



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Optimización de la estructura de la cubierta de un edificio  
de grandes luces resuelta con mallas espaciales de acero

Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

AUTOR/A: Ranchal Cabo, Juan Carlos

Tutor/a: Pérez García, Agustín José

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



# OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA CUBIERTA DE UN EDIFICIO DE GRANDES LUCES RESUELTA CON MALLAS ESPACIALES DE ACERO

Centro de Eventos

Feria de Muestras de Valencia

JUAN CARLOS RANCHAL CABO

Tutor: Agustín Pérez García

Trabajo Final de Grado

Curso 2023/2024

ETSAV

Grado en Fundamentos de la Arquitectura



# 0.RESUMEN. RESUM. ABSTRACT

## Resumen

El objetivo de este trabajo es realizar el estudio de una estructura de acero ya construida tratando de encontrar configuraciones que, sin mermar la singularidad y funcionalidad de la estructura, tengan un menor coste en términos económicos y medioambientales. La estructura a optimizar es la malla espacial monocapa de la cubierta del Centro de Eventos ubicado en el Foro Sur de la Feria de Muestras de Valencia.

En la primera parte de este trabajo se contextualiza el edificio y su estructura, exponiendo como surge la Feria de Valencia y, en concreto, el Centro de Eventos y su singular cubierta. En segundo lugar, se ha elaborado un modelo informático de su estructura y su comportamiento se ha analizado con el programa Architrave. Posteriormente, se ha utilizado el programa de optimización metaheurística VTAM para realizar la búsqueda de configuraciones estructurales que tuvieran un coste y una huella de carbono menores que la estructura original. Finalmente, se ha realizado un análisis comparado de estas alternativas que ha permitido alcanzar conclusiones aplicables al diseño de este tipo de estructuras de acero.

Palabras clave: Malla triangulada, elipsoide, feria, cúpula

## Resum

L'objectiu d'aquest treball és dur a terme l'estudi d'una estructura d'acer ja construïda tractant de trobar configuracions que, sense minvar la singularitat i funcionalitat de l'estructura, tinguen un menor cost en termes econòmics i mediambientals. L'estructura a optimitzar és la malla espacial monocapa de la coberta del Centre d'Esdeveniments situat al Fòrum Sud de la Fira de Mostres de València.

En la primera part d'aquest treball es contextualitza l'edifici i la seua estructura, exposant com sorgeix la Fira de València i, concretament, el Centre d'Esdeveniments i la seua singular coberta. En segon lloc, s'ha elaborat un model informàtic de la seua estructura i el seu comportament s'ha analitzat amb el programa Architrave. Posteriorment, s'ha utilitzat el programa d'optimització metaheurística VTAM per a realitzar la recerca de configuracions estructurals que tingueren un cost i una empremta de carboni menors que l'estructura construïda inicialment. Finalment, s'ha realitzat una anàlisi comparada d'aquestes alternatives que ha permès arribar a conclusions aplicables al disseny de aquest tipus d'estructures d'acer.

Paraules clau: Malla triangulada, el-leipsòide, fira, cúpula

## Abstract

The objective of this work is to carry out the study of an already constructed steel structure, trying to find configurations that, without compromising the singularity and functionality of the structure, have a lower cost in economic and environmental

terms. The structure to be optimized is the single-layer spatial mesh of the roof of the Events Center located in the South Forum of the Valencia Trade Fair.

In the first part of this work, the building and its structure are contextualized, explaining how the Valencia Trade Fair and, specifically, the Events Center and its unique roof, came into existence. Secondly, a computer model of its structure has been developed, and its behavior has been analyzed using the Architrave program. Subsequently, the metaheuristic optimization program VTAM has been used to search for structural configurations that have lower costs and carbon footprints than the structure built originally. Finally, a comparative analysis of these alternatives has been conducted, leading to conclusions applicable to the design of this type of steel structures.

Keywords: Triangulated mesh, ellipsoid, fair, dome

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre, por enseñarme a perseverar

A mi padre, por introducirme en el mundo de la arquitectura

A Lluch, por ser una fuente de apoyo incondicional

A mi abuelo, por apasionarme por el conocimiento

A Agustín, por su labor de revisión y de guía en este trabajo

# ÍNDICE

0.	RESUMEN. RESUM. ABSTRACT .....	2
1.	OBJETIVOS DEL TRABAJO. ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA.....	6
2.	RELACIÓN CON LOS ODS .....	8
3.	LA FERIA VALENCIA Y SUS ANTECEDENTES .....	10
4.	EL FORO SUR [3] .....	16
5.	LA MALLA TRIDIMENSIONAL.....	24
6.	MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA .....	32
7.	PROPUESTA DE MEJORA DE LA CUBIERTA EXISTENTE .....	56
8.	PROCESO DE OPTIMIZACIÓN .....	58
9.	COMPARACIÓN CON LA ESTRUCTURA ORIGINAL.....	98
10.	CONCLUSIONES .....	100
11.	REFERENCIAS .....	102
12.	ÍNDICE DE IMÁGENES .....	104

# 1. OBJETIVOS DEL TRABAJO. ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA

## OBJETIVOS

El trabajo cuenta con un objetivo principal, la reducción del peso de la estructura de estudio reduciendo la cantidad de material y por lo tanto el peso de acero utilizado, abaratando el coste de ejecución de esta. La optimización se centrará en el tipo de perfiles usados, así como la composición de fachada de la estructura, debido a que la complejidad de la geometría no admite su modificación.

Para acometer este objetivo se emplearán 3 programas. En AutoCAD se realizará el modelo original y los posteriores modelos alternativos de la estructura mediante líneas y elementos finitos. En Architrave [1] se realizará el asignado de cargas y de secciones de las barras, así como la comprobación estática de la estructura inicial. Por último, en la web VTAM [2], se introducirán los modelos alternativos en una primera optimización para seleccionar el que menor peso presente entre todos los candidatos. Además, se estudiará el empleo de diferentes tipos de materiales en un segundo proceso de optimización y el coste que esto supondría. El modelo considerado como óptimo será el que presente un menor peso y una mayor rentabilidad económica.

## ANTECEDENTES

El trabajo estudia la cúpula del Centro de Eventos [3], situado en el Foro Sur del complejo ferial de la Feria de Muestras de Valencia. El edificio fue diseñado por el estudio de arquitectura de Jose María Tomás Llavador, fue proyectado en 2004 y calculada por la empresa Mero TSK. La cubierta está formada por barras de acero rectangulares unidas formando una malla espacial monocapa triangulada, que construye la forma de un elipsoide deformado. El elipsoide se corta para dar forma a una fachada con tipología de muro cortina, donde se encuentra el acceso al edificio.

Para la realización del trabajo se considerará la geometría de la malla triangulada como inalterable, variando la modulación de montantes y travesaños de la fachada, el tipo de perfil asignado a las barras, la clase de acero utilizada y la agrupación de las familias de barras.

## METODOLOGÍA

El trabajo comienza exponiendo los antecedentes de la Feria de Muestras de Valencia, como surgió y como ha llegado a ser la institución que es hoy en día. Posteriormente se expone el edificio que alberga la cubierta de estudio para luego centrarse en la propia malla de la cubierta, analizando sus componentes y construcción.

En segundo lugar, se procede a realizar el modelo de la estructura mediante AutoCAD y Architrave. Simultáneamente se calcularán las acciones que afectan a la estructura, generando así el modelo completo de la estructura.

Posteriormente se realiza el proceso de optimización de la estructura mediante la web VTAM, planteando varios modelos de la estructura con variaciones entre ellos cambiando la asignación de familias, la modulación de fachada o el tipo de sección de

las barras. Se observará que modelo presenta menor peso para posteriormente someterlo a más procesos. Los últimos procesos conllevarán el estudio de las diferentes clases de acero, permitiendo además un movimiento de los nudos más permisivo que en el proceso de optimización anterior. Para seleccionar el modelo final se tendrá en cuenta, además del peso de la cúpula, el precio que suponga su ejecución usando la base de datos de construcción del Instituto Valenciano de la Edificación [4]. El modelo seleccionado se comparará con la estructura inicial para observar la mejoría alcanzada.



## 2. RELACIÓN CON LOS ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible [5] son una iniciativa promovida por las Organización de las Naciones Unidas que busca mejorar la calidad de vida del ser humano protegiendo el medio ambiente y la relación con el mismo. En 2015 se aprobaron 17 objetivos que pretenden cumplirse para 2030.

El objetivo del trabajo que se va a realizar encuentra estrecha relación con varios de ellos:



Figura 2-1. ODS 1.

La optimización de estructuras permite obtener, para las mismas cargas, una respuesta estructural donde se minimiza el material necesario para soportar las acciones. Esto permite un mayor ahorro económico a la hora de ejecutar el proyecto, haciéndolo accesible a economías más ajustadas.



Figura 2-2. ODS 3.

Usar menos material conlleva una menor emisión de residuos y de gases contaminantes, evitando así un empeoramiento de la salud pública y medioambiental.



Figura 2-3. ODS 8.

El proceso de optimización estructural puede ser implementado en el mundo de la construcción, permitiendo así una mejor gestión del capital financiero de las empresas y generando puestos de trabajo especializado en este campo.



Figura 2-4. ODS 9.

La optimización estructural usa métodos matemáticos que pueden ser aplicados a muchos niveles, desde el campo de las estructuras hasta campos como la logística, siendo una gran herramienta para la innovación en el sector industrial.



Figura 2-5. ODS 11.

Usar una menor cantidad de material permite una menor emisión de residuos y, por lo tanto, una menor emisión de contaminación, dando lugar a ciudades más limpias y respetuosas con el medio ambiente.



Figura 2-6. ODS 12.

El objetivo de la optimización de las estructuras es lograr resistir unas acciones empleando la menor cantidad de material posible. Reducir la cantidad de material permite aprovechar mejor el material con el que se construye y hacer la construcción más barata.



La construcción es una de las industrias que más gases contaminantes emiten a la atmósfera, en concreto la siderúrgica es responsable de la producción del 25% de las emisiones industriales mundiales de CO<sub>2</sub>. Usar una cantidad de material optimizada permite tener que fabricar una menor cantidad de perfiles y emitir menos gases nocivos a la atmósfera.

Figura 2-7. ODS 13.



Una mala gestión de residuos es nociva para las especies animales y vegetales ya que destruye sus ecosistemas. La optimización estructural genera menos residuos gracias a la reducción del peso de acero usado, intentando reducir la pérdida de biodiversidad en los ecosistemas.

Figura 2-8. ODS 15.

### 3. LA FERIA VALENCIA Y SUS ANTECEDENTES

#### LA SOCIEDAD ECONÓMICA DE AMIGOS DEL PAIS [6]



Figura 3-1. Cartel de la Exposición Regional de 1867.

Corre el año 1776 cuando, reunidos Pedro José Mayoral, Juan del Vao, Sebastián de Saavedra, el Marqués de León, el Marqués de Mascarell, Francisco de Lago y Francisco Pérez Mesía deciden formar la Real Sociedad Económica de Amigos del País en Valencia.

El objetivo de tal sociedad era promover la innovación y el progreso de la industria, las artes y la agricultura. Para lograr este fin los miembros de la sociedad se reunían periódicamente para comentar sus ideas y se dividieron en 7 campos diferentes. Economía, Agricultura, Artes y Oficios, Escuelas patrióticas, Fábricas y Manufacturas, Comercio, y Navegación. Además, también se interesaron por el comercio de la seda.

Además, a medida que entra el siglo XIX, va ganando terreno un concepto de feria diferente a la típica feria medieval. Se trata de una feria donde el objetivo principal no es la venta de productos, si no la publicidad y divulgación de nuevos avances. El nuevo objetivo de las ferias era dar a conocer los productos al público, generando así nuevas oportunidades de mercado. Este tipo de ferias, serán aprovechadas por la Real Sociedad Económica de Amigos del País, que las utiliza como un medio para lograr su objetivo de promover el progreso y la innovación en la industria.

Promovidas por la RSEAP se realizarán exposiciones donde se permitirá a las empresas mostrar sus avances y sus productos que respondan a las necesidades de la población. Las ferias que más repercusión tuvieron fueron la Feria de productos artísticos, agrícola e industriales de 1867; la feria de Máquinas y Motores en 1880; y la feria de Agricultura, Industria y Artes de 1883.

#### LA EXPOSICIÓN REGIONAL ARTÍSTICA, AGRÍCOLA E INDUSTRIAL DE 1867 [6]

Esta feria se considera la primera exposición regional de Valencia. En ella, se mostraron al público productos para la mejora de la agricultura, la industria, el comercio y las artes. Este muestrario se ubicará en el convento de san Juan de Ribera, próximo al Paseo de la Alameda.

Se presentaron más de mil expositores y muchos de ellos fueron premiados por sus productos e innovaciones. El éxito de esta feria será la chispa de lo que

posteriormente dará a conocer las ferias futuras y lo que desembocará en la creación de la Feria Valencia en 1917. El cartel publicitario de la exposición se muestra en la Figura 3-1. Cartel de la Exposición Regional de 1867.

## LA FERIA NACIONAL VALENCIANA [6]



Figura 3-2. Fotografía de la Feria Nacional Valenciana. [7]

Tras el éxito que tuvieron las diversas celebradas en Valencia hasta 1883, sumado al éxito de otras exposiciones de ámbito regional en el resto del territorio nacional como la exposición de Madrid de Industrias y Agricultura y exposición de Sitios de Zaragoza, comenzó a nacer la idea de realizar una nueva gran feria regional que atrajera una gran cantidad de público y a la cual mostrar los nuevos avances realizados desde entonces.

Será Tomás Trénor, al tomar la presidencia del Ateneo Mercantil quien será el encargado de crear la esperada Exposición. Una vez aprobada y formada la comisión ejecutiva comienzan a desarrollarse los trabajos previos a la realización de la exposición, además la feria fue publicitada en los periódicos y se encargaron carteles para anunciarla en diferentes lugares públicos y establecimientos (Figura 3-3). Para esta exposición se elegirá un solar próximo a la Alameda, el cuartel de infantería y la antigua fábrica de tabacos, actual edificio de tabacalera (Figura 3-2) [7]. La feria fue inaugurada el 22 de mayo de 1909 celebrando espectáculos de fuegos artificiales, conciertos y diversos concursos aparte de la propia exposición.

La Feria, en un inicio de alcance regional registró una participación de más de 2500 expositores, estableciendo 18 secciones diferentes agrupadas por temática; también se registró una grandísima afluencia de visitantes, llegando a superarse las 30.000 personas en un solo día. Quedó clausurada el 9 de enero de 1910 pero dejó tras de sí un gran déficit presupuestario, lo que supuso que se propusiera su prórroga hasta que finalizara el año y su promoviera como feria de ámbito nacional (Figura 3-4). Esta prórroga fue muy bien acogida tanto por el público como por los empresarios, presentándose más de mil exponentes. El 12 de noviembre quedó clausurada, habiendo logrado reducir el déficit en gran medida.



Figura 3-3. Cartel publicitario de la Exposición Regional Valenciana de 1909.



Figura 3-4. Cartel publicitario de la Exposición Nacional Valenciana de 1910.

## LA FERIA MUESTRARIO INTERNACIONAL DE VALENCIA [6]

Todos los antecedentes que se han comentado formaron el caldo de cultivo del cual surgiría la actual Feria Valencia. Las exposiciones realizadas por la Real Sociedad Económica de Amigos del País y la feria regional y nacional de 1910 fueron las encargadas de romper el hielo y abrir las ferias expositivas de Valencia al resto del país y el resto del mundo. José Grollo Chinarrí, presidente de la Unión Gremial, será el encargado de iniciar el proceso del cual nacería la Feria de Muestras de Valencia, siendo apoyado por el ayuntamiento de Valencia. El objetivo de la institución era la puesta en valor de los productos de la región.

La primera exposición se inaugura el 10 de mayo de 1917, convirtiéndose en la primera feria de muestras de España. A falta de local propio, se instala en la entrada de la Estación del Norte (Figura 3-5) aún no en funcionamiento y otra parte de la exposición se emplaza en el Colegio Imperial de los niños de San Vicente Ferrer. 142 firmas se presentaron de las cuales 4 eran extranjeras.

En 1921 se le otorga el título de Feria Oficial y se le permite construir su propio emplazamiento en el Paseo de la Alameda (Figura 3-6), el edificio del Palacio Ferial. Este año se presentan 250 expositores, siendo 50 de ellos extranjeros. Cada vez la



Figura 3-5. Una de las salas de la Feria Muestrario en la Estación del Norte en 1917. Foto de Gómez Durán



Figura 3-6. La Feria Muestrario en su antiguo emplazamiento en la Alameda.

feria iba recibiendo más y más expositores y visitantes. En 1923 recibió casi 100 mil visitantes reuniendo 600 ponentes, siendo 88 extranjeros. En 1925 se le otorga a Feria Valencia el rango de Feria Internacional, uniéndose al grupo formado ya por Francia, Alemania o Italia.

En 1923, la institución ferial se convierte en la primera asociación española admitida en la UFI, la Unión de Ferias Internacionales. Este año, en la exposición realizada acudieron 457 exponentes, 153 de ellos extranjeros.

En 1936 comienza la Guerra Civil y se paralizan las exposiciones de Feria Valencia. No será hasta el 1942 cuando se reanuden, siendo esta vez bajo la presidencia de Ramón Gordillo Carranza. Con el paso

de los años se suceden las exposiciones con un número de visitantes y expositores cada vez más grande, también se observa como ciertos sectores iban ganando más popularidad frente al resto, por lo que se opta por organizar exposiciones monográficas, centradas en un producto más especializado, inaugurándose la Feria del Mueble o la Feria del Juguete y Artículos para la Infancia.

Cabe destacar la relación establecida entre la Real Sociedad Económica de Amigos del País y la institución ferial valenciana. Han realizado actos conmemorativos con motivo del 75 aniversario de la Feria y con motivo de los 225 años desde la fundación de la RSEAP.

En 1969 la Feria Valencia sufre un cambio radical. El Palacio Ferial se iba quedando pequeño para albergar los muestrarios que cada vez acogían a más público y cada vez se hacía más evidente la necesidad de un lugar nuevo donde albergar las ferias a partir de entonces. Por este motivo el Ayuntamiento de Valencia adquiere un solar, entre Benimàmet y Paterna, de 200.000 m<sup>2</sup>, que posteriormente serán ampliados en 180.000 m<sup>2</sup> más de los cuales se edifican 115.000 m<sup>2</sup> con el objeto de albergar el nuevo Palacio Ferial de Feria Valencia (Figura 3-7). Estas instalaciones han estado en constante renovación y ampliación destacando el proyecto de 2000-2006, a cargo de José María Tomás Llavador [8], en el cual se les confieren a las instalaciones una modernidad propia para una feria de carácter internacional.



*Figura 3-7. Actual emplazamiento de la Feria de Muestras Internacional de Valencia.*

En la actualidad, las instalaciones albergan una superficie superior a los 230.000 m<sup>2</sup> [9] con pabellones capaces de albergar ferias, conciertos, eventos y muestrarios con un público de 20.000 personas. Las instalaciones se dividen en 3 grandes conjuntos de pabellones: el Foro Centro, el Foro Norte y el Centro de Eventos o Foro Sur [10] unidos entre ellos mediante espacios abiertos al aire libre donde encontramos jardines, fuentes, arbolado, etc.

El Foro Centro está formado por los pabellones 1, 2, 3 y 4, divididos en 2 niveles y contando cada pabellón con 12.000 m<sup>2</sup> de exposición por nivel. Los pabellones, de forma cuadrada se articulan gracias a dos calles perpendiculares que tienen función de distribuidor, permitiendo el acceso a los pabellones. Frente a estas calles se encuentra un gran edificio de fachada acristalada que realiza la función de entrada, acogiendo a los visitantes a su llegada al Foro Centro y dirigiéndolos hacia las galerías.

El Foro Norte lo forman 3 pabellones, el 6, el 7 y el 8. Los volúmenes se articulan en dos grandes volúmenes que corresponden al pabellón 6 y 7 y uno más pequeño que corresponde al pabellón 8. Los espacios expositivos son accesibles gracias a una fachada plana acristalada situada próxima a la parada de tranvía. Los volúmenes construidos albergan un espacio vacío entre ellos donde se alzan edificios de oficinas y un salón de actos. El foro norte alberga una superficie de 78.000 m<sup>2</sup>.

El Centro de Eventos o Foro Sur (Figura 3-8) es el último volumen construido y posee una superficie de 15.000 m<sup>2</sup>. Lo que más llama la atención de este edificio es una gran cúpula de cristal soportada por una estructura espacial de barras de acero. Este volumen alberga salas de conferencia, cafeterías y oficinas divididas en 3 niveles. Además, está comunicado con un pabellón subterráneo donde se pueden realizar galas y diversas exposiciones que tiene capacidad para 12.000 personas. La cubierta de este edificio será el caso de estudio de este trabajo.



*Figura 3-8. Fachada Sureste del Centro de Eventos.*



## 4. EL FORO SUR [3]

El Centro de Eventos de la Feria de Muestras de Valencia es el edificio objeto de estudio de este trabajo. Realizado por el estudio de arquitectura de Tomás Llavador es una de las últimas adiciones al complejo ferial realizada entre 2004-2007. El edificio se encuentra situado entre el Foro Centro y el Palau Velódromo Luis Puig.



Figura 4-1. Retrato de José María Tomás Llavador.

José María Tomás Llavador (Figura 4-1) [8] es Doctor Arquitecto por la Universidad Politécnica de Valencia “Cum Laude” y docente de la Universidad en la asignatura de Urbanismo. Es el presidente del estudio Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros. Ha sido ponente en diversos congresos internacionales por todo el mundo y pertenece al Royal Institute of British Architects y a la Sociedad Colombiana de Arquitectos de Antioquía. Ha proyectado puertos comerciales en Izmir y Mersin en Turquía. También ha proyectado la Piazza della Visitazione en Matera, Italia, y además ha dirigido la reforma de la nueva Plaza de la Reina. También ha diseñado varios recintos feriales como el Centro Internacional de Ferias y Convenciones de San Salvador (CIFCO) y el Masterplan y ampliación de Feria Valencia y de la IFA de Alicante.



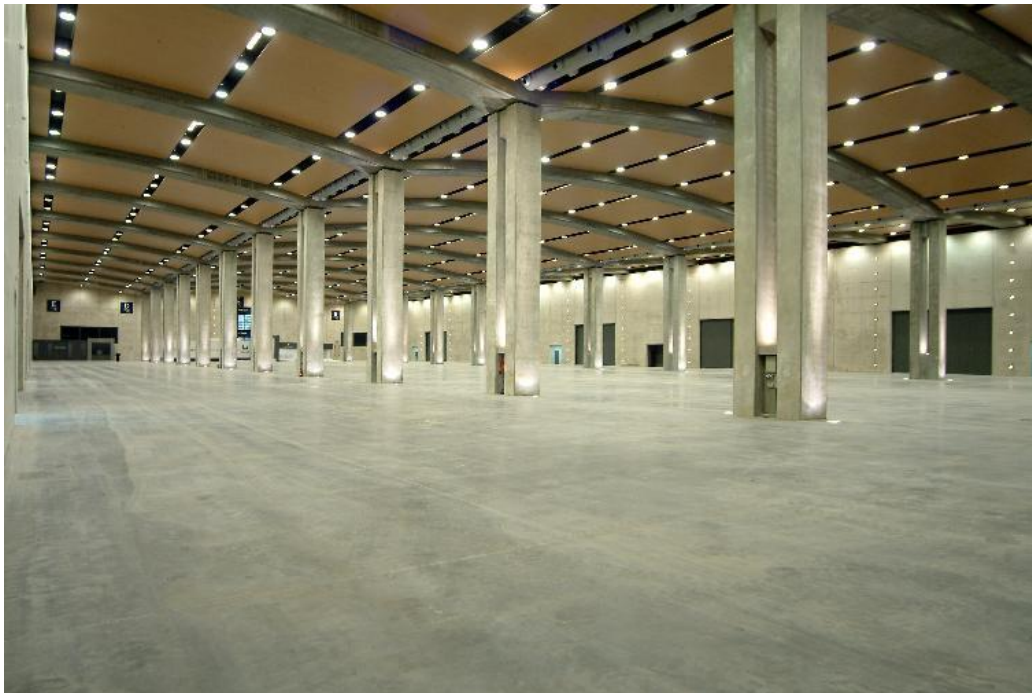
Figura 4-2. Organización de los foros de la Feria de Muestras de Valencia

El Centro de Eventos y su pabellón anexo, el Pabellón 5, se encuentran en el Foro Sur del complejo ferial de la Feria de Muestras de Valencia (Figura 4-2). El edificio nace de la necesidad de dotar al complejo ferial de unas instalaciones en las que realizar congresos, ya que el resto de los edificios del solar están destinados exclusivamente a realización de exposiciones tanto de ámbito nacional como internacional. La solución para este problema es proyectar una pareja de edificios

unidos con el objetivo principal de crear espacios donde poder realizar conferencias, y, además, crear espacios anexos con servicios auxiliares a los salones de actos.

