxadé.

Fig 24 | Planta y sección longitudinal de la fábrica.

Fuente: Elaboración propia a partir de la documentación proporcionada por el estudio 2BMFG ARQUITECTES, encargados de realizar la restauración de la fábrica entre 1986 y 1996.

Fig 25 | Detalle en sección longitudinal.

Fuente: Elaboración propia a partir de la documentación proporcionada por el estudio 2BMFG ARQUITECTES, encargados de realizar la restauración de la fábrica entre 1986 y 1996.

Fig 26 | Detalle en sección transversal.

Fuente: Elaboración propia a partir de la documentación proporcionada por el estudio 2BMFG ARQUITECTES, encargados de realizar la restauración de la fábrica entre 1986 y 1996.

Fig 27 | Proceso de ejecución de la introducción de tubos de PVC en los soportes huecos.

Fuente: Estudio 2BMFG ARQUITECTES

FIG 28 | Detalle en sección longitudinal de la viga.

Fuente: Elaboración propia a partir de la documentación proporcionada por el estudio 2BMFG ARQUITECTES, encargados de realizar la restauración de la fábrica entre 1986 y 1996.

Fig 29 | Planta y sección longitudinal de la fábrica indicando el pórtico donde se encuentra la viga.

Fuente: Elaboración propia

Fig 30 | Fábrica Aymerich, Amat i Jover a principios del siglo XX.

Fuente: <https://www.flickr.com/photos/jmtp/3607135327/>

Fig 31 | Axonometría indicando el área de bóveda que recae sobre los arcos.

Fuente: Elaboración propia

Fig 32 | Sección indicando los cortes para sacar el peso de la bóveda.

Fuente: elaboración propia.

Fig 33 | Esfuerzos en tramo A de la bóveda. Elaboración propia.

Fig 34 | Esfuerzos en tramo B de la bóveda.

Fuente: Elaboración propia.

Fig 35 | Esfuerzos en tramo C de la bóveda.

Fuente: Elaboración propia.

Fig 36 | Esfuerzos en tramo D de la bóveda.

Fuente: Elaboración propia.

Fig 37 | Peso de la bóveda sobre el muro.

Fuente: Elaboración propia.

Fig 38 | Pesos unitarios por dovelas y total.

Fuente: Elaboración propia.

Fig 39 | Primer tanteo de la línea de empuje

Fuente: Elaboración propia.

Fig 40 | Líneas de empuje.

Fuente: Elaboración propia.

Fig 41 | Pesos unitarios por dovelas y total.

Fuente: Elaboración propia.

Fig 42 | Planta de la fábrica indicando el ámbito del estudio estructural.

Fuente: Elaboración propia.

Fig 43 | Planta y sección de la fábrica del ámbito de estudio estructural.
Fuente: Elaboración propia.

Fig 44 | Axonometría del levantamiento de la fábrica.
Fuente: Elaboración propia.

Fig 45 | Axonometría del levantamiento dividido por elementos de la fábrica.
Fuente: elaboración propia

Fig 46 | Valores característicos de las sobrecargas de uso.
Fuente: CTE DB SE-AE

Fig 47 | Paseo por las bóvedas organizado por el mNACTEC
Fuente: <https://mnactec.cat/es/actividad-detalle/fiestamayor-paseo-por-las-bovedas>

Fig 48 | Planta indicando los pórticos transitables de uso público.
Fuente: Elaboración propia.

Fig 49 | Mapa clasificación de zonas según la presión dinámica del viento.
Fuente: https://calculocivil.com/sites/default/files/imagenes/_espana/cte/viento/zonas_viento.gif

Fig 50 | Parámetros sísmicos del espectro elástico de diseño.
Fuente: Elaboración propia, programa ANGLE

Fig 51 | Hipótesis establecidas.
Fuente: Elaboración propia, programa ANGLE

Fig 52 | Deformada del modelo de daño.
Fuente: Elaboración propia

Fig 53 | Índice de daño de las bóvedas
Fuente: Elaboración propia

Fig 53 | Imagen hiperrealista del "Droneport". Norman Foster Foundation.
Fuente: <https://www.normanfosterfoundation.org/es/project/droneport/>