El Foro Sur está formado por dos volúmenes principales que se unen gracias a un gran portón de 9x6 metros situado en la planta inferior. El primer volumen lo forma el pabellón 5, que se encuentra bajo rasante bajo una plaza que cuenta con estanques, bancos y elementos arbolados. Esta plaza da acceso al segundo volumen, que está construido sobre rasante. El segundo volumen lo forma el centro de eventos, uno de los edificios más emblemáticos del conjunto ferial gracias a la cúpula de vidrio con forma ovalada que cubre el vestíbulo principal.

El primero de los edificios está construido bajo rasante y es conocido como el Pabellón 5. Es una nave diáfana realizada con estructura de pilares de hormigón armado. El pabellón es anfitrión de un gran número de exposiciones, eventos y galas gracias a que cuenta con una superficie para exposiciones de 9.842 m<sup>2</sup> y también dispone de una cafetería. El acceso peatonal se realiza desde el nivel inferior del Centro de Eventos y el acceso de mercancías se realiza por vías de servicio situados en los laterales del pabellón que también cuenta con un aparcamiento. La estructura de este pabellón está formada por pórticos de pilares y vigas arqueadas de 36 metros de luz colocados cada 12 m (Figura 4-3). Los pilares se separan 15,55 m de los muros, dando lugar así a tres calles, una calle central muy ancha y dos laterales más reducidas. Los muros del pabellón presentan grandes huecos practicables que sirven para introducir mercancía en el pabellón y poder realizar el montaje de las exposiciones.



*Figura 4-3. Estructura del Pabellón 5*

El segundo volumen es el que le da una imagen característica al conjunto. Se le conoce como Centro de Eventos y es uno de los edificios más característicos del complejo ferial gracias a su cubierta tan característica. El acceso a este edificio se realiza mediante una plaza (Figura 4-4), que es la encargada de unir el Centro de Eventos con el Foro Centro. Este espacio al aire libre está repleto de estanques, bancos y jardines



*Figura 4-4. Fachada de acceso del Centro de Eventos.*

La función principal de este edificio es la de acoger salas de conferencias y oficinas para poder realizar congresos, simposios, etc. Además, alberga oficinas y un restaurante. Para ello alberga 2 auditorios, 2 salones de actos y 4 salas de conferencias para realizar eventos o ponencias. Además, cuenta con un gran número de salas de juntas y oficinas así mismo como de salas vip para los distintos expositores. En la planta de conexión con el Pabellón 5 también encontramos una cafetería. Se compone de cuatro niveles comunicados por una serie de escaleras (Figura 4-5) mecánicas albergadas en un gran hueco central, este hueco se encarga de unir todas las plantas mediante un espacio común. Este espacio libre a todas las plantas permite que la luz que entra por la cúpula acceda a los niveles inferiores del edificio haciendo menos necesario colocar iluminación artificial; por la noche, el efecto se revierte, esta vez es el propio edificio el cual emite luz, que atraviesa la cúpula para iluminar el cielo nocturno. Algo que llama la atención, sobre todo cuando se entra al edificio es la gran cantidad de calor que se acumula, sobre todo en invierno. Esto se debe a la gran cantidad de radiación solar que entra del exterior y que queda atrapada en el edificio por efecto invernadero. Debido a esto se decidió usar un vidrio aislante de control solar para reflejar más cantidad de luz solar y que entre menos radiación al edificio. Aun así, tal es la radiación que entra que se necesitan grandes equipos de aire acondicionado para regular la temperatura del interior.



Figura 4-5. Vista interior de la cubierta del Centro de Eventos y su núcleo de comunicación.

Respecto a los materiales que integran la constructividad de la pareja de edificios, los salones de actos y auditorios están realizados principalmente con madera, tanto en los paramentos como en los techos. En el resto del Centro de Eventos encontramos que se mantiene el hilo conductor de la madera para los paramentos que separan los diferentes espacios y el suelo se realiza con baldosa pulida. El pabellón 5, en cambio, se realiza principalmente con hormigón. El suelo del pabellón, la estructura y los cerramientos son realizados con hormigón armado, dando una estética fría al espacio cuando no está en uso. Pese a esto, cuando se realizan exposiciones, los suelos pueden cubrirse con diferentes materiales al igual que los muros, lo que hace que la estética del pabellón pueda cambiar si se necesita (Figura 4-6). Aun así, el material más característico del Foro Sur es el vidrio que forma la cubierta y la fachada principal.



Figura 4-6. El Pabellón 5 durante una gala.

A continuación, se muestran algunos planos del edificio (Figura 4-7, Figura 4-8, Figura 4-9, Figura 4-10) [11]:

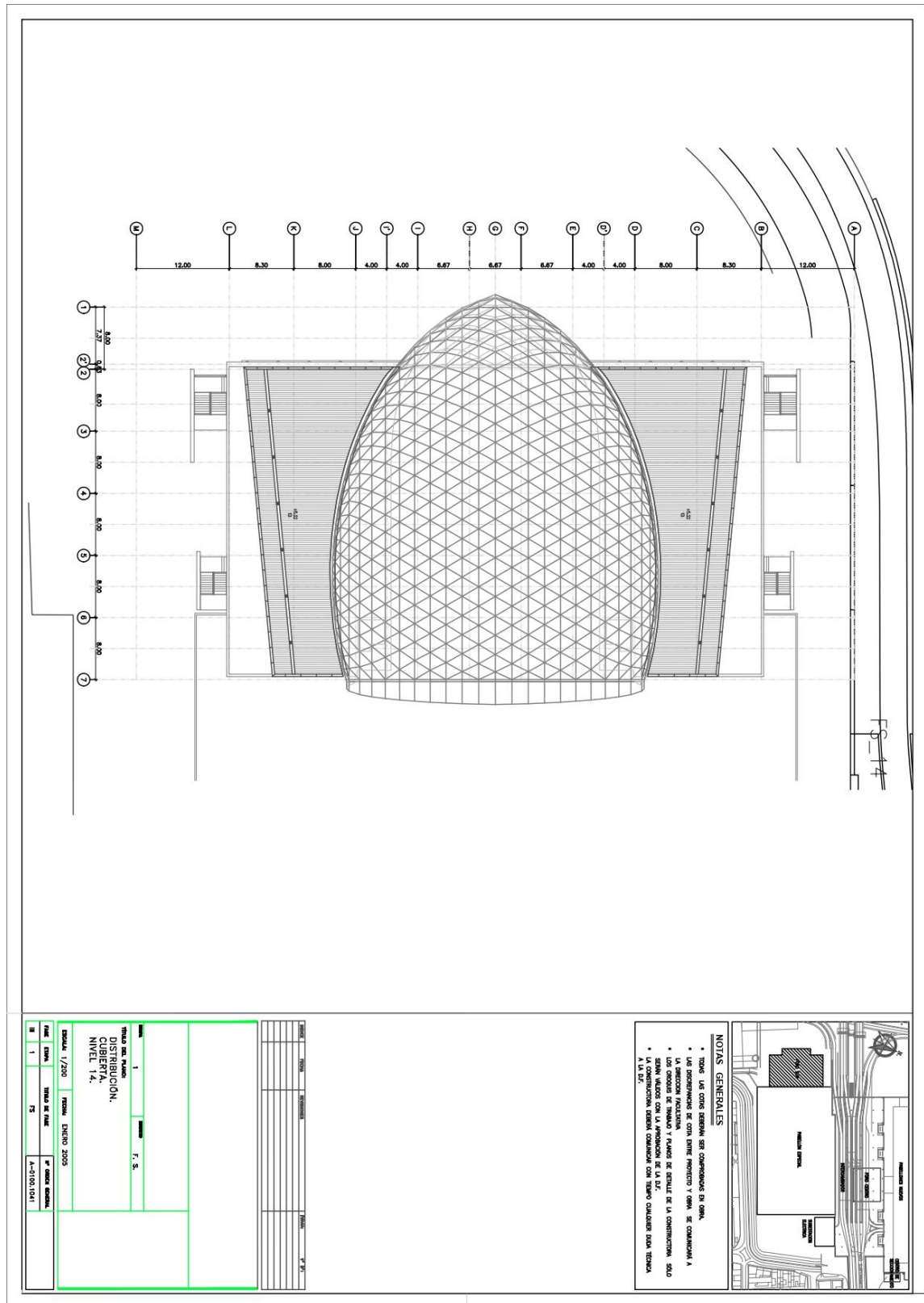


Figura 4-7. Planta de cubiertas del Centro de Eventos.

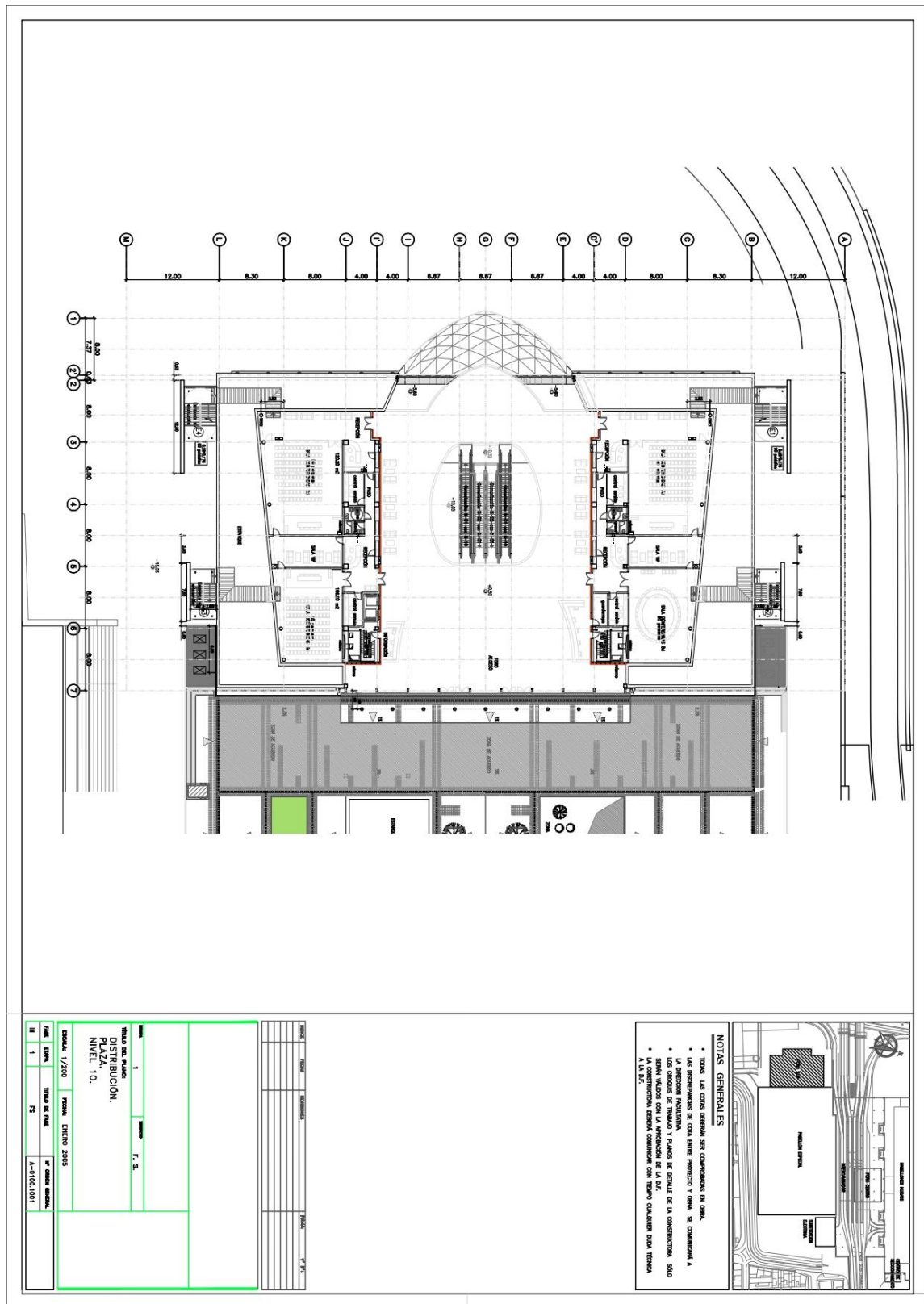


Figura 4-8. Planta de acceso al Centro de Eventos.



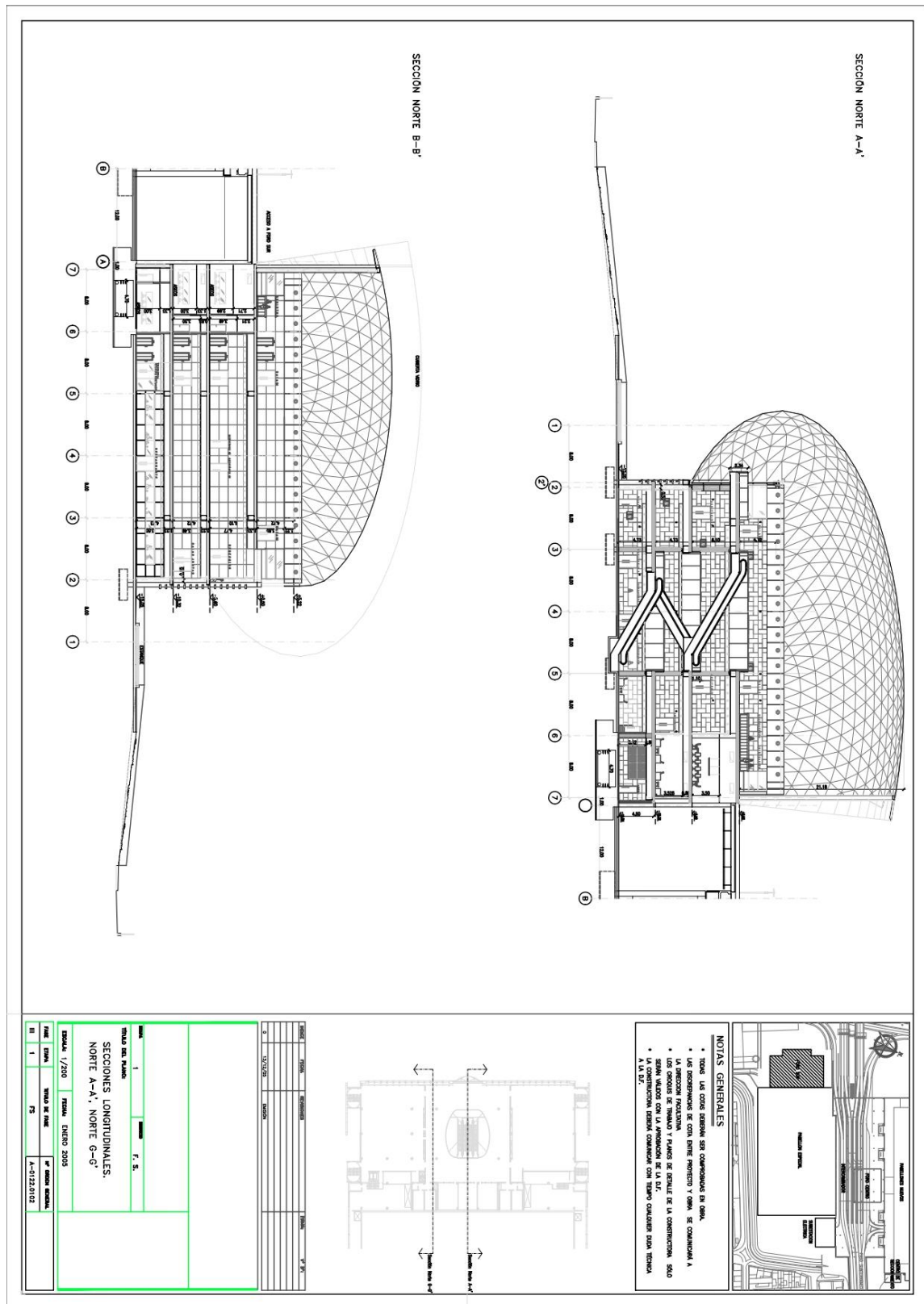


Figura 4-10. Secciones longitudinales del Centro de Eventos.



## 5. LA MALLA TRIDIMENSIONAL

El Centro de Eventos posee uno de los elementos constructivos más característicos de todo el complejo ferial: su cubierta. Se trata de una cubierta de vidrio con forma de elipsoide deformado sostenida por una malla triangulada de barras de acero. La cubierta es la que otorga al edificio la forma tan peculiar y lo convierte en un hito en su entorno. La tipología de la cubierta y como ha sido ejecutada recuerda a otros edificios similares como el International Trade Centre EUROVEA (Figura 5-2), de Vasko & Partner Ingenieure [12] o el EGO Roof Erbach, de Heusel & Schantz (Figura 5-1) [13].



*Figura 5-1. Malla espacial monocapa del EGO Roof Erbach.*



*Figura 5-2. Malla espacial monocapa del International Trade Centre EUROVEA.*

Cabe destacar que el Foro Sur que vemos hoy en día no fue el foro sur inicialmente ideado por el equipo de arquitectos de José María Tomás Llavador. La primera idea de proyecto presentaba una cúpula más baja y con revestimiento opaco a excepción de uno de sus extremos que sí se remataba en cristal. Además, la base de la que parte la cubierta era mucho más alta que hoy en día. La segunda versión presentaba una cúpula más parecida a la actual (Figura 5-3). La diferencia entre ambas es que esta era más achatada y con la estructura basada en cuadrados. La

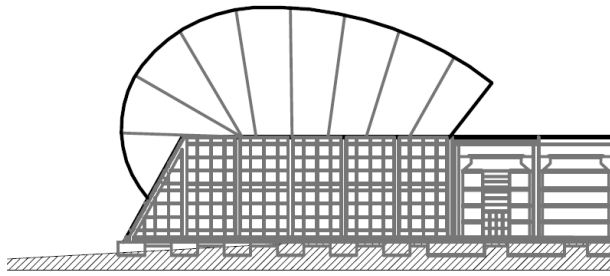


Figura 5-3. Boceto del estado anterior de la cúpula.

cubierta se sostenía gracias a una celosía tridimensional de barras de acero que generaban la forma y sostenían los paneles de la cubierta. La cúpula cubría un espacio de 35 metros de ancho y 48 de largo. Se trataba de una cúpula de doble piel donde la cara exterior estaba compuesta por los paneles de vidrio y la cara interior compuesta por la malla

tridimensional en celosía de la cubierta. Posteriormente el proyecto

se modificó para llegar a la cúpula que tenemos hoy en día, una simplificación de la estructura inicial con menor número de barras y menor cantidad de acero, generando un elipsoide simétrico ligeramente deformado en su eje de simetría dándole forma ligeramente apuntada en la cumbre [11].

La estructura del edificio fue diseñada por el estudio MC2 y la cubierta por la empresa Mero TSK. El sistema estructural de la cúpula de vidrio se compone de barras rectangulares de acero unidas mediante nudos con forma de disco. Las barras de acero se unen formando triángulos de diferentes dimensiones sobre los cuales se asientan los paneles de vidrio mediante unos discos de apoyo, resultando en una superficie de 1.720 m<sup>2</sup> de vidrio que cubre un espacio de 50 x 42 metros (Figura 5-4). El módulo básico que estructura la cubierta es el de un triángulo equilátero de vidrio. Aun así, debido a la forma característica de la superficie de la cubierta el módulo se modifica y se varía su dimensión para poder permitir una buena transmisión de los esfuerzos. Las barras usadas en la cubierta son de perfil hueco rectangular. Este tipo de barras, orientadas con el lado largo perpendicular al panel de vidrio, permiten una correcta absorción de las cargas que transmiten los paneles de vidrio. Los perfiles son de la serie PHR UNE lc 140 x 70 mm. La serie rectangular presenta varias ventajas frente a otros tipos de perfiles como, por ejemplo, los perfiles abiertos de doble T. Los perfiles huecos exhiben menos superficie en contacto con el aire que los perfiles de doble T, esto significa que hay que usar menos cantidad de pintura para protegerlos de la oxidación y la corrosión y, por la propia geometría del perfil rectangular, acumula menos polvo. Además, los perfiles huecos rectangulares, resistiendo la misma carga que un HEB, pesan menos, aligerando la estructura.



*Figura 5-4. Malla espacial monocapa de la cubierta del Centro de Eventos.*

La unión de las barras se realiza mediante uniones soldadas. Este tipo de nudos han sido desarrollados y patentados por la empresa Mero TSK [14] [15]. Se trata de una unión de tipo disco que permite orientar los perfiles con giros relativos entre unos y otros en las tres direcciones del espacio (Figura 5-5 y Figura 5-6). Este nudo se orienta siguiendo las normales de los planos generados por cada elemento de vidrio. Se realiza una media de los diferentes vectores normales que resultará en el vector normal del disco. La ventaja de este tipo de nudos es que permite unir los perfiles mediante tornillos ocultos facilitando la puesta en obra y permitiendo un registro de las uniones cuando sea necesario.



*Figura 5-5. Nudo de unión de las barras de la estructura. Fotografía in situ.*

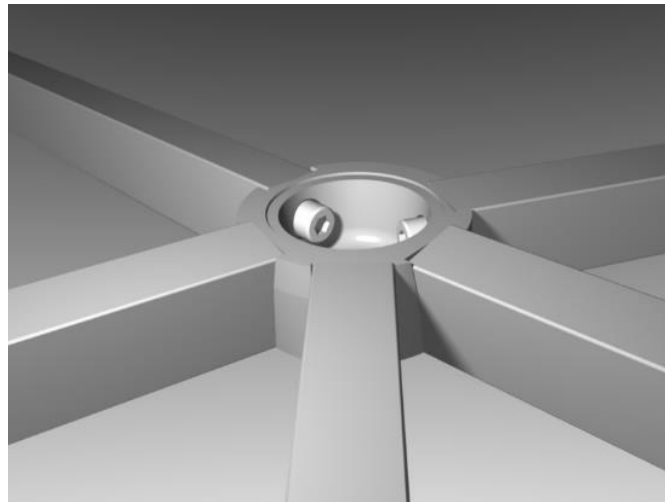


Figura 5-6. Nudos de unión de las barras de la estructura. Modelo de Mero TSK.

La estructura de la cubierta se une con la estructura del resto del centro de eventos mediante placas de anclaje (Figura 5-7). La estructura de la cubierta se une a la estructura del resto del edificio, realizada con hormigón armado. Dos grandes vigas bajo los apoyos de la cubierta reciben los apoyos de las barras de la cúpula. La unión se realiza desde uno de los nudos hasta la placa de anclaje mediante una barra de longitud reducida. La placa de anclaje se une a una viga de hormigón armado mediante 4 barras de anclaje. Este apoyo se trata de una articulación, que gracias a un pequeño trozo de barra cuadrada que posee una rigidez mucho menor a las barras que forman el resto de la cubierta, permite el giro relativo de las barras mientras coarta los desplazamientos verticales y horizontales.



Figura 5-7. Detalle del anclaje de la malla espacial a la estructura de hormigón armado del edificio.

En la parte anterior y posterior del edificio la cubierta se convierte en fachadas acristaladas. En la fachada posterior conserva la forma del elipsoide, curvándose hacia dentro, dando lugar a un mirador que se asoma hacia la autopista. Las barras de la fachada posterior acometen en una viga cajón de 30 x 30 cm con forma parabólica (Figura 5-8 y Figura 5-10). Esta viga cajón se apoya en 4 puntos de apoyo. Dos a cada

lado, un apoyo sobre la viga de hormigón armado del último piso del edificio y el otro apoyo sobre otra viga de los pisos inferiores, quedando el vértice de la parábola libre.



*Figura 5-8. Vista interior de la penúltima planta con detalle del mirador.*

La fachada principal se sitúa en la plaza que da acceso al edificio. Aquí se rompe la geometría del elipsoide para generar una fachada acristalada vertical que haga de entrada al edificio. La fachada se soporta mediante una estructura de montantes y travesaños constituida por perfiles IPE 600 como montantes y perfiles cuadrados 120 x 120 x 5 mm como travesaños (Figura 5-11). En las cuadrículas generadas por la retícula estructural se instalan los vidrios que forman la entrada principal del edificio. La unión entre los perfiles de la fachada y las barras de acero de la cubierta se realiza mediante otra viga cajón, esta vez de 600 x 300 mm orientada como una viga plana (Figura 5-9). Esta viga cajón permite descargar los esfuerzos de las barras de la cubierta hacia los soportes de fachada, colaborando a una eficiente transmisión de las acciones [11].

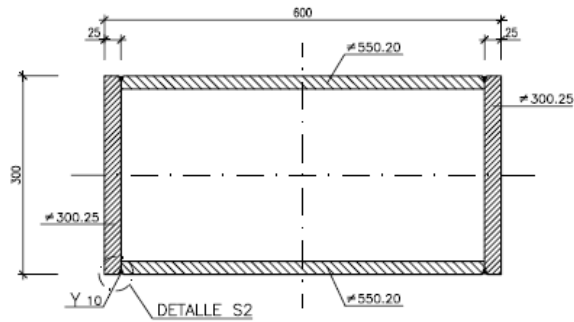


Figura 5-9. Detalle del perfil de la viga cajón de la fachada.

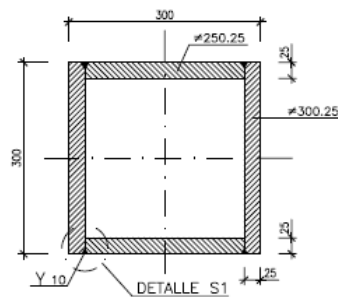


Figura 5-10. Detalle del perfil de la viga cajón del mirador.

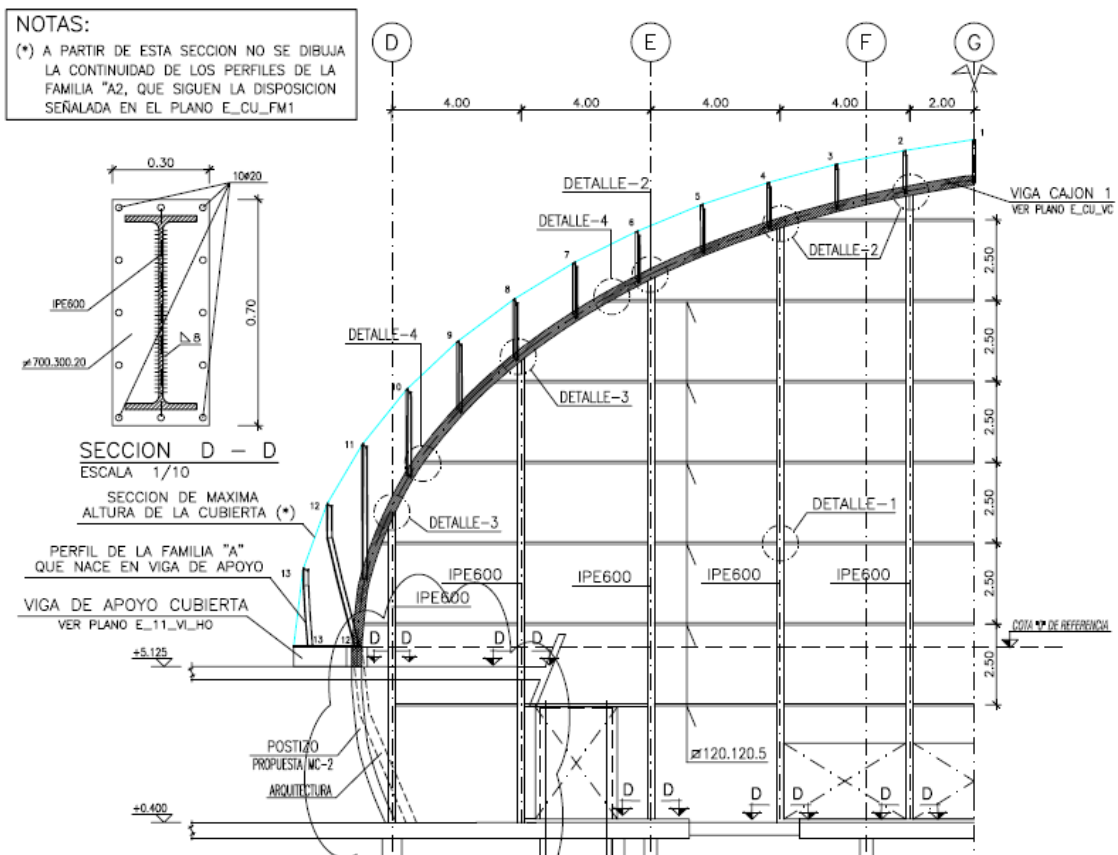


Figura 5-11. Detalle de perfilería usada en la fachada.

Construir este tipo de cúpulas no es sencillo, se debe seguir un proceso delicado para que el proceso de carga no comprometa la estructura y permita una rápida ejecución de las uniones y posterior instalación de los vidrios. El proceso que se ha seguido en este edificio parte de dividir los triángulos que forman la cubierta en varias franjas agrupando los triángulos en hexágonos (Figura 5-12). Se ejecuta primero la viga cajón de la fachada principal y la primera franja de hexágonos. Posteriormente se monta la segunda franja, y una vez esta franja está acabada se une con la primera, quedando así las primeras el primer tramo de la cúpula ejecutado. Este proceso se repite hasta alcanzadas 8 franjas de hexágonos. El siguiente paso es montar el cascode frontal de la cubierta dividiéndolo en dos grupos y apeándolos de manera provisional. Una vez colocados los grupos de triángulos se unirán mediante barras tal y como se ha procedido en los pasos anteriores. De este modo queda ejecutada la cubierta y está lista para recibir los paneles de vidrio (Figura 5-13 y Figura 5-14) [11].

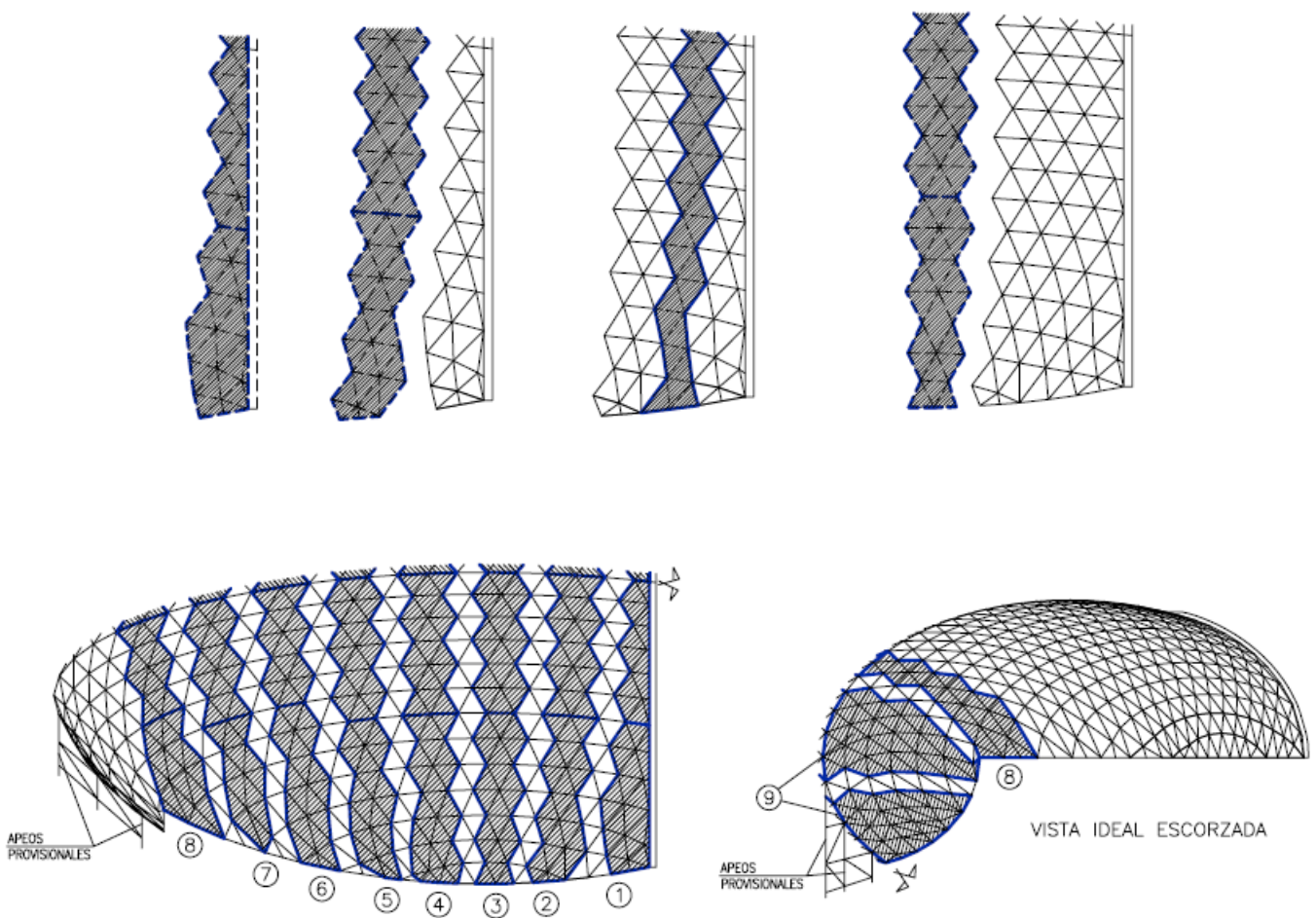


Figura 5-12. Diagramas del proceso constructivo de la estructura.

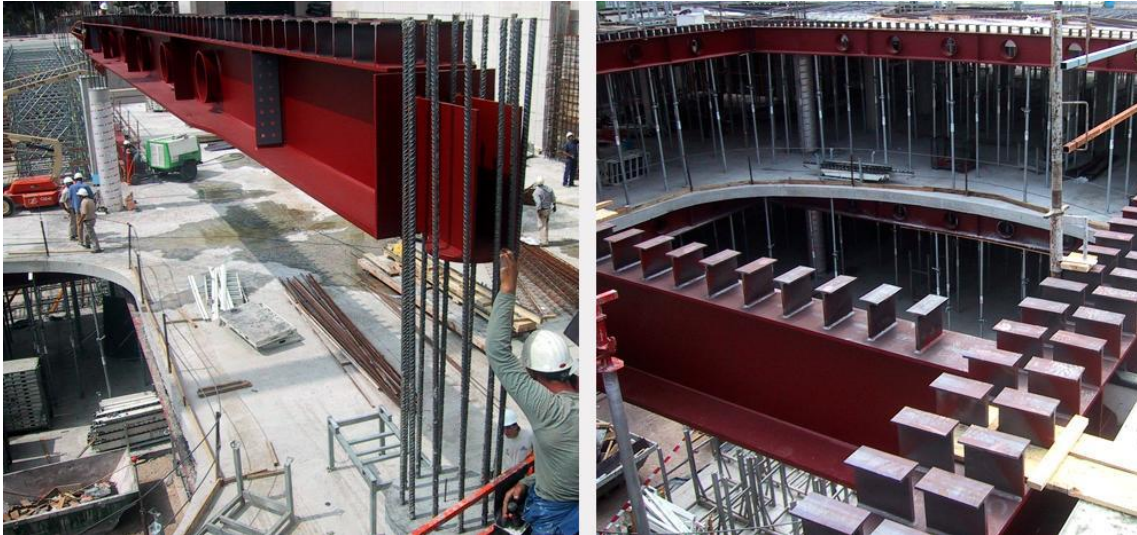


Figura 5-13. Ejecución de la estructura de acero de la cubierta. Fotografía in situ

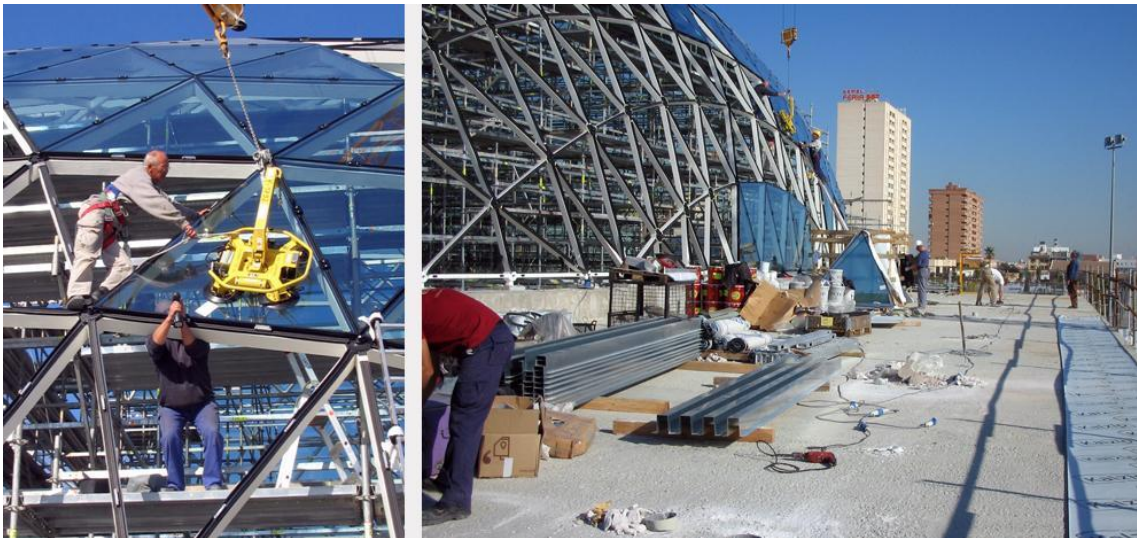


Figura 5-14. Instalación de los paneles de vidrio. Fotografía in situ.



## 6. MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Para poder realizar una optimización de la estructura del Foro Sur primero se debe modelizar su estructura. Para ello se va a usar la herramienta de diseño del programa Architrave en AutoCAD. Esta herramienta nos permite modelizar la geometría de la estructura a estudiar y aplicar las diferentes hipótesis de cargas que actúan en la estructura para posteriormente analizar su comportamiento en el programa de cálculo de Architrave.

### 6.1 MODELIZACIÓN GEOMÉTRICA

Si algo caracteriza a la cúpula del Centro de Eventos, es su forma tan similar a un elipsoide, lo que hace que el proceso de dibujo sea más complicado que dibujando una estructura convencional de pilares y vigas, de todos modos, afortunadamente, la cubierta posee la ventaja de ser simétrica respecto al plano vertical que contiene el arco central de la cúpula, lo que permite trabajar sobre una mitad y luego completar la otra realizando una simetría.

En la fase inicial de modelado se solicitó al estudio la documentación necesaria para poder realizar un modelo estructural con una geometría fiel a la realidad. Entre los planos proporcionados hay un documento con las coordenadas de los vértices de una de las mitades de la bóveda (Figura 6-1). Esto permite poder situar cada vértice en tres dimensiones. Los puntos se organizan mediante códigos de 3 dígitos, el primero corresponde a los arcos longitudinales al que pertenece, siendo el 1 que corresponde al eje de simetría el arco y 14 el último arco del lateral. Los vértices pertenecientes a cada arco se ordenan del a partir del número 01 en adelante (Figura 6-7) [11]. Una vez se han posicionado los vértices, se pueden unir mediante las barras.

NUDO	X	Y	Z
408	-14.913	14.376	6.354
409	-17.371	14.301	6.354
410	-19.823	14.146	6.354
411	-22.267	13.910	6.354
412	-24.698	13.589	6.354
413	-27.112	13.180	6.354
414	-29.503	12.678	6.354
415	-31.801	12.094	6.354
416	-34.059	11.404	6.354
417	-36.379	10.553	6.354
418	-38.619	9.566	6.354
419	-40.687	8.453	6.354
420	-42.593	7.179	6.354
421	-44.291	5.774	6.354
422	-45.594	4.260	6.354
423	-46.571	2.520	6.354
424	-47.058	0.588	6.354
425	-46.928	-1.400	6.354
426	-46.219	-3.263	6.354
427	-45.090	-4.910	6.354

Figura 6-1. Fragmento del documento con coordenadas de los nudos.

Posteriormente se procede a colocar los apoyos de la cubierta. Como se ha mencionado en el análisis estructural de la malla, los apoyos de la cubierta son articulaciones, por lo que se modelizan como tal. A cada lado de la cubierta hay 25 apoyos (Figura 6-2), la viga cajón del mirador apoya en 2 puntos a cada lado al mismo

nivel que el resto de las barras (Figura 6-5); además posee 2 apoyos adicionales, uno a cada lado del plano de simetría, situados a la altura de la penúltima planta que son apoyos deslizantes (Figura 6-3 y Figura 6-6).

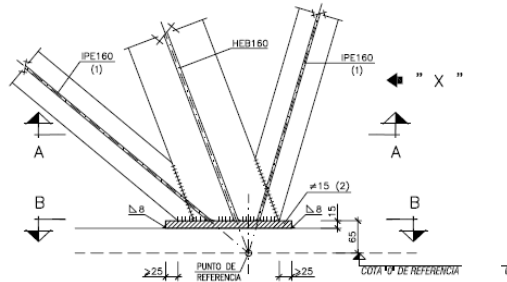


Figura 6-2. Apoyo tipo de las barras trianguladas.

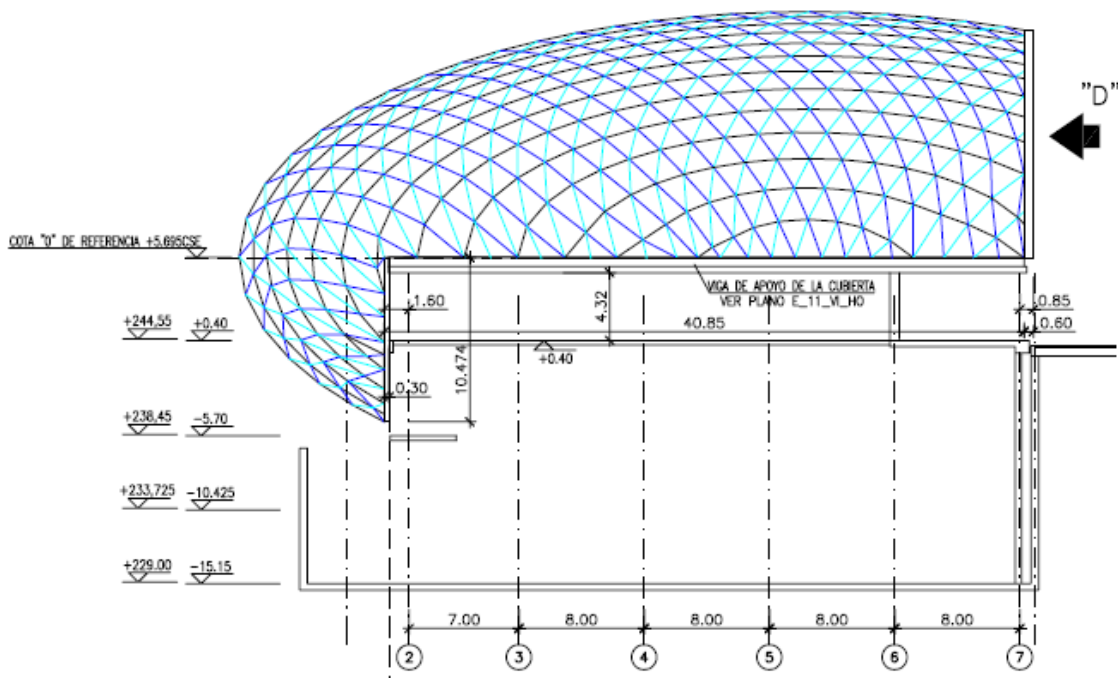


Figura 6-3. Esquema de apoyo de la cubierta en la estructura de hormigón armado del edificio.

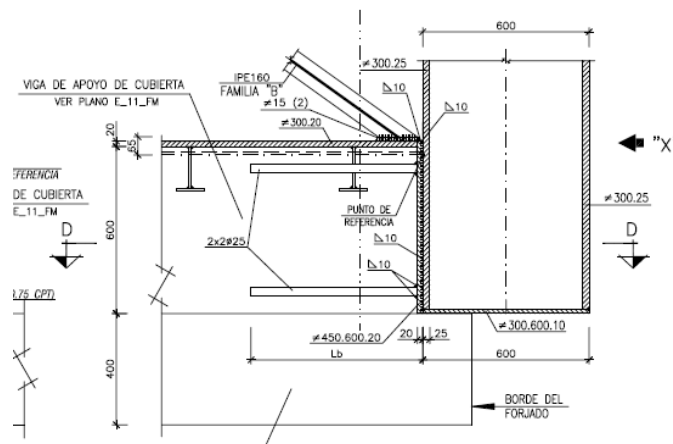


Figura 6-4. Apoyo de la viga cajón de la fachada.

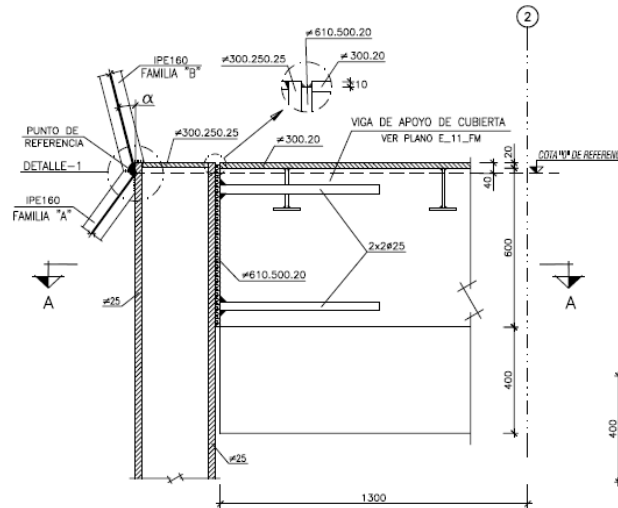


Figura 6-5. Unión de la viga cajón del mirador con la viga de hormigón armado.

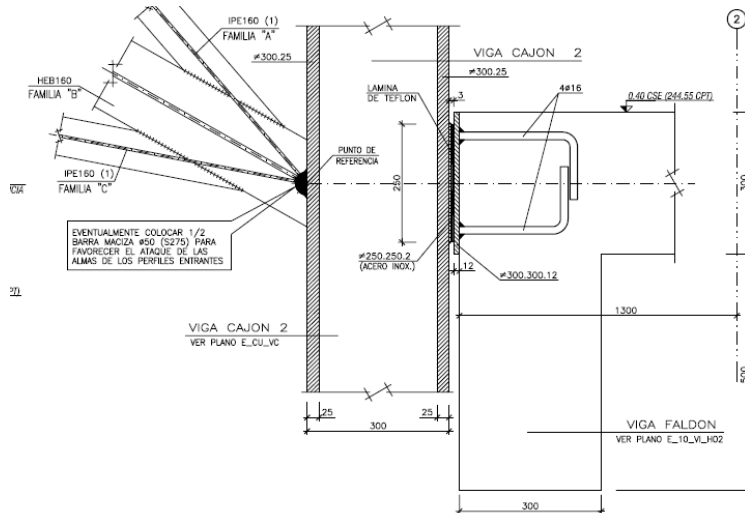


Figura 6-6. Apoyo deslizante de la viga cajón del mirador a nivel de penúltima planta.

La viga cajón del muro cortina de la entrada también apoya sobre articulaciones, al igual que los IPE 600 que hacen la función de montantes del cerramiento (Figura 6-4 y Figura 5-11). Perpendicular a los montantes se colocan los travesaños. Las separaciones intereje de los perfiles del cerramiento acristalado se toman de los alzados, plantas y secciones proporcionados por el estudio (Figura 4-7, Figura 4-8, Figura 4-9 y Figura 4-10) [11].

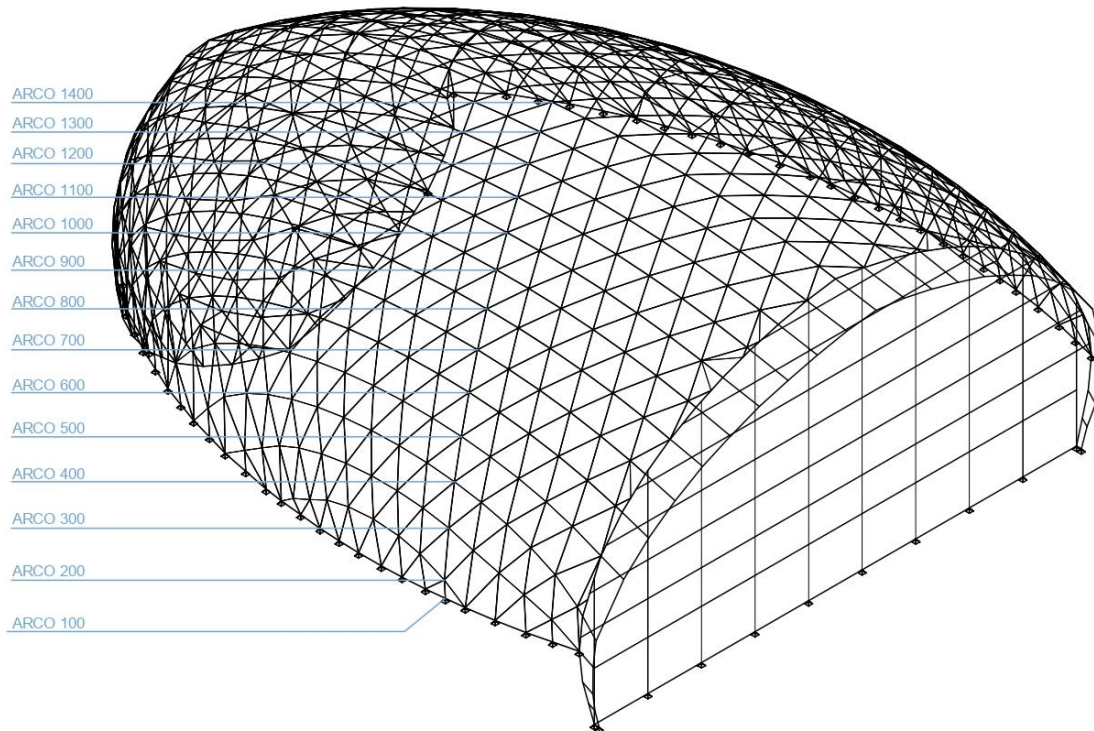


Figura 6-7. Modelo de barras de la estructura con identificación de los arcos.

## 6.2 MODELIZACIÓN DE LAS ACCIONES

Una vez ya ha sido modelizada la geometría, procedemos a realizar el modelizado de las cargas que gravitan sobre la cubierta. Para el cálculo de las acciones se va a utilizar la normativa española vigente recogida en el Código Técnico en el documento básico de seguridad estructural de acciones en la edificación (CTE DB-SE-AE) [16]. Se han modelizado las siguientes cargas: cargas permanentes, carga variable de nieve, carga de viento en dirección norte y sur y carga de viento en dirección este y oeste.

### CARGAS PERMANENTES – HIP 01

Las cargas permanentes que gravitan corresponden a los paneles de vidrio. El vidrio se dispone en forma de paneles triangulares sostenidos sobre los nudos de la cubierta. Una manera de obtener los esfuerzos que generan en las barras los paneles de vidrio podría ser obtener la carga puntual que generan en los nudos asumiendo que cada uno recibe un tercio del peso del panel que gravita sobre él. Pero esta opción presenta un problema: debido a la irregularidad de la forma de los triángulos y de la cubierta es muy complicado obtener cada una de las cargas puntuales que van a actuar sobre cada nudo, el número de cálculos a realizar y de cargas a asignar conllevaría un tiempo muy extenso. Para resolver este problema se decide optar por otra solución: modelizar los paneles de vidrio como elementos finitos planos. Estos elementos finitos apoyan en los nudos de la estructura y transmiten su carga en ellos,

de esta manera se modela la forma de apoyo de los paneles de vidrio sobre la estructura.

Se dibujan 3dcaras usando los nudos de la cubierta como vértices para hacer la función de los paneles. De este modo tenemos una superficie representando los paneles de vidrio a la cual se le va a asignar un material y unas propiedades mecánicas para imitar el vidrio. Architrave [1] permite esta función mediante la herramienta de crear materiales de usuario, se puede definir tanto el espesor del elemento finito, así como su peso específico y módulo de Young entre otras propiedades. Para modelizar el espesor, debido a que no se han facilitado datos de los paneles de vidrio, se ha estimado un espesor de 10 mm. Según la tabla C.1 del anejo C del DB-SE-AE [16], el vidrio tiene un peso específico de  $25 \text{ kN/m}^3$  (resultando una carga de  $0,25 \text{ kN/m}^2$ ). Para el módulo de elasticidad se ha estimado un módulo de Young de una décima parte el módulo del hormigón HA-25 (Figura 6-8). La estimación no busca alcanzar el valor exacto del vidrio, simplemente busca asegurarse de que el elemento finito no colabora en la absorción de acciones debido a su rigidez, así se tiene claro que todos los esfuerzos y deformaciones derivadas de estos son absorbidos por las barras.



Figura 6-8. Propiedades mecánicas de los paneles de vidrio.



Figura 6-9. Propiedades mecánicas de los paneles de aluminio.

Para el caso del pequeño voladizo que se asoma por la fachada se ha realizado el mismo procedimiento. Esta vez el material usado son paneles de aluminio, por lo que se creará un material de usuario con un peso específico igual al peso del aluminio por metro cúbico ( $27 \text{ kN/m}^3$ ) [16]. Se procederá a establecer un módulo de Young teórico usando el mismo criterio que para los paneles de vidrio, en este caso se ha tomado el módulo de elasticidad del acero S275 y se ha reducido a una décima

parte (Figura 6-9). Para el espesor, se ha supuesto un espesor de 5 mm (resultando una carga de  $0,135 \text{ kN/m}^2$ ).

Para modelizar los paneles de vidrio de la fachada, se han empleado áreas de reparto. Se trata de 3dcaras que, a diferencia de los elementos finitos, apoyan de manera unidireccional sobre 2 perfiles. Esto permite introducir el peso propio del vidrio al igual que el espesor, para que transmitan su peso propio a los travesaños que los sostienen. Además, también se pueden colocar sobre ellos las cargas superficiales de viento como se verá más adelante. A continuación, se muestran los elementos finitos y áreas de reparto sobre la estructura (Figura 6-10):

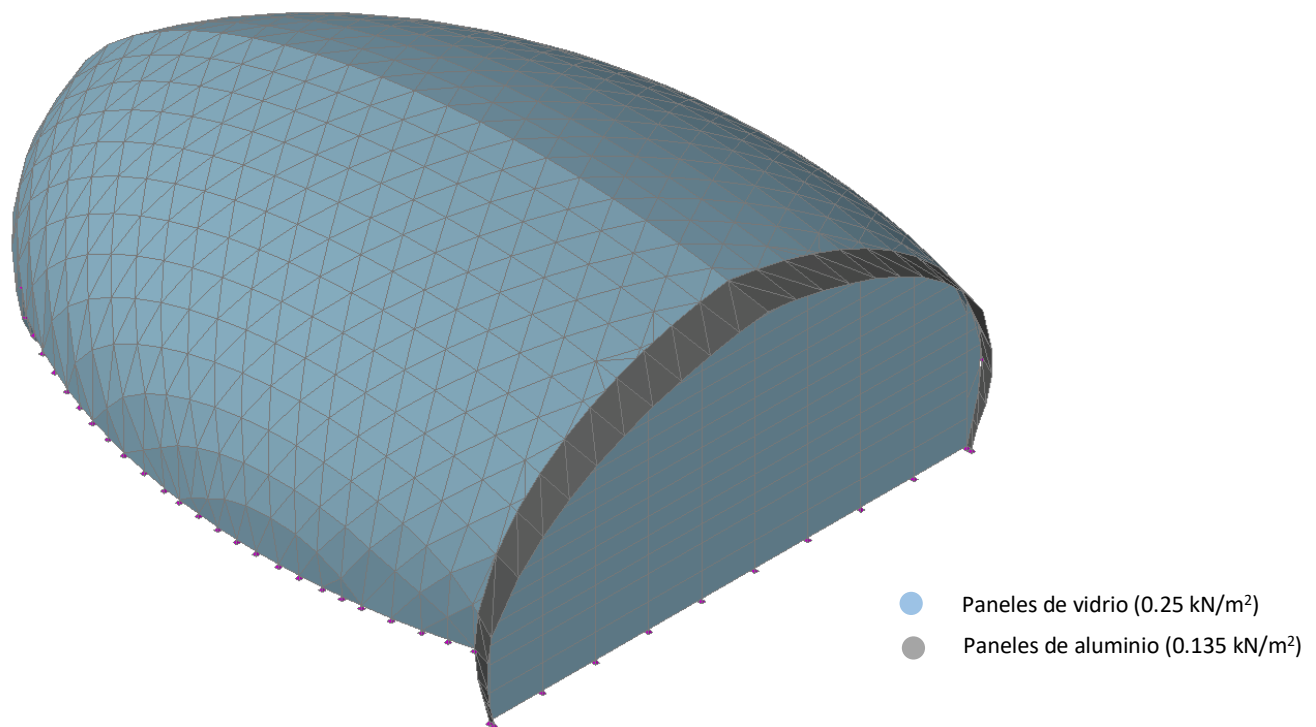


Figura 6-10. Modelo de la estructura con los elementos finitos y áreas de reparto.

A estas acciones ya asignadas habrá que añadir el peso muerto de las barras de acero que conforman la estructura. Este peso no es necesario añadirlo ya que Architrave implementa de manera automática el peso de cada perfil en función del tipo de sección y tamaño elegido.

### SOBRECARGA DE USO – HIP 02

Debido a que en la cubierta no se puede realizar acopio de materiales para su mantenimiento ni es transitable para las personas no se va a considerar sobrecarga de uso para el cálculo y la optimización.



Paneles con inclinación mayor de 60 °

0 kN/m<sup>2</sup>

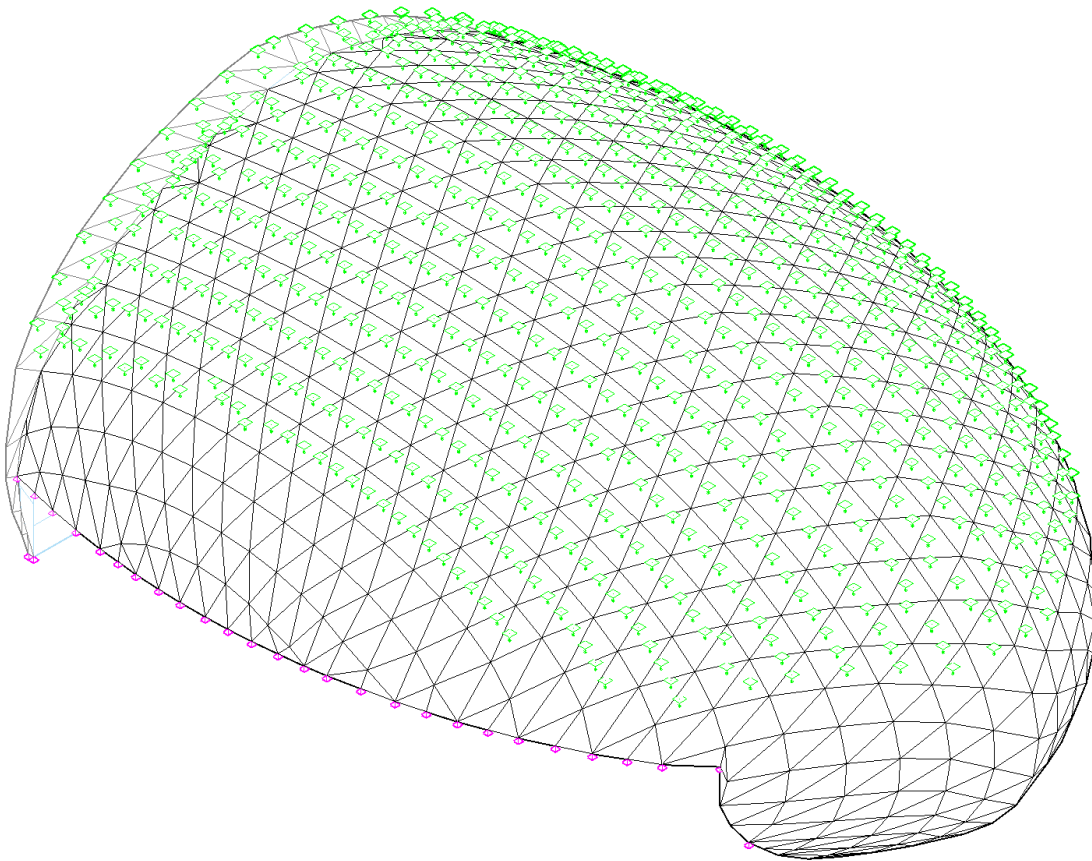


Figura 6-12. Modelo con cargas HIP 03

### CARGAS DE VIENTO – HIP 05, HIP 06, HIP 07 [16]

Las cargas de viento se consideran mediante el cambio de las presiones que ejerce el movimiento del aire sobre las superficies de la cubierta. Estas cargas dependen de las proporciones y tamaño del edificio, la permeabilidad de su superficie, la intensidad del viento o la dirección de sople. Debido a que el edificio se sitúa a una altitud menor de 2000 metros podemos aplicar el método de cálculo que introduce el DB-SE-AE en su apartado 3.3.2.

Para el cálculo de las cargas de viento se ha seguido la siguiente expresión:

$$Q_e = Q_b \cdot C_e \cdot C_p$$

siendo:

- Q<sub>e</sub> presión estática, también considerando la acción del viento como una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto
- Q<sub>b</sub> presión dinámica del viento. Para obtener un valor preciso usaremos el mapa incluido en el anejo D del DB-SE-AE
- C<sub>e</sub> coeficiente de exposición. El valor varía con la altura del edificio, adoptando valores más altos en la cumbrera. Depende del grado de aspereza de la ubicación del edificio. El valor se obtiene mediante el proceso indicado en el apartado 3.3.3 del DB-SE-AE



Cp coeficiente eólico o coeficiente de presión. Para cada dirección de viento analizada se obtienen 2 valores, un valor positivo para las presiones que ejerce el viento y otro valor negativo para las succiones producidas en la cara opuesta. Para calcular el calor se utilizará el método expuesto en los puntos 3.3.4 y 3.3.5 del DB-SE-AE

Para el cálculo de las acciones del viento debemos considerar mínimo dos direcciones. Para ello vamos a considerar la dirección paralela al plano de simetría de la cubierta y la perpendicular. Cada dirección debe ser comprobada en los dos sentidos, por lo que la dirección paralela al plano de simetría se calculará en los dos sentidos posibles, ya que la configuración presiones y succiones varía de uno a otro; en cambio, en la dirección perpendicular al plano de simetría, debido a que la geometría de la cubierta es igual, la configuración de presiones y succiones no varía, por lo que solo podemos considerar un sentido de la carga.

Los valores de Qb y Ce son comunes a todas las direcciones de viento, por lo que obtienen previo al cálculo individualizado de cada dirección.

Para el cálculo de Qb, se recurre a la figura D.1 del anejo D del SB-SE-AE (Figura 6-13). Según indica el mapa, para una zona A de velocidad del viento, la presión dinámica que este ejerce es de 0.42 kN/m<sup>2</sup>.

- 4 El valor básico de la velocidad del viento en cada localidad puede obtenerse del mapa de la figura D.1. El de la presión dinámica es, respectivamente de 0,42 kN/m<sup>2</sup>, 0,45 kN/m<sup>2</sup> y 0,52 kN/m<sup>2</sup> para las zonas A, B y C de dicho mapa.

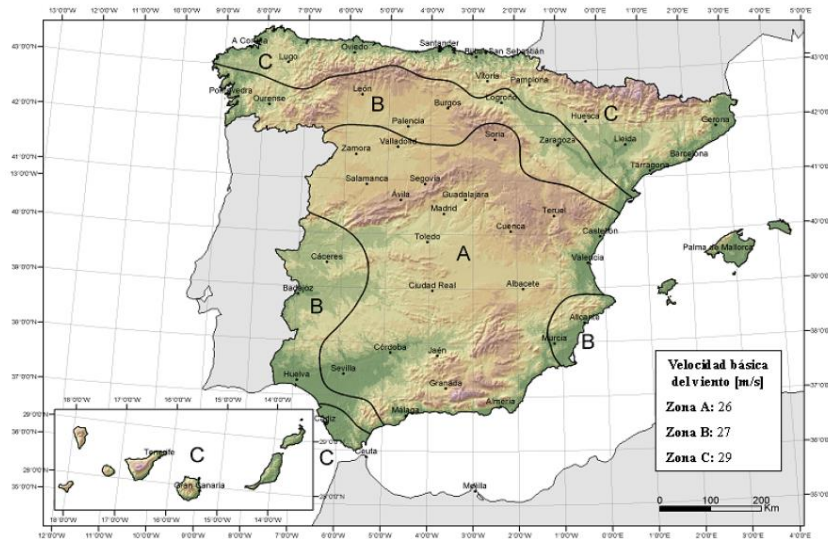


Figura 6-13. Figura D.1 Valor de velocidad de viento.

Para la obtención del coeficiente de exposición se usa la tabla 3.4 del apartado 3.3.3 (Figura 6-14). Siendo que el grado de aspereza del entorno corresponde al grado IV debido a que se encuentra en zona urbana, el coeficiente de exposición variará entre los siguientes valores según la altura del punto que consideremos:

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

Figura 6-14. Tabla 3.4 Valores del coeficiente de exposición.

Cálculo de las presiones y succiones estáticas en la dirección perpendicular al plano de simetría. Dirección Sureste -> Noroeste. HIP 04

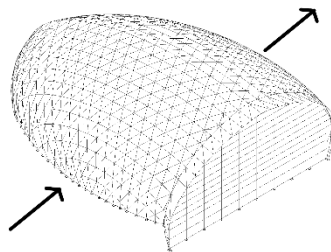


Figura 6-15. Esquema de acción del viento dirección SE-NO.

Para la obtención de coeficientes de presión y de succión es necesario determinar la esbeltez del edificio en esa dirección.

La esbeltez se calcula:

$$\lambda_x = \frac{h}{b_x}$$

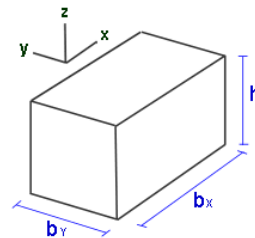


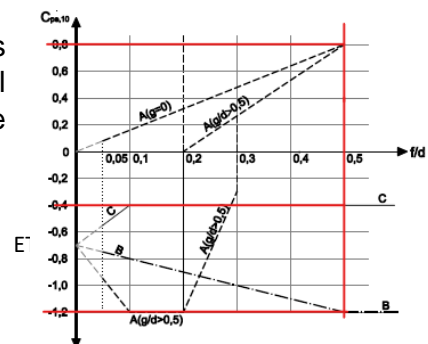
Figura 6-16. Esquema para cálculo de esbeltez.

para esta dirección de viento:

$$\lambda_x = \frac{21}{42} = 0.5$$

Debido a la sección que presenta la cubierta paralela a la dirección de viento que se calcula en este apartado tenemos que recurrir al DB-SE-AE al anejo D, en concreto al apartado D.12 que recoge directrices para adaptar el cálculo de cargas de viento en cubiertas cilíndricas, que es el tipo de cubierta más similar al tipo de cubierta de estudio (Figura 6-17 y Figura 6-18).

La figura adjunta al anejo indica tres valores que toma el coeficiente de presión según la zona del casco de la cubierta donde se encuentre el punto que



estamos considerando de cálculo. Se establecen 3 regiones: A, B y C. El límite de las regiones A y C, se encuentra aproximadamente en el punto medio de cada mitad de cubierta. Para obtener el coeficiente de presión de cada zona debemos obtener la relación entre la altura de cumbrera de la cubierta y la luz entre los apoyos. Además, conviene obtener la relación entre la altura de soporte de la cubierta y la luz de esta.

$$\frac{f}{d} = \frac{21}{42} = 0.5$$

$$\frac{g}{d} = \frac{0}{42} = 0$$

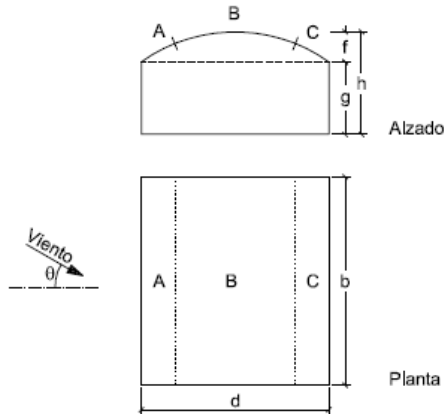


Figura 6-17. Obtención de coeficientes de presión y succión.

anejo D.12.

Aplicando estos valores en la gráfica se definen los coeficientes de presión para cada una de las regiones y se obtienen las cargas (Figura 6-19).

Región	Qb	Altura del punto considerado	Ce	Cp o Cs	Carga de viento (kN/m2)
A	0,42	17,52	2,17	0,8	0,72912
		20,62	2,29		0,76944
		23,38	2,39		0,80304
		27,72	2,52		0,84672
		31,64	2,62		0,88032
		34,81	2,7		0,9072
B	0,42	37,22	2,75	-1,2	-1,386
		29,01	2,79		-1,40616
		40,25	2,82		-1,42128
C	0,42	34,81	2,7	-0,4	-0,4536
		31,64	2,62		-0,44016
		27,72	2,52		-0,42336
		23,38	2,39		-0,40152
		20,62	2,29		-0,38472
		17,52	2,17		-0,36456

Figura 6-19. Cálculo de cargas de viento para dirección SE-NO.

Para obtener las alturas de puntos considerados se ha dividido la superficie de cubierta en franjas horizontales separadas 3 metros entre sí para poder establecer los valores del coeficiente de exposición, ya que varía con la altura. Este mismo criterio se ha seguido para aplicar las cargas en la herramienta diseño de Architrave en

AutoCAD, generando franjas de elementos finitos próximos con la misma carga de viento.

Una vez calculadas las cargas se procede a aplicarlas sobre los elementos finitos, que son los encargados de transmitir estas cargas a las barras de la cubierta (Figura 6-20) (Las cargas no visibles en la imagen es debido a que actúan en succión). Las cargas se modelan como cargas perpendiculares a los elementos finitos aplicándolas por franjas como se ha mencionado anteriormente en el apartado puesto que según el DB-SE-AE las cargas de viento para un punto a una determinada altura son “perpendicular a la superficie de cada punto expuesto”.

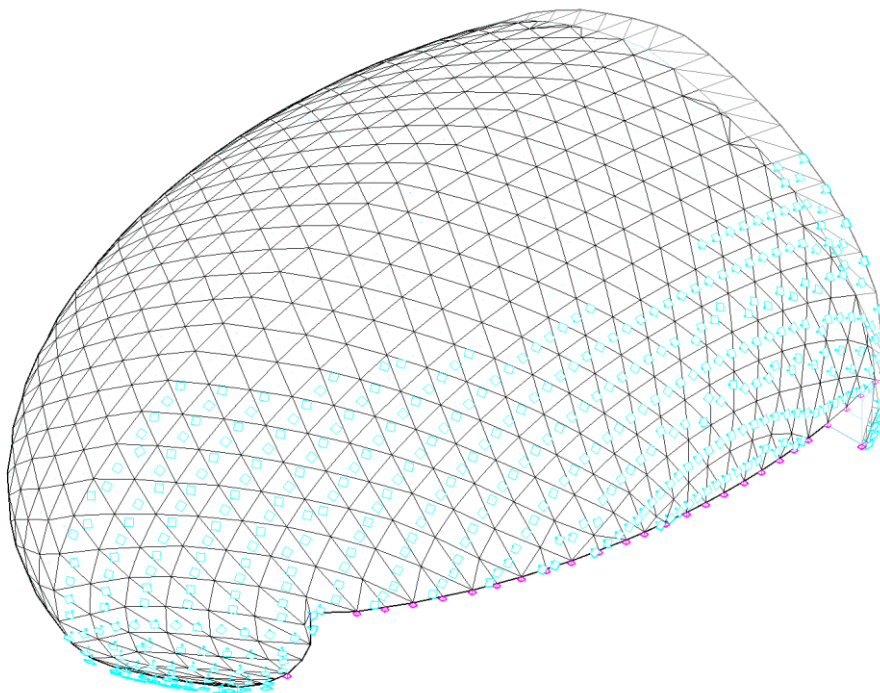


Figura 6-20. Modelo con cargas aplicadas HIP 04.

Cálculo de las presiones y succiones estáticas en la dirección perpendicular al plano de simetría. Dirección Sudoeste -> Noreste. HIP 05

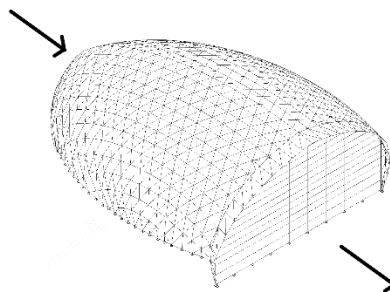


Figura 6-21. Esquema de acción del viento en dirección SO-NE.

Para la obtención de coeficientes de presión y de succión es necesario determinar la esbeltez del edificio en esa dirección.

La esbeltez se calcula:

$$\lambda_y = \frac{h}{b_y}$$

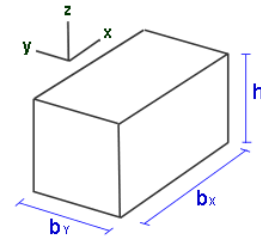


Figura 6-22. Esquema para cálculo de esbeltez.

para esta dirección de viento:

$$\lambda_y = \frac{21}{50.11} = 0.419$$

Nuevamente, debido a la sección que presenta la cubierta paralela a la dirección de viento que se calcula en este apartado tenemos que recurrir al DB-SE-AE al anejo D.12.

Esta vez solo se usan para el cálculo las regiones A y B, debido a que la cubierta se interrumpe por el cerramiento de vidrio (Figura 6-24). Para el cálculo de las acciones en el muro acristalado se procederá de manera habitual como cuando se calculan acciones de viento en edificios convencionales de cerramientos verticales. Se procede a definir la región A, siendo un cuarto de la longitud total de la cubierta. Posteriormente se obtiene el coeficiente de presión de cada zona, debiendo obtener nuevamente la relación entre la altura de cumbre de la cubierta y la luz entre los apoyos. Además, conviene obtener la relación entre la altura de soporte de la cubierta y la luz de esta.

$$\frac{f}{d} = \frac{21}{50.11} = 0.419$$

$$\frac{g}{d} = \frac{0}{50.11} = 0$$

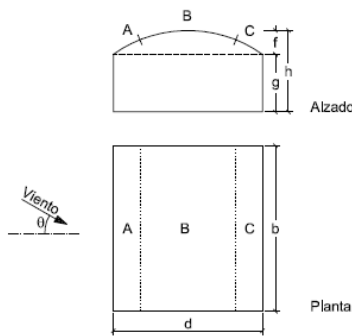


Figura 6-24. División de la cubierta en 3 zonas.

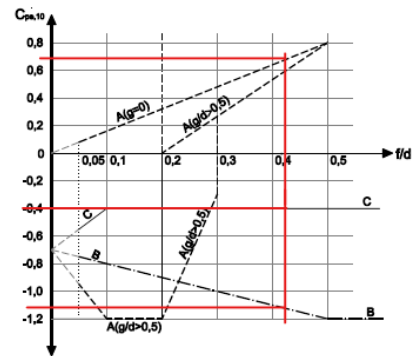


Figura 6-23. Obtención de coeficientes de presión y succión.

Aplicando estos valores en la gráfica (Figura 6-23) se definen los coeficientes de presión para cada una de las regiones.

Para obtener el valor de succión en la región C empleamos la tabla 3.5 del apartado 3.3.4 del DB-SE-AE (Figura 6-25) entrando con una esbeltez de 0.419 (debido a que no está incluida en la tabla se tomará la inmediatamente superior que es 0.5).

	Esbeltéz en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≥ 5,00
Coefficiente eólico de presión, $c_p$	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coefficiente eólico de succión, $c_s$	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Figura 6-25. Tabla 3.5 Obtención de coeficiente eólico (usado en fachada).

Una vez calculados los coeficientes obtenemos las cargas de viento para esta dirección (Figura 6-26):

Región	$Q_b$	Altura del punto considerado	$C_e$	$C_p$ o $C_s$	Carga de viento (kN/m <sup>2</sup> )
A	0,42	17,52	2,17	0,7	0,63798
		20,62	2,29		0,67326
		23,38	2,39		0,70266
		27,72	2,52		0,74088
		31,64	2,62		0,77028
		34,81	2,7		0,7938
B	0,42	37,22	2,75	-1,1	-1,2705
		29,01	2,79		-1,28898
		40,25	2,82		-1,30284
C	0,42	34,81	2,7	-0,4	-0,4536
		31,64	2,62		-0,44016
		27,72	2,52		-0,42336
		23,38	2,39		-0,40152
		20,62	2,29		-0,38472
		17,52	2,17		-0,36456

Figura 6-26. Cálculo de cargas de viento para dirección SO-NE.

Para obtener las alturas de puntos considerados se procedido como en el apartado anterior.

Una vez calculadas las cargas se procede a aplicarlas sobre los elementos finitos, que son los encargados de transmitir estas cargas a las barras de la cubierta (Figura 6-27) (Las cargas no visibles en la imagen es debido a que actúan en succión). Las cargas se modelan como cargas perpendiculares a los elementos finitos aplicándolas por franjas como se ha mencionado anteriormente en el apartado puesto que según el DB-SE-AE las cargas de viento para un punto a una determinada altura son “perpendicular a la superficie de cada punto expuesto”.

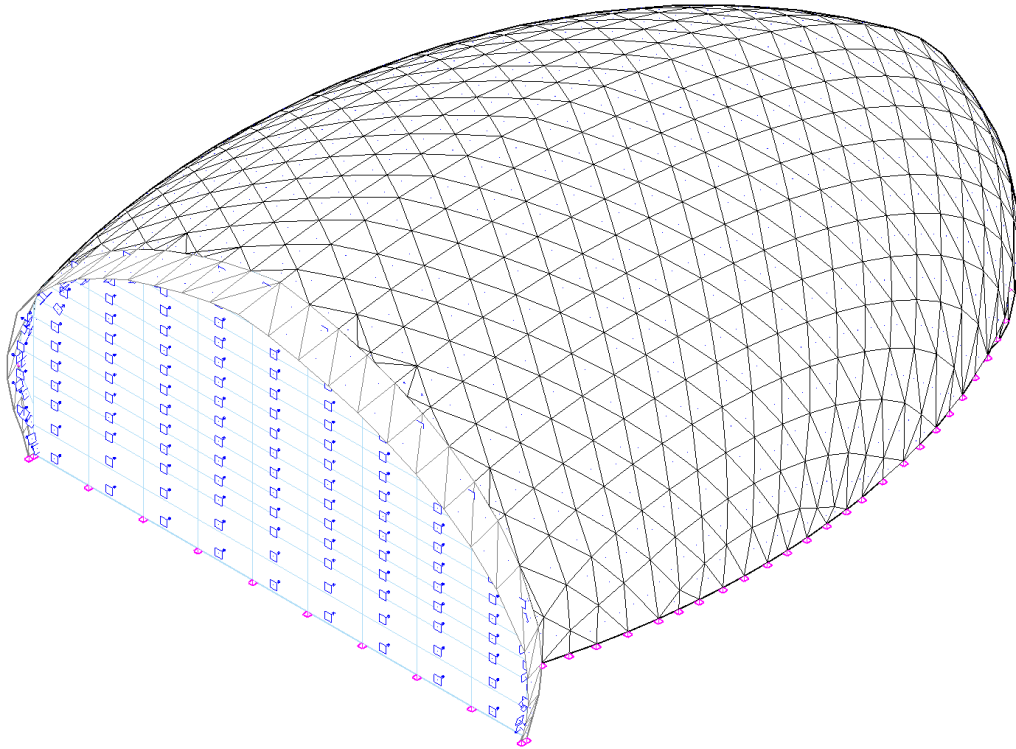


Figura 6-27. Modelo con cargas aplicadas HIP 05.

Cálculo de las presiones y succiones estáticas en la dirección perpendicular al plano de simetría. Dirección Noreste -> Sudoeste. HIP 06

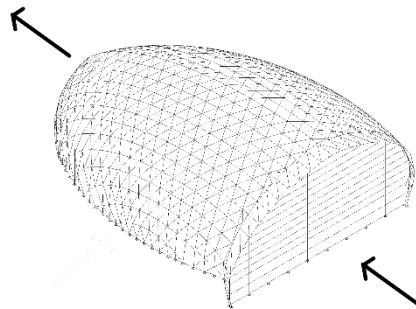


Figura 6-28. Esquema de acción del viento en dirección NO-SE.

Para la obtención de coeficientes de presión y de succión es necesario determinar la esbeltez del edificio en esa dirección.

La esbeltez se calcula:

$$\lambda_y = \frac{h}{b_y}$$

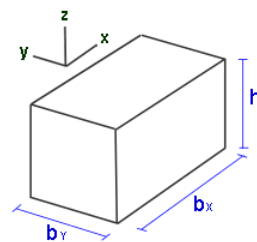


Figura 6-29. Esquema para cálculo de esbeltez.

para esta dirección de viento:

$$\lambda_y = \frac{21}{50.11} = 0.419$$

Nuevamente, debido a la sección que presenta la cubierta paralela a la dirección de viento que se calcula en este apartado tenemos que recurrir al DB-SE-AE al anejo D.12.

Esta vez solo se usan para el cálculo las regiones B y C, debido a que el inicio de la cubierta en esta dirección lo forma la fachada de vidrio (Figura 6-30). Para el cálculo de las acciones en el muro acristalado se procederá de manera habitual como cuando se calculan acciones de viento en edificios convencionales de cerramientos verticales. Se procede a definir la región C, siendo un cuarto de la longitud total de la cubierta. Posteriormente se obtiene el coeficiente de presión de cada zona, debiendo obtener nuevamente la relación entre la altura de cumbrera de la cubierta y la luz entre los apoyos. Además, conviene obtener la relación entre la altura de soporte de la cubierta y la luz de esta.

$$\frac{f}{d} = \frac{21}{50.11} = 0.419$$

$$\frac{g}{d} = \frac{0}{50.11} = 0$$

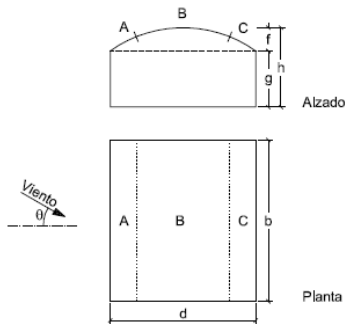


Figura 6-30. División de la cubierta en 3 zonas.

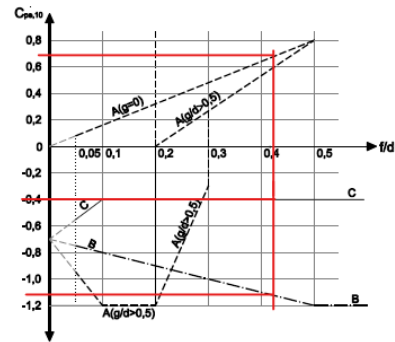


Figura 6-31. Obtención de coeficientes de presión y succión.

Aplicando estos valores en la gráfica (Figura 6-31) se definen los coeficientes de presión para cada una de las regiones.

Para obtener el valor de succión en la región A empleamos la tabla 3.5 del apartado 3.3.4 del DB-SE-AE (Figura 6-32) entrando con una esbeltez de 0.419 (debido a que no está incluida en la tabla se tomará la inmediatamente superior que es 0.5).

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≥ 5,00
Coefficiente eólico de presión, $c_p$	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coefficiente eólico de succión, $c_s$	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Figura 6-32. Tabla 3.5 Obtención de coeficientes eólicos.



Una vez calculados los coeficientes obtenemos las cargas de viento para esta dirección (Figura 6-33):

Región	Qb	Altura del punto considerado	Ce	Cp o Cs	Carga de viento (kN/m <sup>2</sup> )
A	0,42	17,52	2,17	0,7	0,63798
		20,62	2,29		0,67326
		23,38	2,39		0,70266
		27,72	2,52		0,74088
		31,64	2,62		0,77028
		34,81	2,7		0,7938
B	0,42	37,22	2,75	-1,1	-1,2705
		29,01	2,79		-1,28898
		40,25	2,82		-1,30284
C	0,42	34,81	2,7	-0,4	-0,4536
		31,64	2,62		-0,44016
		27,72	2,52		-0,42336
		23,38	2,39		-0,40152
		20,62	2,29		-0,38472
		17,52	2,17		-0,36456

Figura 6-33. Cargas de viento en dirección NO-SE.

Para obtener las alturas de puntos considerados se procedido como en los apartados anteriores.

Una vez calculadas las cargas se procede a aplicarlas sobre los elementos finitos, que son los encargados de transmitir estas cargas a las barras de la cubierta (Figura 6-34) (Las cargas no visibles en la imagen es debido a que actúan en succión). Las cargas se modelan como cargas perpendiculares a los elementos finitos aplicándolas por franjas como se ha mencionado anteriormente en el apartado puesto que según el DB-SE-AE las cargas de viento para un punto a una determinada altura son “perpendicular a la superficie de cada punto expuesto”.

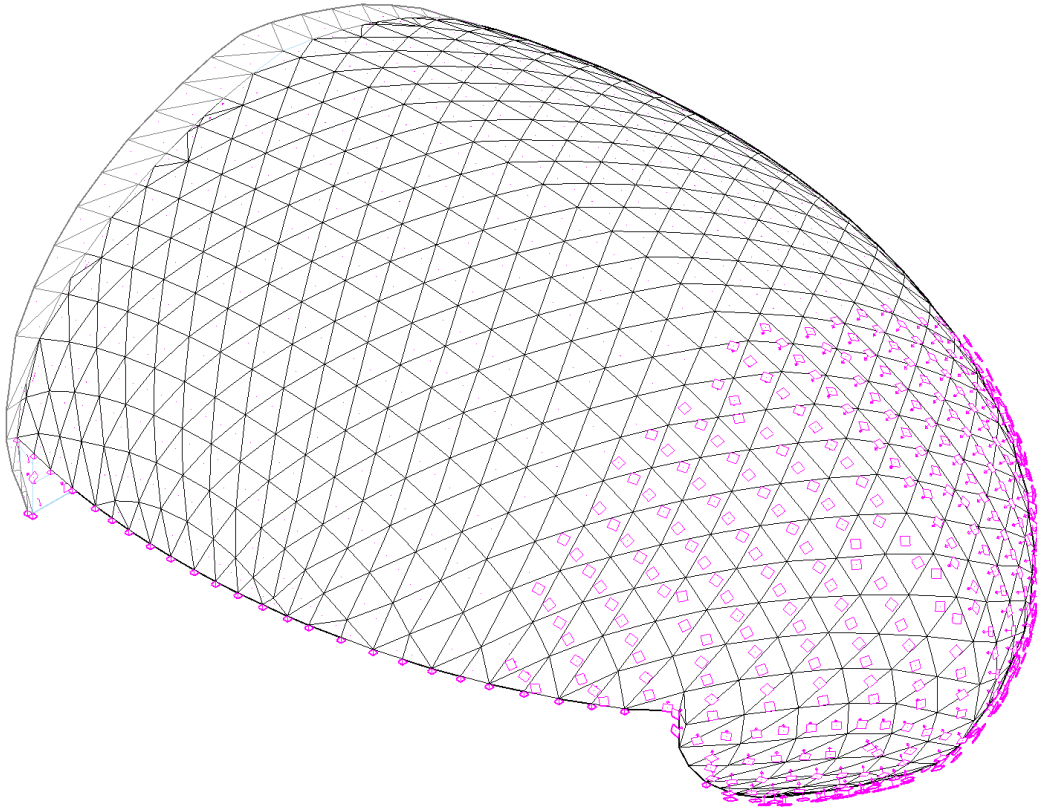


Figura 6-34. Modelo con cargas HIP 06,

Finalizado este proceso se ha obtenido el modelo de la estructura con las barras, los elementos finitos y las acciones que actúan sobre la estructura (Figura 6-35 y Figura 6-36).

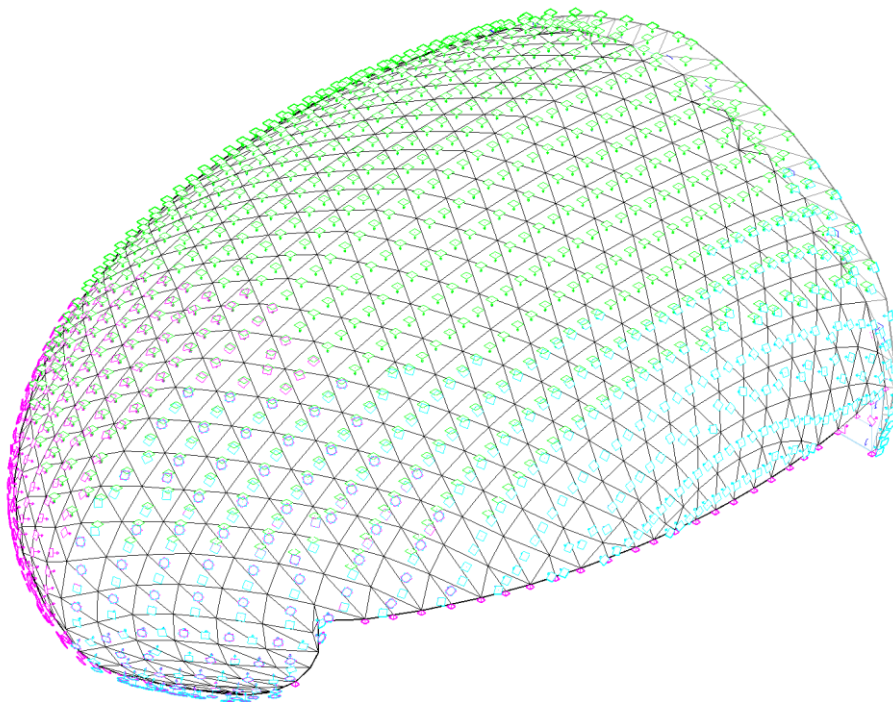


Figura 6-35. Vista trasera del modelo estructural.

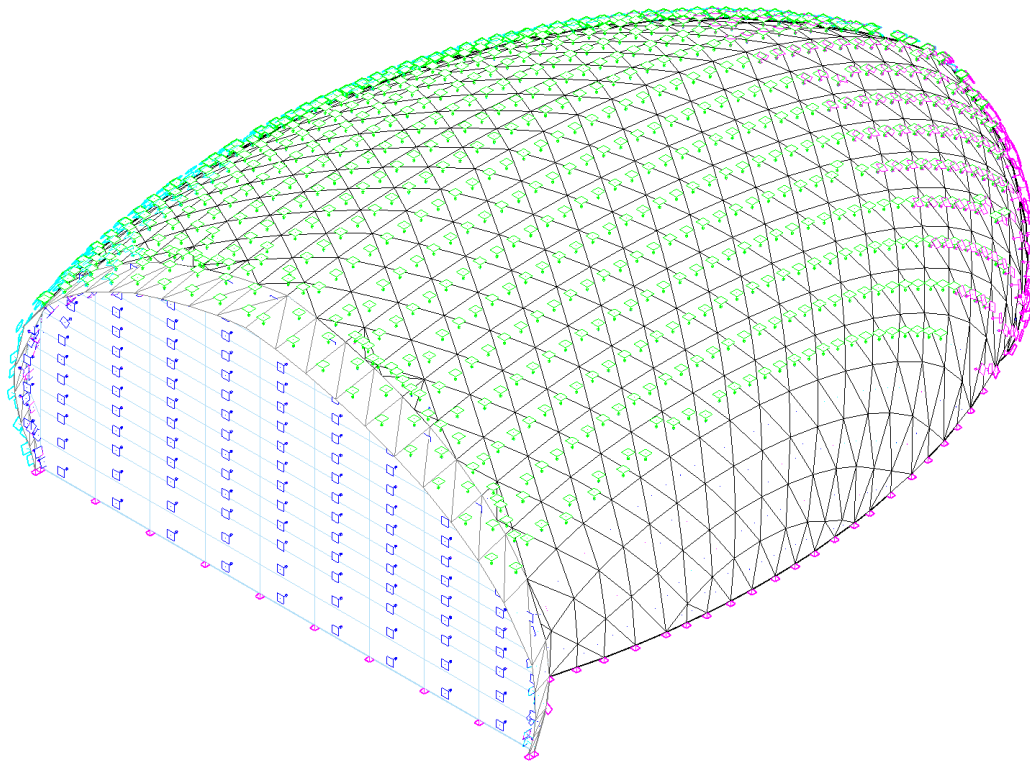


Figura 6-36. Vista frontal del modelo estructural.

### CARGAS DE SISMO – HIP 07 [17]

Debido a que la estructura se encuentra en una zona de baja sismicidad (Figura 6-37), se ha decidido por ignorar este tipo de acciones debido al poco impacto que tienen sobre la estructura y a la necesidad de acotar la amplitud del TFG debido a la complejidad de la estructura de análisis.

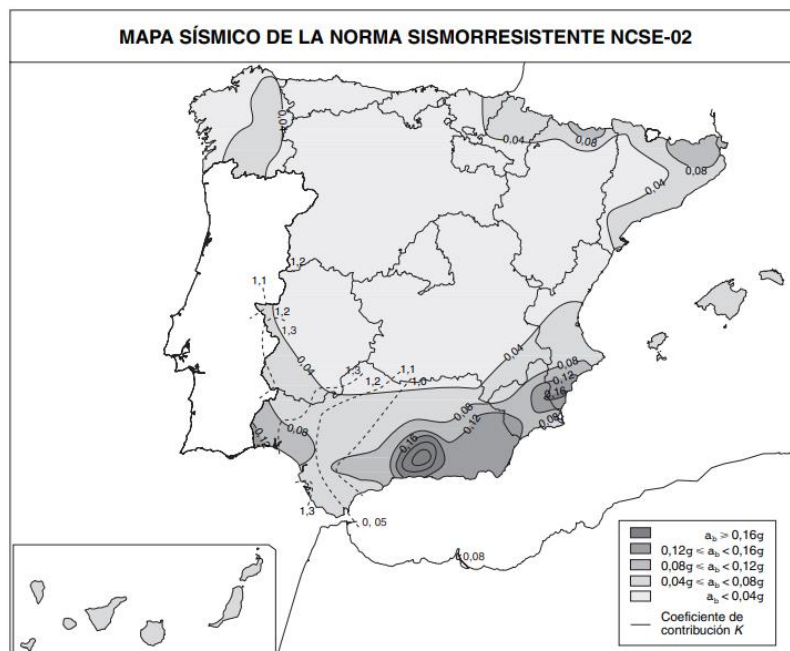


Figura 6-37. Mapa de aceleraciones sísmicas.

### 6.3 PREDIMENSIONADO Y CÁLCULO

Una vez se han dibujado todas las barras de la estructura se procede a realizar la asignación de perfiles de la estructura siguiendo el siguiente criterio.

La asignación de cada tipo de perfil se hace siguiendo las instrucciones que figuran en la documentación aportada por el estudio. De todos modos, se hacen evidentes ciertas discrepancias entre la información del proyecto de ejecución y como hoy en día se encuentra construida la cubierta. La principal diferencia es en los perfiles usados como barras para la cúpula; el proyecto asigna IPE 160 y HEB 160 mientras que al visitar el edificio se puede comprobar que las barras realmente usadas fueron perfiles rectangulares 140x60mm. Por ello se ha decidido realizar el modelo con los perfiles rectangulares. Para el resto de los perfiles se toma lo establecido en el proyecto de ejecución.

Tras definir los perfiles, se debe asignar el ángulo de inclinación del alma de las barras, puesto que una mayor o menor inclinación de esta puede producir cambios en la capacidad portante de las barras. Las barras de la cubierta se disponen con la cara larga del perfil orientada en perpendicular hacia el panel de vidrio (Figura 6-38). Esto significa que cada barra tiene una inclinación diferente de todas las demás. Debido a la dificultad que supone encontrar el ángulo exacto de inclinación de cada perfil, se ha optado por hacer una aproximación de todos ellos para facilitar el trabajo. La viga cajón inferior, se dispone con una inclinación de  $0^{\circ}$  de manera que su lado esté perpendicular a la brise-soleil del edificio (Figura 6-39). La viga cajón superior, a su vez, se dispone como una viga plana sobre los perfiles IPE 600. El alma de los perfiles IPE 600 se orienta perpendicular a la fachada acristalada, para resistir de manera más eficiente los empujes de viento que actúan sobre ella, y los travesaños cuadrados se colocan con su cara exterior alineada con la fachada.

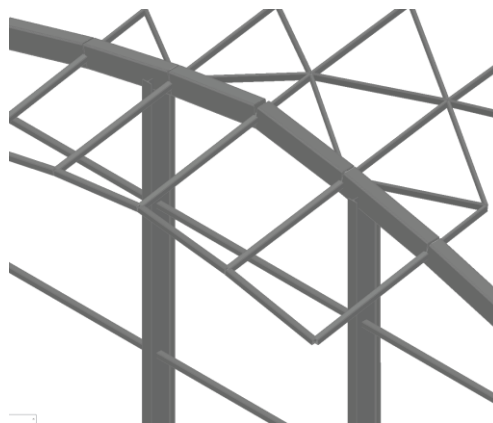


Figura 6-38. Detalle de las barras de la fachada con inclinación.



Figura 6-39. Detalle de la viga cajón de mirador con inclinación.

A continuación, se recoge una tabla resumen con las barras que forman parte de la estructura de estudio y el perfil que se les ha asignado (Figura 6-40).

PERFIL HUECO	
TIPO DE BARRA	PERFIL ASIGNADO
MALLA DE LA CUBIERTA	PHR 140 x 60 x 5
VIGA CAJÓN DEL MIRADOR	PHC UNE Ic 300 x 16
VIGA CAJÓN DE LA FACHADA	PHR UNE Ic 500 x 300 x 20
BARRAS DE LA VISERA	PHC UNE Ic 120 x 5
MONTANTES DEL CERRAMIENTO	IPE 600
TRAVESAÑOS DEL CERRAMIENTO	PHC UNE Ic 120 x 6,3

Figura 6-40. Tabla de barras y perfiles asignados.

En la Figura 6-41 se puede observar cómo estos perfiles han sido asignados en la estructura mediante códigos de colores. Mientras, en la Figura 6-42 se puede observar el entramado tridimensional que se genera cuando los perfiles toman la dimensión real que les corresponde en vez de estar idealizados como una línea.

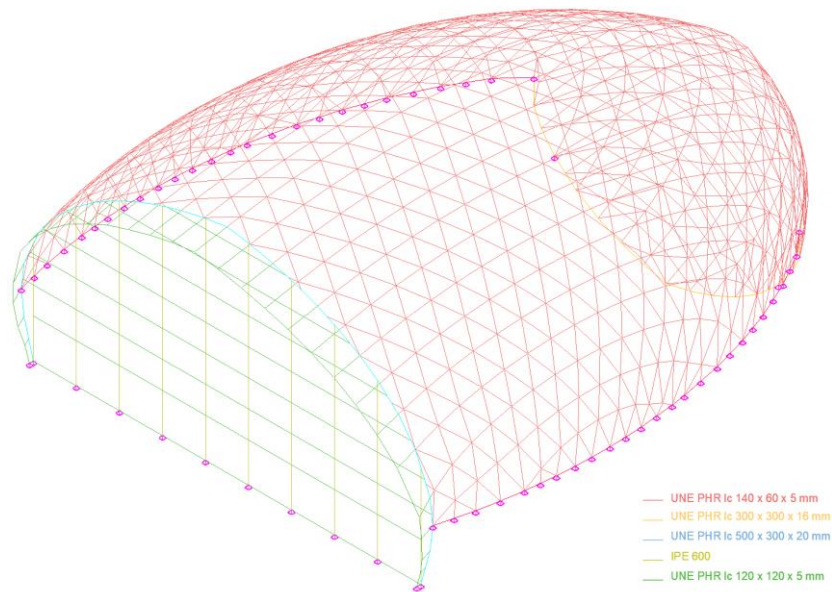


Figura 6-41. Perfiles asignados por colores

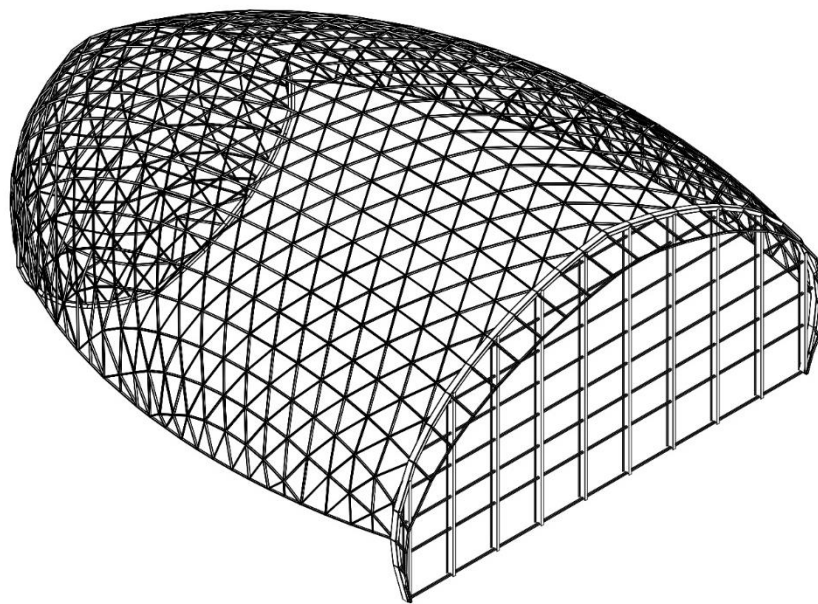


Figura 6-42. Modelo 3d de la estructura de barras.

Una vez que se ha finalizado el modelo de la estructura, se va a introducir en la aplicación de cálculo de Architrave. Esto va a permitir verificar que los perfiles asignados cumplen correctamente a tanto a resistencia, pandeo y flecha. Para la verificación del cumplimiento a resistencia se han empleado las configuraciones de carga establecidas en el programa de cálculo Architrave establecidas en la Figura 6-43 y en la Figura 6-44. Para el cálculo de flecha de las barras se han establecido limitaciones de flecha acorde con lo estipulado en el DB-SE [18] establecidas en la Figura 6-45. Para la limitación de flecha activa se ha establecido el criterio adaptado para edificios sin tabiques o sin tabiques ordinarios o pavimentos con juntas. Esto establece una limitación de flecha activa  $L/300$ . Para el confort de los usuarios del

edificio se ha limitado la flecha instantánea a L/350 y para asegurar una correcta apariencia de la obra se ha establecido el límite de flecha casi-permanente en L/300. Estos criterios figuran en el apartado 4.3.3.1 del apartado Aptitud al servicio del DB-SE[18].

	HIP 01	HIP 03	HIP 04	HIP 05	HIP 06
ELU 01	1,35	1,5			
ELU 02	1,35	1,5	0,9		
ELU 03	1,35	1,5		0,9	
ELU 04	1,35	1,5			0,9
ELU 05	1,35	0,75	1,5		
ELU 06	1,35	0,75		1,5	
ELU 07	1,35	0,75			1,5

Figura 6-43. Combinaciones de hipótesis Estado Límite Último.

	HIP 01	HIP 03	HIP 04	HIP 05	HIP 06
ELS 01	1	1	0,6		
ELS 02	1	1		0,6	
ELS 03	1	1		0,9	0,6
ELS 04	1	0,5	1		0,9
ELS 05	1	0,5		1	
ELS 06	1	0,5		1,5	1
ELS 07	1	0,2			
ELS 08	1		0,5		
ELS 09	1			0,5	
ELS 10	1				0,5
ELS 11	1				

Figura 6-44. Combinaciones de hipótesis Estado Límite de Servicio.

Coeficientes de seguridad

CTE  Coeficiente de minoración  $\gamma_{M0}$ : 1,05   
 Coeficiente de minoración  $\gamma_{M1}$ : 1,05   
 Coeficiente de minoración  $\gamma_{M2}$ : 1,25

Tipo de estructura para cálculo de flecha

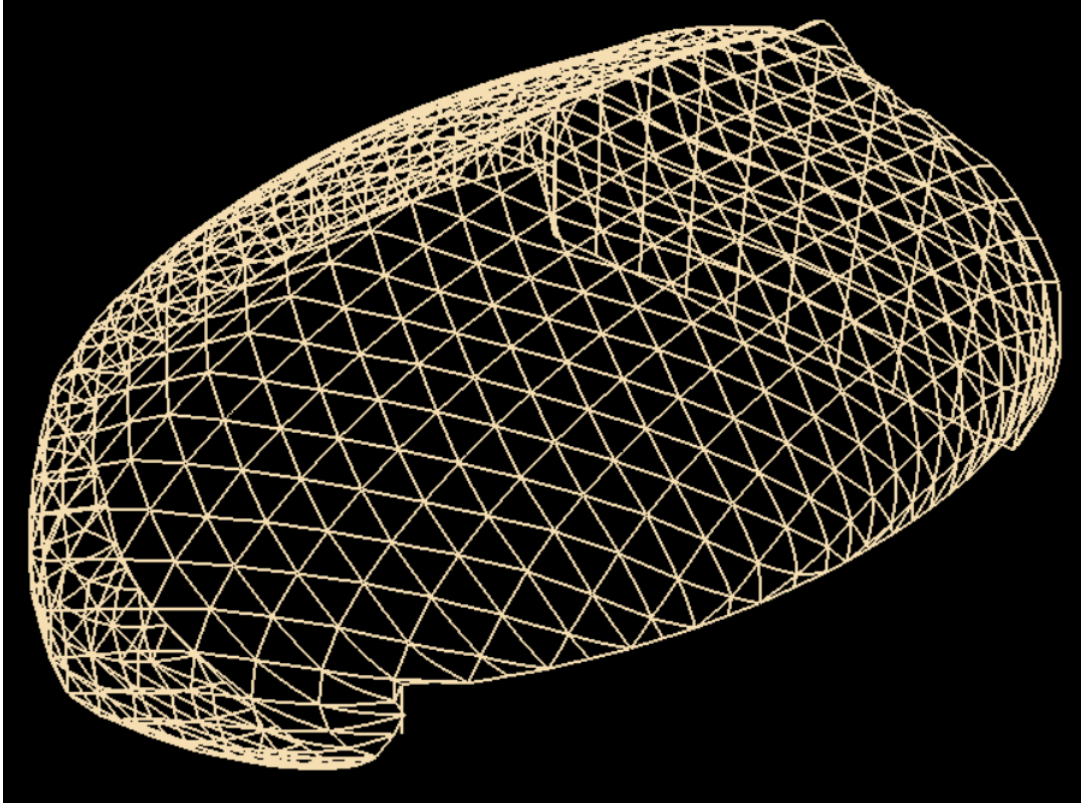
Cubierta ligera exterior  Carga F. activa / Carga total: 0,80   
 Carga F. instantánea / Carga total: 0,75   
 Carga F. casi-permanente / Carga total: 0,45

Limitaciones de flecha

Limitación flecha activa: L/300 (resto de los cas  L/ 300   
 Limitación flecha instantánea: L/350 (confort de usu  L/ 350   
 Limitación flecha casi-perm.: L/300 (apariencia de li  L/ 300

Figura 6-45. Coeficientes de minoración y limitación de flechas.

Una vez se han asignado los perfiles y se ha calculado la comprobación de las barras de la estructura podemos comprobar la deformada que toma la estructura bajo las acciones (Figura 6-46).



*Figura 6-46. Deformada de la estructura original.*



## **7. PROPUESTA DE MEJORA DE LA CUBIERTA EXISTENTE**

Una vez se ha realizado el modelo de la estructura, se han calculado las cargas permanentes y variables, se han asignado las secciones de las barras y se ha verificado que la estructura satisface las solicitaciones a resistencia y deformaciones; se va a iniciar el proceso de optimización de la estructura. Para ello, primero se debe de disponer de un objetivo a alcanzar: en este caso, lograr una reducción del peso. La optimización de la estructura pretende, mediante un proceso iterativo, lograr mediante el ajuste de las secciones de los perfiles, mejorar el aprovechamiento del acero eliminando la cantidad de material que no sea necesaria.

Para realizar un mejor proceso de optimización se van a estudiar además diferentes configuraciones alternativas de la estructura usando los siguientes parámetros:

### **7.1 FAMILIAS DE SECCIÓN**

Según el funcionamiento de la web de optimización VTAM, el proceso de optimización se realiza mediante diferentes grupos de barras establecidos en el modelo. Para lograr una mayor precisión en el optimizado se realizarán diferentes modelos con mayor número de familias para analizar mejor la variación del peso.

### **7.2 TIPO DE SECCIÓN**

Para obtener una mayor precisión en el proceso de optimización se reasignarán los perfiles con otros de diferentes familias, ya que VTAM solo considera perfiles de la misma familia cuando optimiza la estructura. Para esto se cambiará los tipos de familias de perfiles cerrados a familias de perfiles abiertos.

### **7.3 MODULACIÓN DE FACHADA**

Debido a la complejidad de la geometría, no es viable para la extensión de este trabajo cambiar la modulación o geometría de los triángulos que forman la cubierta. La zona de la estructura donde sí que se puede variar la geometría es en la fachada acristalada cambiando la modulación de los montantes y travesaños aumentando o reduciendo su separación.

### **7.4 MATERIAL**

No existe un único tipo de acero en edificación, sino que tenemos un gran número de tipos diferentes de aceros estructurales. Para este trabajo nos vamos a limitar a los aceros más convencionales que son el S275JR, el S235JR y el S355JR que quedan recogidos en el DB-SE-A [19]. Estos aceros presentan diferente límite elástico entre ellos como se puede ver en la Figura 7-1, donde varían sus propiedades resistentes siendo más resistente el S355JR, pero resultando más caro que las otras

dos variantes. Para el proceso de optimización, una vez se hayan seleccionado las mejores configuraciones de la estructura entre los tres tipos anteriores, se procederá a estudiar qué tipo de acero resulta mejor.

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )			Tensión de rotura $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100	
S235JR					20
S235J0	235	225	215	360	0
S235J2					-20
S275JR					20
S275J0	275	265	255	410	0
S275J2					-20
S355JR					20
S355J0	355	345	335	470	0
S355J2					-20
S355K2					-20 <sup>(1)</sup>
S450J0	450	430	410	550	0

<sup>(1)</sup> Se le exige una energía mínima de 40J.

Figura 7-1. Tipos de aceros estructurales.

Otro parámetro posible para lograr una optimización más ajustada de la estructura sería variar la geometría de esta. Esto se puede de varias maneras. Una de ellas es la adición o eliminación de barras, pero esto supone remodelar la malla de elementos finitos y, por lo tanto, la aplicación de cargas, lo que supone una cantidad de trabajo mucho mayor debido a la complejidad de la geometría de la estructura. Otra posibilidad empleada en las celosías metálicas es variar la distancia entre el cordón superior e inferior, cambiando así su canto y produciendo una redistribución de los esfuerzos. En este caso la malla estructural solo tiene una capa por lo que esta opción tampoco es viable. Por último, se podrían estudiar otras configuraciones que en vez de triángulos utilicen otro tipo de forma geométrica como, por ejemplo, cuadrados. Este caso presenta también el problema de necesitar la generación de otra geometría de barras y elementos finitos, afectando a la aplicación de cargas que como se ha mencionado anteriormente, supone una mucho mayor carga de trabajo.

## 8. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

### 8.1 Introducción a la optimización

La primera parte del proceso es la modelización de la estructura. Como se ha mencionado en el apartado 6, se debe realizar un modelo tridimensional mediante barras y 3dcaras que represente la estructura de estudio. Para ello Architrave implementa una herramienta que se utiliza en el programa AutoCAD para asignar secciones, materiales y cargas a los elementos dibujados. Las líneas que componen la estructura de la cúpula se asignarán en capas que representan “familias”. Estas familias de barras llevan asignadas un tipo de perfil que satisface los estados límite de las acciones actuantes.

Una vez completado el proceso de modelizado se toman los perfiles asignados y se realiza una estimación del peso inicial de la cúpula, que puede verse definido en la Figura 8-1.

PERFIL HUECO				
TIPO DE BARRA	PERFIL ASIGNADO	PESO LINEAL kg/m	PESO DEL CONJUNTO Kg	FRACCIÓN DEL TOTAL
MALLA DE LA CUBIERTA	PHR 140 x 60 x 5	14,8	60119,968	56,32%
VIGA CAJÓN DEL MIRADOR	PHC UNE lc 300 x 16	142,42	4991,821	4,68%
VIGA CAJÓN DE LA FACHADA	PHR UNE lc 500 x 300 x 20	238,85	14832,585	13,90%
BARRAS DE LA VISERA	PHC UNE lc 120 x 5	17,9	2114,885	1,98%
MONTANTES DEL CERRAMIENTO	IPE 600	122	19228,42	18,01%
TRAVESAÑOS DEL CERRAMIENTO	PHC UNE lc 120 x 6,3	22,3	5455,472	5,11%
			106743,151	

Figura 8-1. Tabla de asignación de perfiles huecos y cálculo del peso total.

Una vez se han realizado los cálculos y la estructura está correctamente dimensionada, se puede importar la estructura a la web de optimización VTAM [2] para encontrar una combinación de perfiles que, presentando menor peso, mantenga el cumplimiento de las solicitaciones. El proceso que sigue Architrave para la optimización se basa en un método heurístico. Cuando procesa una estructura, los perfiles son analizados por “familias”. Las familias son grupos de barras que tienen un mismo perfil asignado. Cuando VTAM optimiza la estructura toma la barra más solicitada de cada familia, le asigna el perfil necesario para que se resistan las cargas y luego asigna el mismo perfil al resto de barras de la misma familia. Este proceso se repite por cada familia de barras. De este modo podemos utilizar las familias de barras para lograr un mayor ajuste de la estructura optimizada.

Para comprender bien esto se puede considerar una estructura formada por dos barras. Si se asume que cada barra configura una familia y que a cada familia se le pueden asignar 10 perfiles diferentes, supone 100 combinaciones posibles de la estructura. Si la estructura tiene 3 barras, el número de combinaciones asciende a  $10^3$ . La estructura de la cubierta del Centro de Eventos tiene 1796 barras. Si cada barra conformara una familia, habría un total de  $10^{1796}$  combinaciones, habría más

combinaciones que átomos en el universo observable. Esto, evidentemente, sería un cálculo del todo inasumible por los procesadores de los ordenadores. Por ello, las familias se agruparán varias barras en función de la carga que reciban. Esta asignación intentará colocar juntas a las barras más solicitadas y a las que menos lo estén. Mediante la herramienta de análisis y cálculo de Architrave podemos consultar los diagramas de axiles, momentos flectores y cortantes para realizar una asignación adecuada.

Al finalizar el proceso de optimizado se pueden consultar las configuraciones que sí satisfacen el cumplimiento de los estados límite y el peso de cada una de ellas.

Para guiar a VTAM en el proceso de optimizado, se utilizarán dos ficheros. Uno de ellos es el fichero de intercambio de Architrave o archivo AVEX. Este fichero contiene el modelo estructural, las cargas, la asignación de perfiles y la asignación de materiales de los elementos finitos. El otro archivo es un documento de texto llamado "Fichero de Argumentos". Este fichero contiene las directrices que ha de seguir VTAM a la hora de considerar una configuración como válida o no, los parámetros que figuran en el documento son, entre otros: el tipo de estructura, la resistencia a tracción y compresión del acero utilizado, los desplazamientos máximos admisibles, el número de cálculos simultáneos que se realizarán, etc.

## 8.2 Proceso de optimizado

En este momento se podría introducir el modelo realizado de la estructura y obtener la configuración de menor peso para las series de perfiles introducidas. De todos modos, esto presenta ciertas limitaciones: la única variable utilizado en la optimización es el tipo de perfil que se va a asignar a cada barra y, como se ha visto en el capítulo 7, hay un mayor número de variables que se pueden tener en cuenta a la hora de optimizar la estructura, entre ellas el número de familias definidas, la modulación de la fachada, la serie de perfiles empleada o el tipo de material. En otros casos también podría llegar a modificarse la geometría o la conexión de los cordones si fuera una celosía de varios cordones, pero como se ha podido ver a lo largo del trabajo, la estructura presenta una geometría muy rígida que no admite variaciones sin cambiar de manera sustancial, conllevando mucho más trabajo. Finalmente se van a definir 3 variables en torno a las cuales se van a generar 18 modelos estructurales diferentes. Esto permitirá un mayor abanico de posibilidades y una mayor precisión en la optimización. Las variables a definir son:

- Familias de barras. El número de familias de barras en los modelos generados variará entre 6, 13 y 20. Esto permitirá alcanzar una mayor precisión en el proceso de optimizado y estudiar cuanto afecta el incremento de familias al peso de las configuraciones estructurales.
- Modulación de fachada. Los modelos presentarán distintas modulaciones de fachada que presenten mayor y menor luz que la fachada original. La modulación variará entre luces de 4 metros entre los soportes (fachada inicial), 5.14 metros o 3.27 metros de separación. Los travesaños también sufrirán cambios pasando de 2.5 m de separación en la fachada inicial a 3.43 metros o 1.8 metros.
- Clase de sección. Los modelos generados podrán tener 2 tipos de sección asignadas: sección hueca (original de proyecto) o sección abierta (HEB o IPE).

- Material: una vez se haya escogido la mejor combinación de entre las 18 posibles se procederá a estudiar el comportamiento de diferentes calidades de acero como el 355.

Estas variables combinadas nos generan un total de 18 combinaciones. Para poder distinguirlas se va a generar una nomenclatura.

ST\_Gxx\_Fx\_ORG/ALT

siendo:

ST: estructura

Gxx: número de familias

G6: 6 familias de barras

G13: 13 familias de barras

G20: 20 familias de barras

Fx: modulación de fachada

F1: modulación grande

F2: modulación original

F3: modulación reducida

ORG/ALT: tipo de sección asignada

ORG: Secciones huecas originales

ALT: Secciones abiertas alternativas

Para la asignación de secciones abiertas se ha calculado el peso inicial de la cúpula con ese tipo de perfilería y puede consultarse en la Figura 8-2.

PERFIL ABIERTO				
TIPO DE BARRA	PERFIL ASIGNADO	PESO LINEAL kg/m	PESO DEL CONJUNTO Kg	FRACCIÓN DEL TOTAL
MALLA DE LA CUBIERTA	HEB 160	42,6	173048,016	79,30%
VIGA CAJÓN DEL MIRADOR	HEB 300	117	4100,85	1,88%
VIGA CAJÓN DE LA FACHADA	HEB 400	155	9625,5	4,41%
BARRAS DE LA VISERA	HEB 140	33,7	3981,655	1,82%
MONTANTES DEL CERRAMIENTO	IPE 600	122	19228,42	8,81%
TRAVESAÑOS DEL CERRAMIENTO	HEB 140	33,7	8244,368	3,78%
			218228,809	

Figura 8-2. Tabla de asignación de perfiles abiertos y cálculo del peso

### 8.3 Funcionamiento de VTAM [20] y fichero de argumentos [21]

VTAM, también llamado Vast Territories Aerial Mapping, es un algoritmo que busca la mejor ubicación para emplazamientos humanos en territorios basándose en la topografía. Los terrenos se visualizan como mapas tridimensionales donde los puntos más altos son colinas y los más bajos, valles (Figura 8-3). VTAM aporta una solución relacionada con el coste aplicado a la altura de las colinas o valles. Además, considera otros factores: coste de la estructura total y si la estructura es estable ante las solicitaciones. Para aplicar esto al mapa tridimensional de montañas y valles se considerará un nivel del mar (Figura 8-4). Toda configuración que caiga por debajo de este nivel será porque no cumpla con las limitaciones impuestas de diseño. En consecuencia, todo lo que se sitúe en un nivel muy elevado significará que esa configuración posee un coste excesivo. El objetivo es encontrar un punto cercano al nivel del mar o a un lago donde se garantice el cumplimiento de la estructura con un coste más reducido.

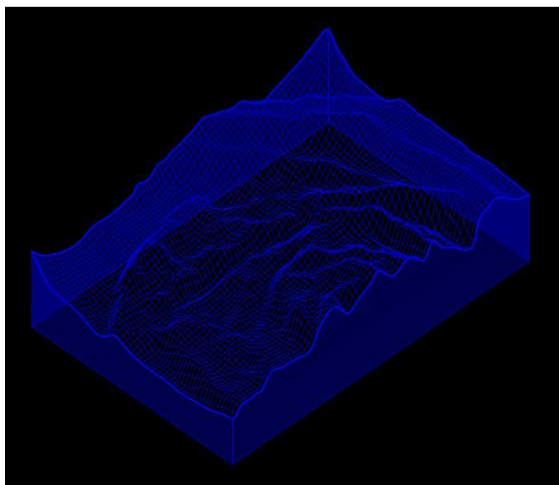


Figura 8-3. Mapa topográfico relacionando los puntos con el coste.

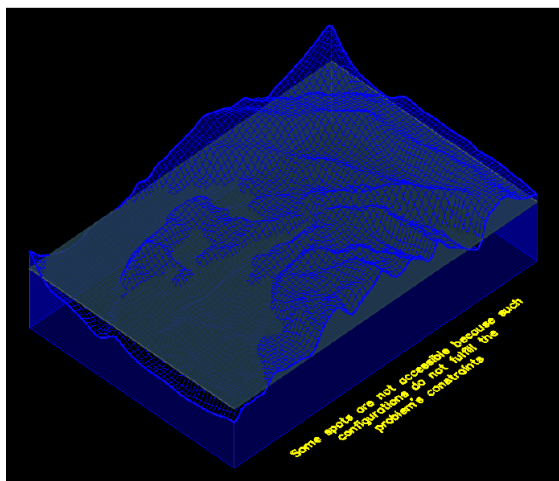


Figura 8-4. Mapa topográfico con nivel del mar añadido.

Obtener la mejor solución es ciertamente utópico usando este algoritmo, pues eso implicaría haber calculado cada tipo de combinación de estructura, y haberlas comparado entre ellas. Esta es una desventaja de este tipo de algoritmo. Esto es debido a que una vez VTAM encuentra una potencial solución, explorará la zona cercana en busca de más soluciones. Puede que esto no ocurra y que el algoritmo

quede atascado en un valle, que, aunque sea un mínimo local, no sea el mínimo absoluto de la región. Para afrontar esto se recomienda que una vez VTAM entrega los resultados, se revisen para comprobar la configuración que ha realizado el algoritmo, pudiendo modificarse para realizar otros procesos de reoptimizado de la estructura, afinando cada vez más la solución.

Para realizar las configuraciones, VTAM asigna puntos de altitud y coste de esta. Cada punto tendrá asignado tendrá diferentes familias que enviarán “exploradores” para tantear como son los alrededores del punto, siendo el punto más bajo el que pasará a ser la mejor solución, llamada “buque insignia”. Una vez los exploradores recopilan datos de esos buques insignia, la solución más alta se descarta y los exploradores viajan hasta la mejor ubicación (Figura 8-5). A lo largo de este viaje se van definiendo puntos que, si las elevaciones son mejores que las del buque insignia, se convertirá a ese punto en el nuevo buque insignia y se repite el proceso. Esta iteración se realiza hasta que los puntos se encuentran en un solo grupo.

Evidentemente, cuando se encuentra una solución local óptima, podría encontrarse una solución mejor cerca, al igual que el punto considerado óptimo podría ser solo un óptimo local. De todos modos, en la generación, al traducir los puntos generados en grupos formados al azar, hay una alta probabilidad de detectar un punto por debajo. Para realizar este proceso, VTAM se sirve de un conjunto de ordenadores con 2 núcleos cada uno (Figura 8-7) que se van compartiendo la mejor solución de uno a otro a medida que van finalizando los procesos. Es decir, si tenemos 4 procesadores trabajando, se lanzarán 4 trabajos iniciales, una vez termine el primero, compartirá su solución con el resto y la mejor de los 4 se usará para lanzar siguientes trabajos.

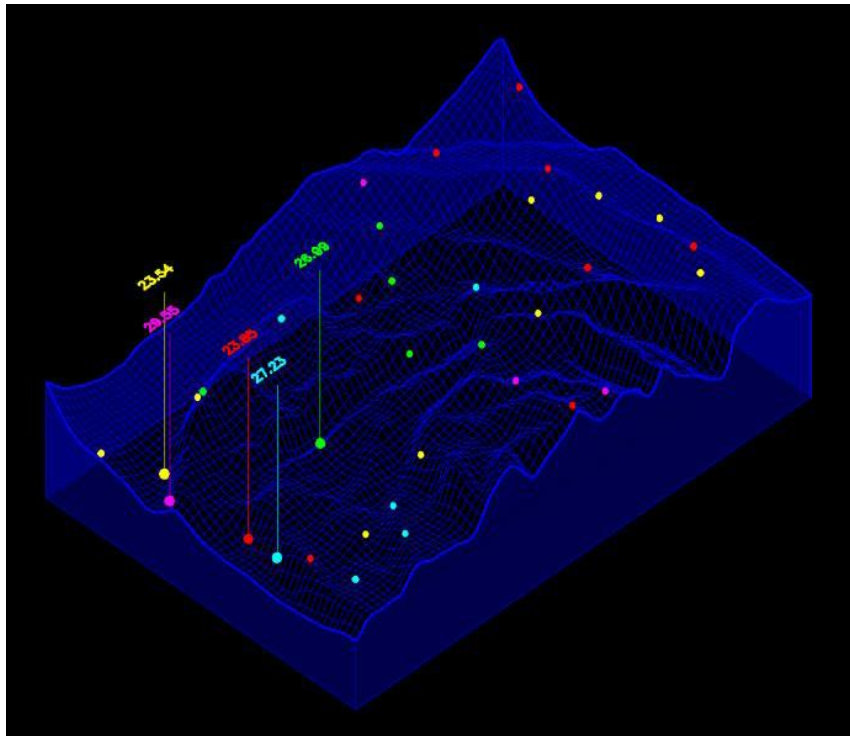


Figura 8-5. Visualización del proceso iterativo de búsqueda de VTAM.

Para poder iniciar el proceso de optimización en VTAM, aparte del fichero AVEX, se necesita aportar un fichero de argumentos para guiar el proceso de optimización. A continuación, se muestra un ejemplo de uno de estos documentos (Figura 8-6) y se detallan ciertos aspectos del documento que serán las variables que manejaremos para la optimización.

```

** ProblemNameAndType **
STG20F20RG_STEEL3DFRAME_Shell
** StructuralModelGeneration **
ARCHITRAVE_AVEX
** Analysis **
SIMEST
** Cycles **
1
** HotSpots **
1
** TotalNumberOfSpots **
15
** TuningParameters **
100_RandomUnif_VTAM01_0_1_0_1_LevyFlights
** ShowMap **
0
** OnlyOKconfig **
0
** CheckConstraintsBeforeCostEvaluation **
0
** SystematicSearch **
0
** WriteFileResults **
1
** ConfigurationToBeChecked **

SET SPECIFIC PARAMETERS

** LimitStates **
1

** SteelStrength ** kN/m2
275000 275000

** MaximumAllowedMovements ** mm
50 50 100

** StructuralCheckings **
CheckSteelBarStrength CheckDisplacements

** EvaluationCriteria **
SteelSectionsWeight

** CostAppraisalComponents **
SteelWeightAndBuiltUpCosts

** OptimisationFields **
1 0 0 0 0
    
```

Figura 8-6. Fichero de argumentos.



Figura 8-7. Despacho en la ETSAV con los ordenadores de cálculo.

**ProblemNameAndType.** En este campo se define el nombre del proceso y el tipo de estructura que se va a optimizar. El tipo de estructura es un Steel 3d Frame, una estructura de barras de acero tridimensional. El sufijo Shell indica que es una cúpula.

**StructureModelGeneration.** Este campo indica el tipo de fichero de estructura que se importa, en este caso, un fichero de intercambio entre AutoCAD y Architrave con la extensión .avex.

**LimitStates.** El número 1 indica que **SÍ** se realizan las comprobaciones de las barras conforme a todos los Estados Límites Últimos definidos que pueden consultarse en la Figura 6-43.

**SteelStrength.** Este campo indica la resistencia del acero a compresión y a tracción. Para las optimizaciones se va a emplear acero S275JR.

**MaximumAllowedMovements.** Este campo indica los movimientos máximos permitidos a los nudos de la cúpula. Los movimientos horizontales, que se dan en la mitad de la altura de la cúpula tal y como se ve en la Figura 6-46. Para ello se han



limitado a  $1/220$  de la media altura de la cúpula. Para el movimiento vertical de los nudos, se ha impuesto una limitación de  $1/420$  de la altura de la cúpula para estar del lado de la seguridad.

**StructuralCheckings.** En este campo figuran las comprobaciones que realizará VTAM. Las barras se comprobarán a resistencia y se comprobará que los movimientos de los nudos cumplen con las limitaciones impuestas.

## 8.4 Generación de iteraciones y optimizado

A continuación, se exponen las diferentes propuestas, como se han definido, los perfiles utilizados y el resultado del proceso de optimizado:

### 8.4.1 MODELOS DE 6 FAMILIAS

#### ST\_G6\_F1\_ORG

Para esta configuración se han designado 6 grupos de barras, manteniendo la asignación original y estableciendo una modulación en fachada con 5.14 metros de separación entre soportes y 3.43 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-8, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

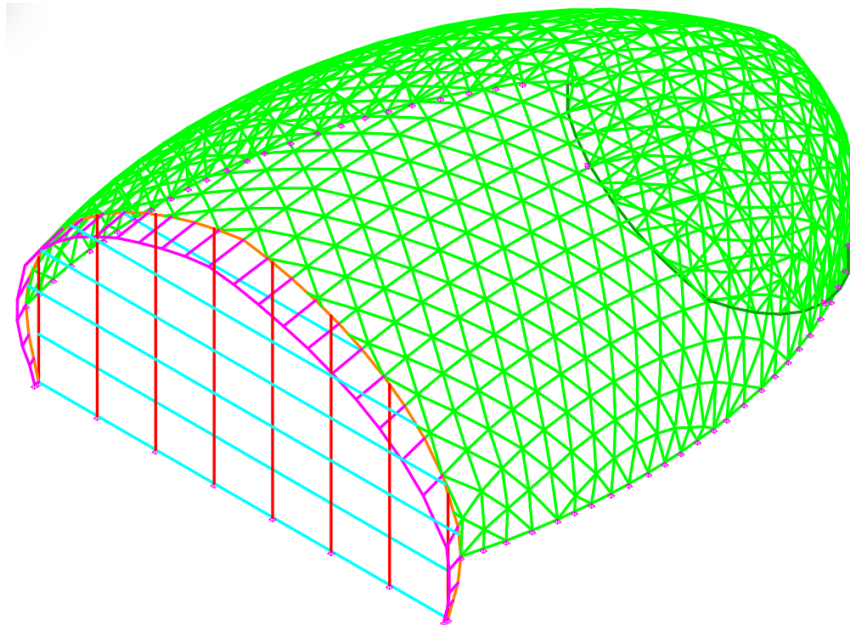


Figura 8-8. Modelo estructural ST\_G6\_F1\_ORG.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-9).

ST_G6_F1_ORG						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	1683	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 80 x 4	44277,653	69,82%
Travesaños de la fachada	2	6	PHC UNE lc 120 x 5	PHC UNE lc 100 x 100 x 5	2916,34	4,60%
Viga Cajón Fachada	3	26	PHR UNE lc 500 x 300 x 20	PHR UNE lc 250 x 150 x 6.3	2377,809	3,75%
Viga Cajón Mirador	4	16	PHC UNE lc 300 x 16	PHC UNE lc 220 x 220 x 6.3	1480,9344	2,34%
Soportes de la fachada	5	8	IPE 600	IPE 550	13142,94	20,72%
Visera de la cúpula	6	57	PHC UNE lc 120 x 8	PHC UNE lc 70 x 70 x 4	777,7008	1,23%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	63419,03					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	39,98%					

Figura 8-9. Tabla de perfiles optimizados ST\_G6\_F1\_ORG.

### ST\_G6\_F1\_ALT

Para la configuración de este modelo, se han designado 6 grupos de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas HEB e IPE. Se ha establecido una modulación en fachada con 5.14 metros de separación entre soportes y 3.43 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-10, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

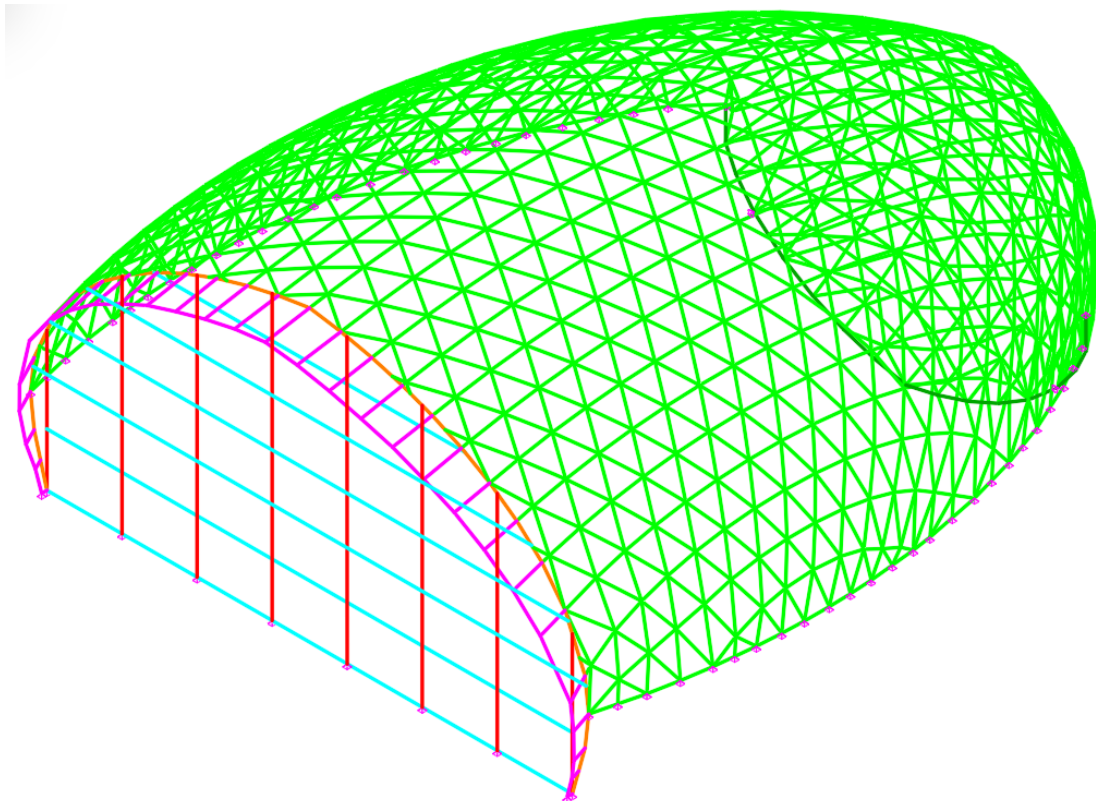


Figura 8-10. Modelo estructural ST\_G6\_F1\_ALT.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-11).

ST_G6_F1_ALT						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	1683	HEB 160	HEB 100	82868,268	75,22%
Travesaños de la fachada	2	6	HEB 140	HEB 120	5261,235	4,78%
Viga Cajón Fachada	3	26	HEB 400	HEB 140	2092,77	1,90%
Viga Cajón Mirador	4	16	HEB 300	HEB 260	3260,58	2,96%
Soportes de la fachada	5	8	IPE600	IPE 550	13142,94	11,93%
Visera de la cúpula	6	57	HEB 140	HEB 100	3090,627	2,81%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	110171,57					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	49,52%					

Figura 8-11. Tabla de perfiles optimizados ST\_G6\_F1\_ALT.

### ST\_G6\_F2\_ORG

Este modelo, presenta 6 familias de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones huecas. Se ha establecido una modulación en fachada con 4 metros de separación entre soportes y 2.5 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-12, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

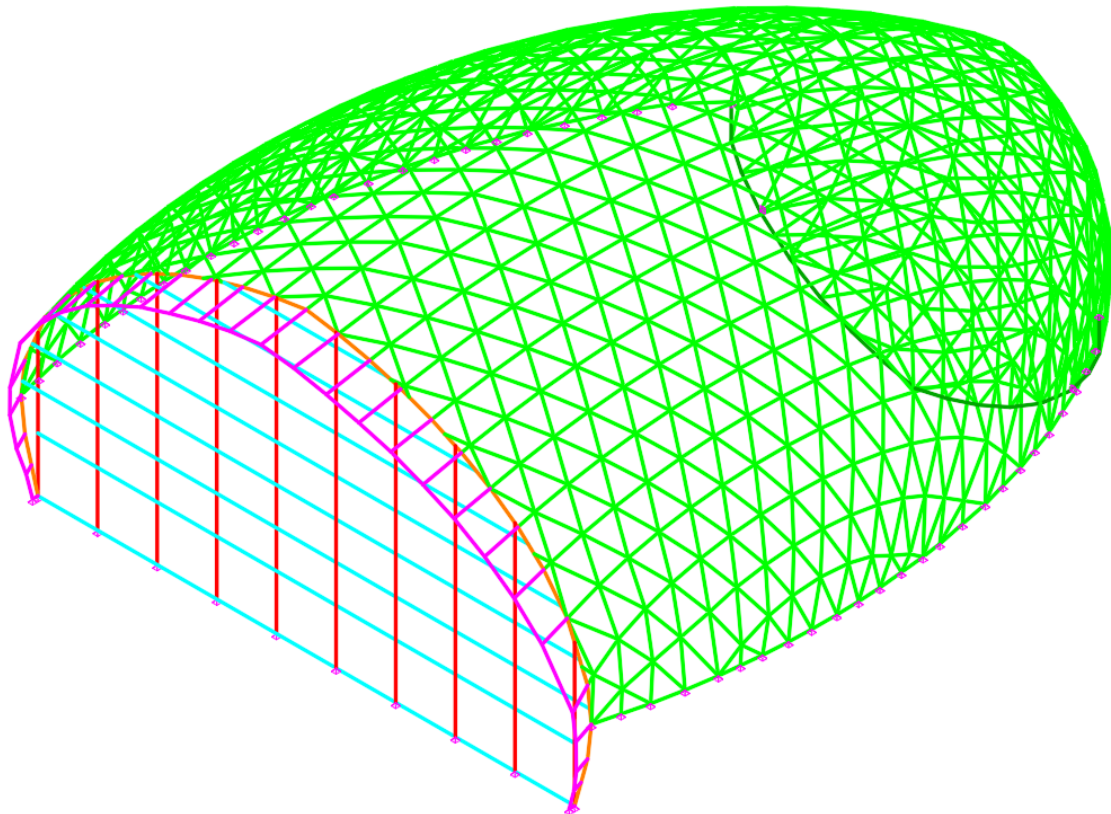


Figura 8-12. Modelo estructural ST\_G6\_F2\_ORG.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-13).

ST_G6_F2_ORG						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	1683	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 80 x 4	44277,653	69,01%
Travesaños de la fachada	2	8	PHC UNE Ic 120 x 5	PHC UNE Ic 90 x 90 x 3	2025,6192	3,16%
Viga Cajón Fachada	3	26	PHR UNE Ic 500 x 300 x 20	PHR UNE Ic 350 x 250 x 6.3	3604,905	5,62%
Viga Cajón Mirador	4	16	PHC UNE Ic 300 x 16	PHC UNE Ic 220 x 220 x 6.3	1480,9344	2,31%
Soportes de la fachada	5	10	IPE 600	IPE 500	14295,227	22,28%
Vísera de la cúpula	6	57	PHC UNE Ic 120 x 6,3	PHC UNE Ic 80 x 80 x 3,2	707,0841	1,10%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>				64165,37		
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>				39,28%		

Figura 8-13. Tabla de perfiles optimizados ST\_G6\_F2\_ORG.

### ST\_G6\_F2\_ALT

Esta configuración, presenta 6 familias de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas. Se ha establecido una modulación en fachada con 4 metros de separación entre soportes y 2.5 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-14, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

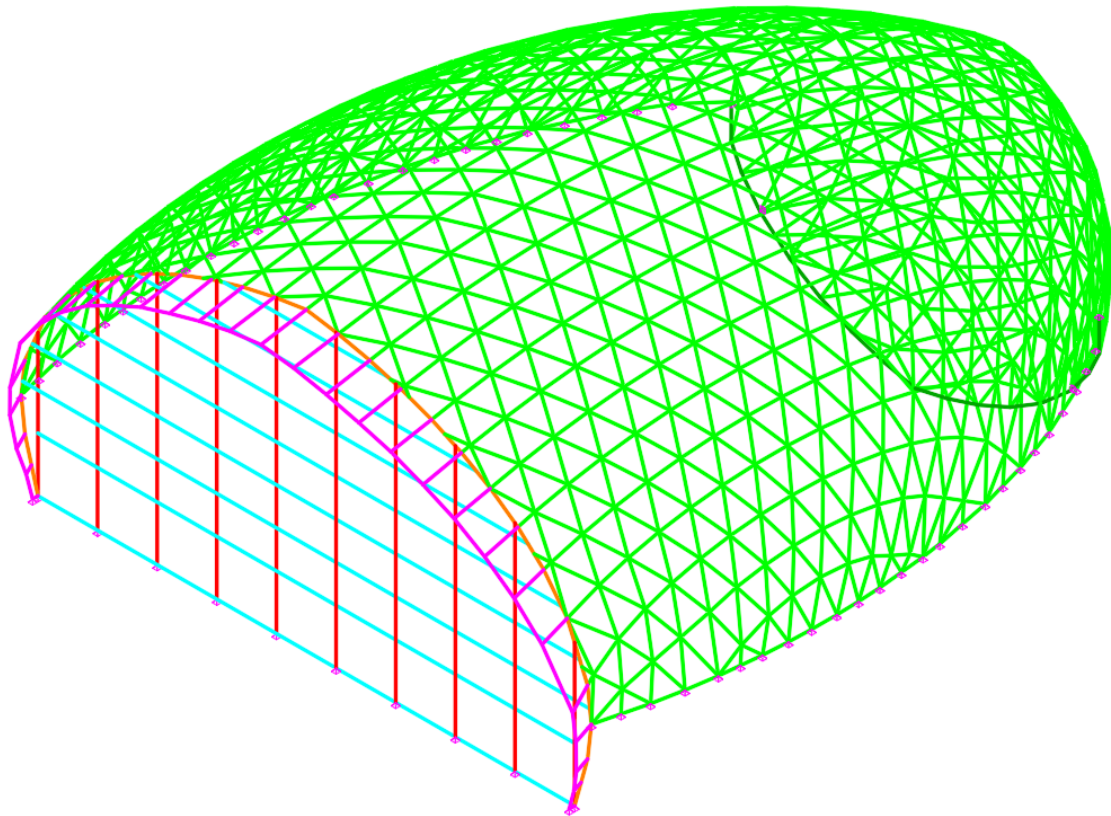


Figura 8-14. Modelo estructural ST\_G6\_F2\_ALT.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-15).

ST_G6_F2_ALT							
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO	
Barras de la cubierta	1	1683	HEB 160	HEB 100	82868,268	73,23%	
Travesaños de la fachada	2	8	HEB 140	HEB 100	4990,656	4,41%	
Viga Cajón Fachada	3	26	HEB 400	HEB 140	2092,77	1,85%	
Viga Cajón Mirador	4	16	HEB 300	HEB 160	1493,556	1,32%	
Soportes de la fachada	5	10	IPE600	IPE 550	16706,66	14,76%	
Visera de la cúpula	6	57	HEB 140	HEB 100	1870,884	1,65%	
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	113156,8						
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	48,15%						

Figura 8-15. Tabla de perfiles optimizados ST\_G6\_F2\_ALT.

### ST\_G6\_F3\_ORG

Este modelo, presenta 6 familias de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones huecas. Se ha establecido una modulación en fachada con 3.27 metros de separación entre soportes y 1.8 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-16, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

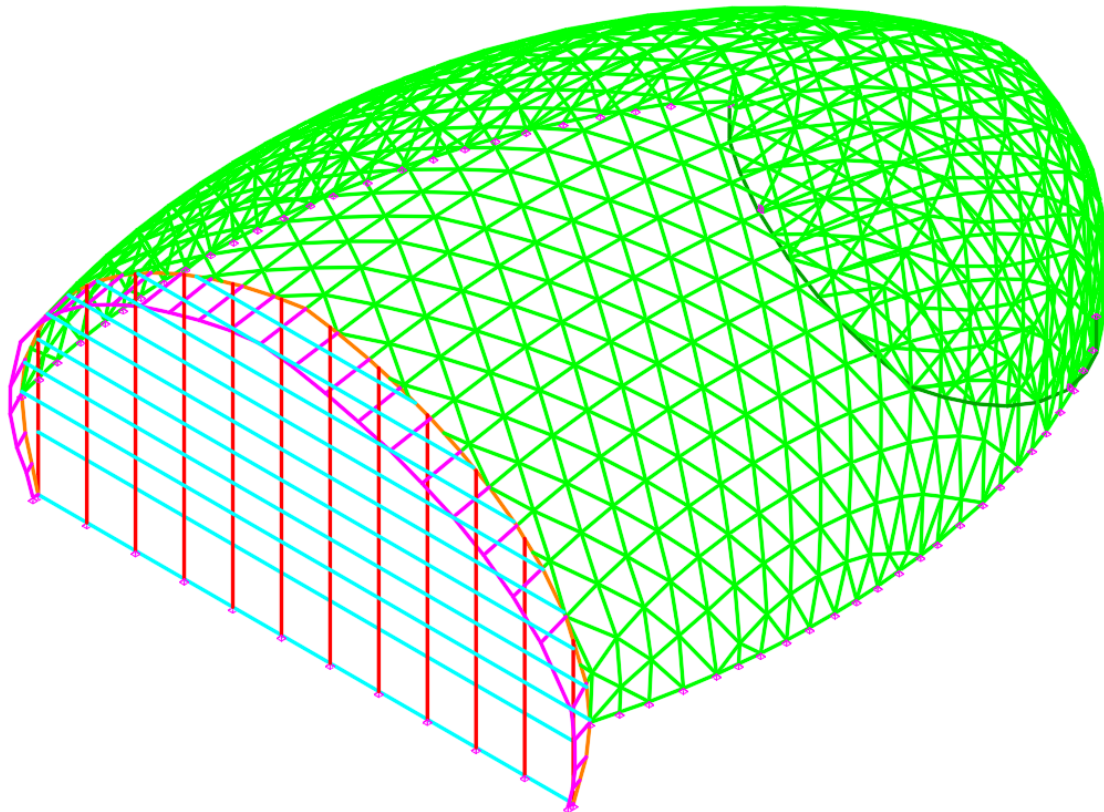


Figura 8-16. Modelo estructural ST\_G6\_F3\_ORG.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-17).

ST_G6_F3_ORG						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	1683	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 80 x 4	44277,653	66,01%
Travesaños de la fachada	2	10	PHC UNE Ic 120 x 5	PHC UNE Ic 70 x 70 x 3,2	2116,999	3,16%
Viga Cajón Fachada	3	26	PHR UNE Ic 500 x 300 x 20	PHR UNE Ic 260 x 180 x 8	3304,341	4,93%
Viga Cajón Mirador	4	16	PHC UNE Ic 300 x 16	PHC UNE Ic 220 x 220 x 6.3	1480,9344	2,21%
Soportes de la fachada	5	12	IPE 600	IPE 500	17320,979	25,82%
Visera de la cúpula	6	57	PHC UNE Ic 120 x 6,3	PHC UNE Ic 80 x 80 x 3,2	707,0841	1,05%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	67072,93					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	36,52%					

Figura 8-17. Tabla de perfiles optimizados ST\_G6\_F3\_ORG.

### ST\_G6\_F3\_ALT

Este modelo, presenta 6 familias de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas. Se ha establecido una modulación en fachada con 3.27 metros de separación entre soportes y 1.8 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-18, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

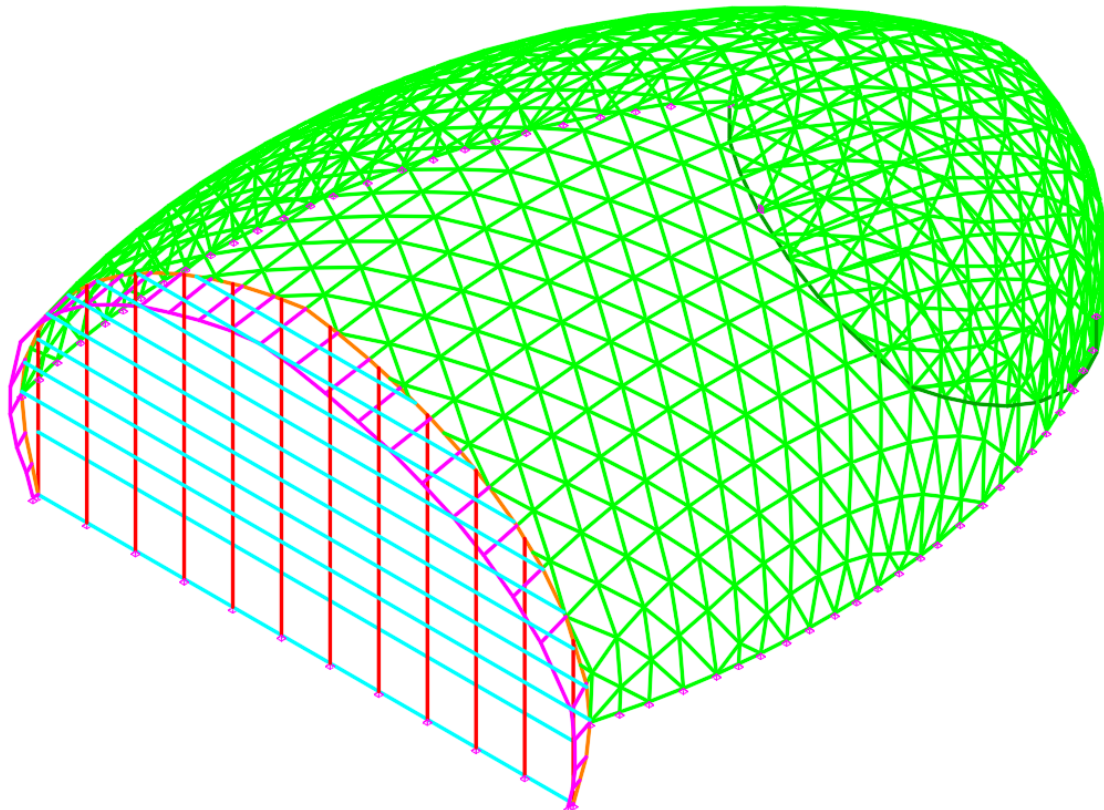


Figura 8-18. Modelo estructural ST\_G6\_F3\_ALT.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-19).

ST_G6_F3_ALT						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	1683	HEB 160	HEB 100	82868,268	72,35%
Travesaños de la fachada	2	10	HEB 140	HEB 100	6445,788	5,63%
Viga Cajón Fachada	3	26	HEB 400	HEB 120	1658,07	1,45%
Viga Cajón Mirador	4	16	HEB 300	HEB 260	3260,58	2,85%
Soportes de la fachada	5	12	IPE600	IPE 500	17320,979	15,12%
Visera de la cúpula	6	57	HEB 140	HEB 100	1870,884	1,63%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	114544,32					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	47,51%					

Figura 8-19. Tabla de perfiles optimizados ST\_G6\_F3\_ALT.

En el primer proceso de optimización, se observan reducciones de peso sustanciales respecto al peso inicial. Se observa que las reducciones iniciales de peso rondan valores entre el 35 y el 50%. Pese a tener reducciones de peso relativamente similares, los modelos que utilizan perfiles huecos presentan un peso mucho menor que los modelos que utilizan perfiles abiertos. Por ahora la configuración que menor peso presenta es la **ST\_G6\_F1\_ORG** con un peso total de 63.419,03 kg.



### 8.4.2 MODELOS DE 13 FAMILIAS

#### ST\_G13\_F1\_ORG

Para esta configuración se han designado 13 grupos de barras, manteniendo la asignación original y estableciendo una modulación en fachada con 5.14 metros de separación entre soportes y 3.43 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-20, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

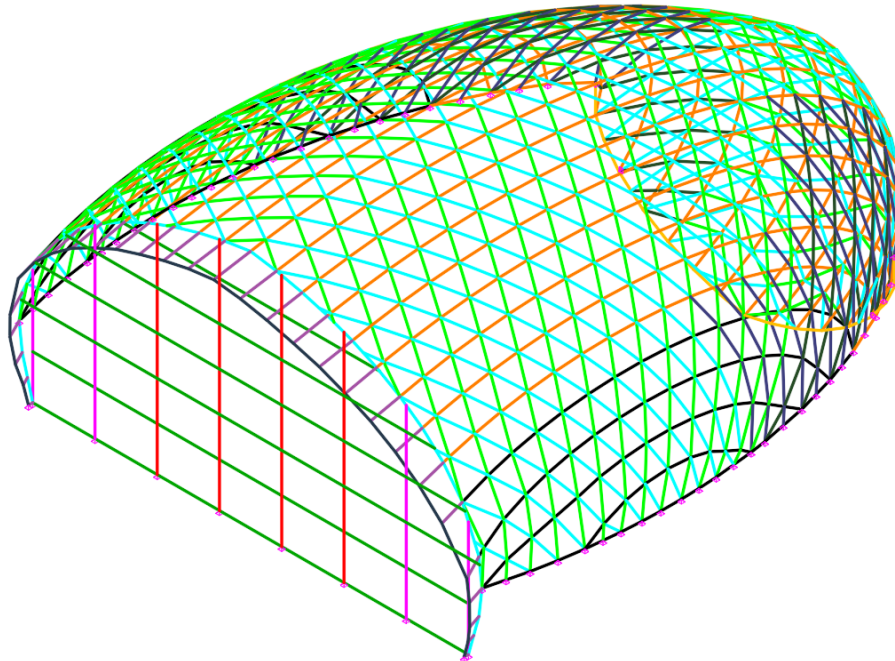


Figura 8-20. Modelo estructural ST\_G13\_F1\_ORG.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-21).

ST_G13_F1_ORG						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	444	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 60 x 4	10368,5136	17,18%
	2	440		PHR 100x 80 x 4	12082,759	20,02%
	3	435		PHR 100 x 80 x 4	10575,071	17,52%
	11	144		PHR 100 x 80 x 4	3102,685	5,14%
	12	112		PHR 120 x 80 x 4	3683,169	6,10%
	13	108		PHR 120 x 80 x 4	3503,717	5,80%
Travesaños de la fachada	4	6	PHC UNE lc 120 x 120 x 5	PHR UNE lc 120 x 120 x 5	3527,195	5,84%
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 550	7901,24	13,09%
	6	4		IPE 360	2823,595	4,68%
Viga Cajón Fachada	7	26	PHR UNE lc 500 x 300 x 20	PHR UNE lc 250 x 150 x 6,3	2377,809	3,94%
Viga Cajón Mirador	8	16	PHC UNE lc 300 x 300 x 16	PHC UNE lc 200 x 200 x 6,3	1342,0968	2,22%
Visera de la cúpula	9	29	PHC UNE lc 120 x 120 x 6,3	PHC UNE lc 40 x 40 x 3,2	112,7295	0,19%
	10	28		PHC UNE lc 70 x 70 x 4	518,6368	0,86%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	60365,82					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	42,87%					

Figura 8-21. Tablas de perfiles optimizados ST\_G13\_F1\_ORG.

### ST\_G13\_F1\_ALT

Para la configuración de este modelo, se han designado 13 grupos de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas HEB e IPE. Se ha establecido una modulación en fachada con 5.14 metros de separación entre soportes y 3.43 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-22, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

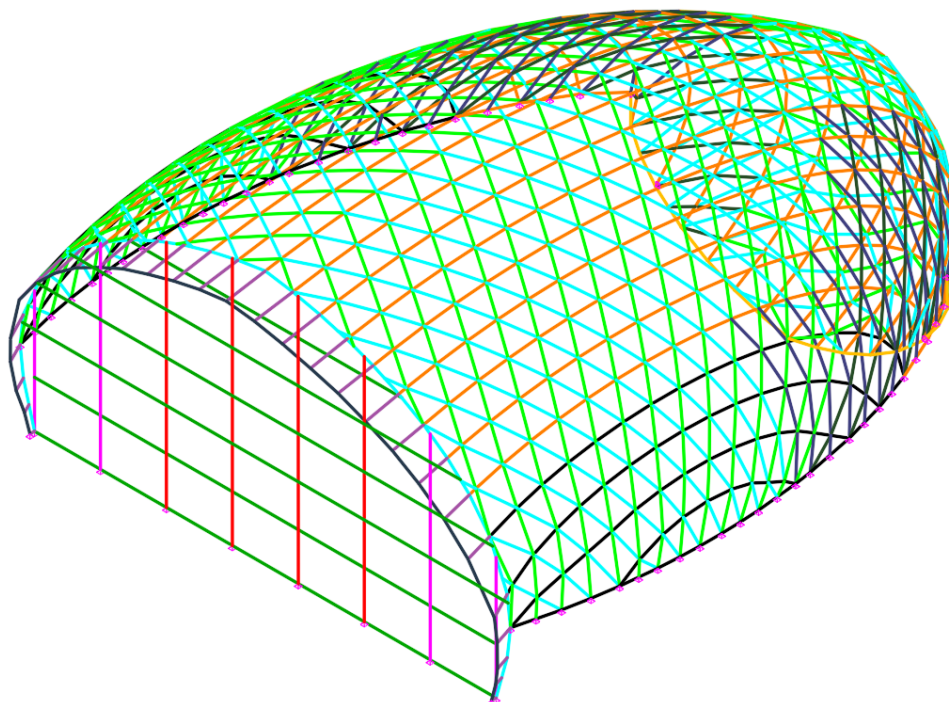


Figura 8-22. Modelo estructural ST\_G13\_F1\_ALT.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-23).

ST_G13_F1_ALT						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	444	HEB 160	HEB 100	22335,552	20,54%
	2	440		HEB 100	22613,604	20,80%
	3	435		HEB 100	19791,876	18,20%
	11	144		HEB 100	5806,86	5,34%
	12	112		HEB 100	6314,004	5,81%
	13	108		HEB 100	6006,372	5,52%
Travesaños de la fachada	4	6	HEB 140	HEB 120	5261,235	4,84%
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 550	7901,24	7,27%
	6	4		IPE 400	3278,535	3,02%
Viga Cajón Fachada	7	26	HEB 400	HEB 140	2092,77	1,92%
Viga Cajón Mirador	8	16	HEB 300	HEB 260	3260,58	3,00%
Visera de la cúpula	9	29	HEB 140	HEB 140	1029,535	0,95%
	10	28		HEB 100	1247,664	1,15%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>				108727,35		
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>				50,18%		

Figura 8-23. Tabla de perfiles optimizados ST\_G13\_F1\_ALT.

### ST\_G13\_F2\_ORG

Para la configuración de este modelo, se han designado 13 grupos de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas HEB e IPE. Se ha establecido una modulación en fachada con 4 metros de separación entre soportes y 2.5 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-24, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

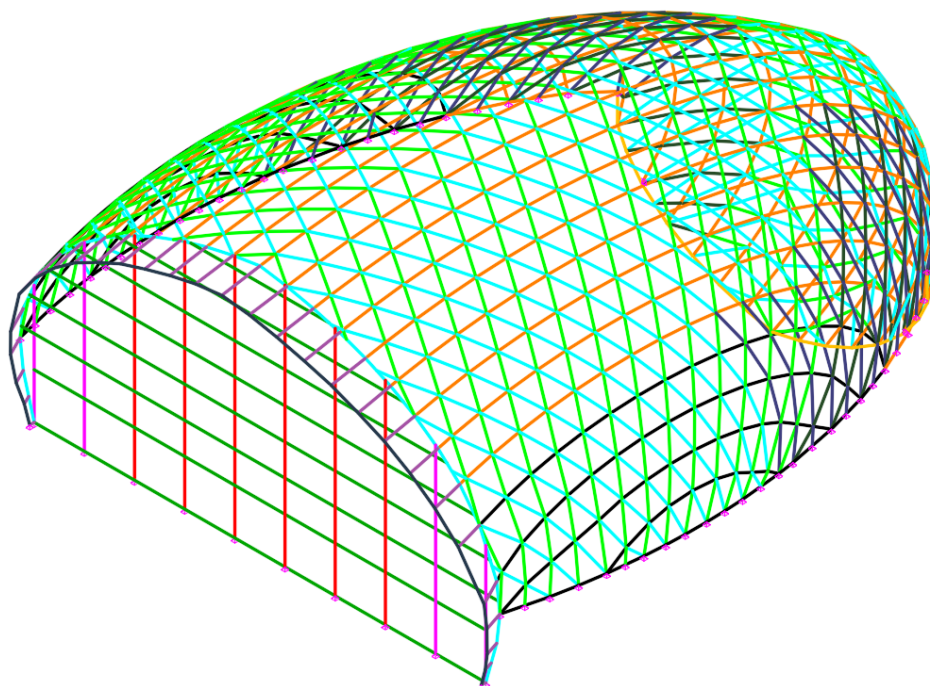


Figura 8-24. Modelo estructural ST\_G13\_F2\_ORG.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-25).

ST_G13_F2_ORG						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	444	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 60 x 4	10368,5136	16,56%
	2	440		PHR 120x 80 x 4	13191,269	21,06%
	3	435		PHR 100 x 80 x 4	10575,071	16,89%
	11	144		PHR 100 x 80 x 4	3102,685	4,95%
	12	112		PHR 120 x 80 x 4	3683,169	5,88%
	13	108		PHR 100 x 80 x 4	3209,287	5,12%
Travesaños de la fachada	4	8	PHC UNE lc 120 x 120 x 5	PHR UNE lc 80 x 80 x 4	2072,1008	3,31%
Soportes de la fachada	5	6	IPE 600	IPE 500	9958,86	15,90%
	6	4		IPE 330	2347,471	3,75%
Viga Cajón Fachada	7	26	PHR UNE lc 500 x 300 x 20	PHR UNE lc 320 x 250 x 6,3	3420,468	5,46%
Viga Cajón Mirador	8	16	PHC UNE lc 300 x 300 x 16	PHC UNE lc 200 x 200 x 6,3	1342,0968	2,14%
Visera de la cúpula	9	29	PHC UNE lc 120 x 120 x 6,3	PHC UNE lc 50 x 50 x 2,6	117,923	0,19%
	10	28		PHC UNE lc 70 x 70 x 4	518,6368	0,83%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	62625,7					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	40,73%					

Figura 8-25. Tabla de perfiles optimizados ST\_G13\_F2\_ORG.

### ST\_G13\_F2\_ALT

Para la configuración de este modelo, se han designado 13 grupos de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas HEB e IPE. Se ha establecido una modulación en fachada con 4 metros de separación entre soportes y 2.5 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-26, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

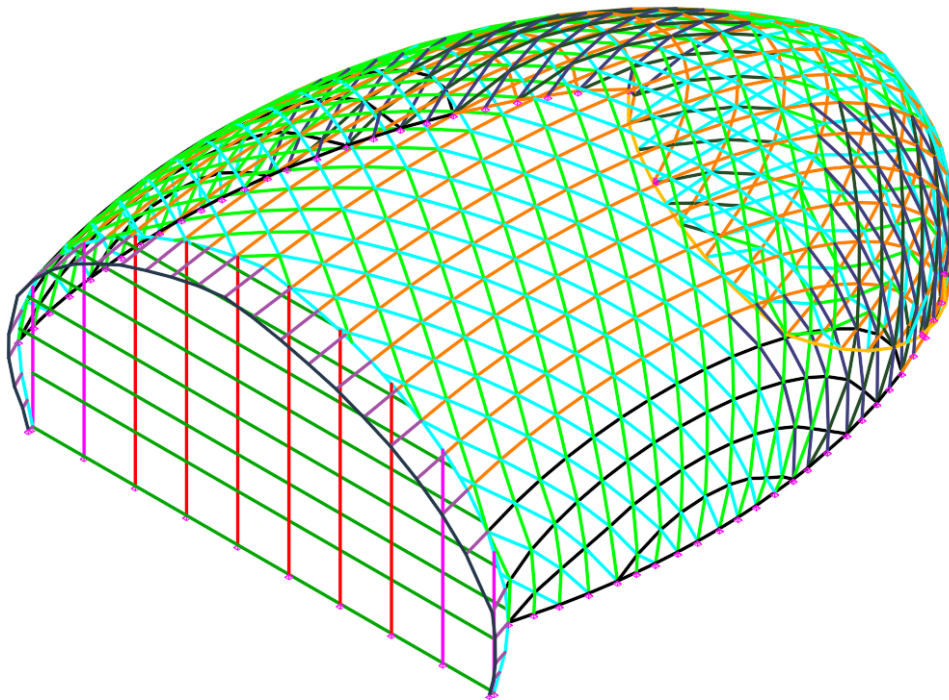


Figura 8-26. Modelo estructural ST\_G13\_F2\_ALT.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-27).

ST_G13_F2_ALT						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	444	HEB 160	HEB 100	22335,552	20,02%
	2	440		HEB 100	22613,604	20,27%
	3	435		HEB 100	19791,876	17,74%
	11	144		HEB 100	5806,86	5,20%
	12	112		HEB 100	6314,004	5,66%
	13	108		HEB 100	6006,372	5,38%
Travesaños de la fachada	4	8	HEB 100	HEB 120	6531,888	5,85%
Soportes de la fachada	5	6	IPE 600	IPE 550	11638,8	10,43%
	6	4		IPE 450	8175,51	7,33%
Viga Cajón Fachada	7	26	HEB 400	HEB 120	1658,07	1,49%
Viga Cajón Mirador	8	16	HEB 300	HEB 260	3260,58	2,92%
Visera de la cúpula	9	29	HEB 140	HEB 100	623,22	0,56%
	10	28		HEB 100	1247,664	1,12%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>				111566,95		
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>				48,88%		

Figura 8-27. Tabla de perfiles optimizados ST\_G13\_F2\_ALT.

### ST\_G13\_F3\_ORG

Este modelo, presenta 13 familias de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones huecas. Se ha establecido una modulación en fachada con 3.27 metros de separación entre soportes y 1.8 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-28, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

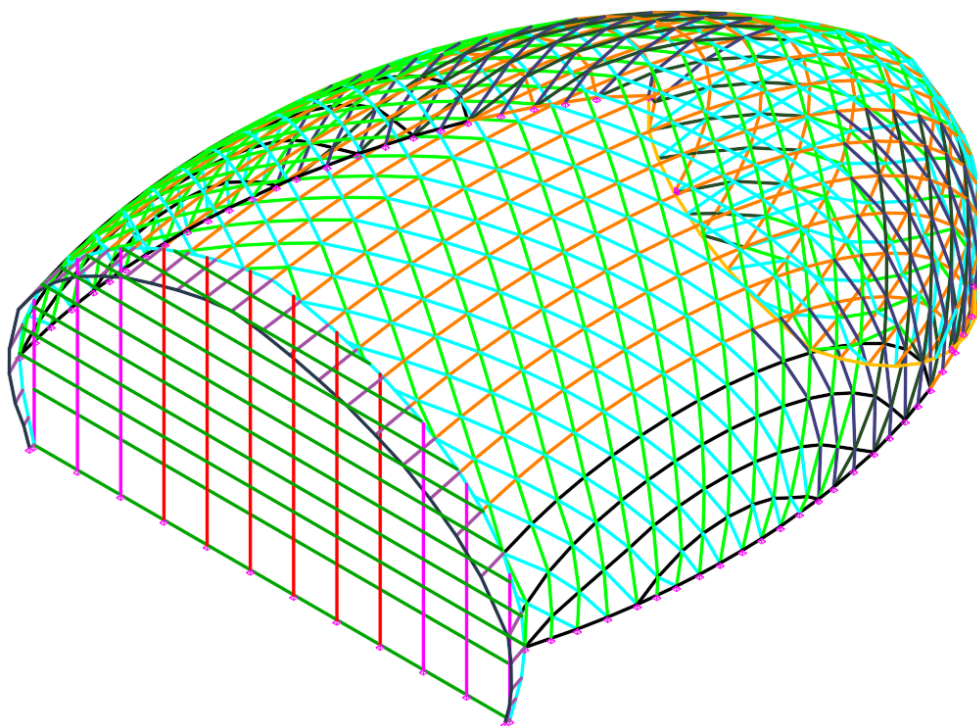


Figura 8-28. Modelo estructural ST\_G13\_F3\_ORG.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-29).

ST_G13_F3_ORG						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	444	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 60 x 4	10368,5136	16,63%
	2	440		PHR 100x 80 x 4	12082,759	19,38%
	3	435		PHR 100 x 80 x 4	10575,071	16,96%
	11	144		PHR 120 x 60 x 4	2846,5	4,56%
	12	112		PHR 100 x 80 x 4	3373,659	5,41%
	13	108		PHR 100 x 80 x 4	3209,287	5,15%
Travesaños de la fachada	4	10	PHC UNE lc 120 x 120 x 5	PHR UNE lc 70 x 70 x 4	2679,4256	4,30%
Soportes de la fachada	5	6	IPE 600	IPE 500	10174,726	16,32%
	6	6		IPE 360	4498,909	7,21%
Viga Cajón Fachada	7	26	PHR UNE lc 500 x 300 x 20	PHR UNE lc 200 x 120 x 8	2353,59	3,77%
Viga Cajón Mirador	8	16	PHC UNE lc 300 x 300 x 16	PHC UNE lc 220 x 220 x 6,3	1480,9344	2,37%
Visera de la cúpula	9	29	PHC UNE lc 120 x 120 x 6,3	PHC UNE lc 40 x 40 x 2,6	93,1775	0,15%
	10	28		PHC UNE lc 70 x 70 x 4	518,6368	0,83%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	62361,93					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	40,98%					

Figura 8-29. Tabla de perfiles optimizados ST\_G13\_F3\_ORG.

### ST\_G13\_F3\_ALT

Este modelo, presenta 13 familias de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas. Se ha establecido una modulación en fachada con 3.27 metros de separación entre soportes y 1.8 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-30, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

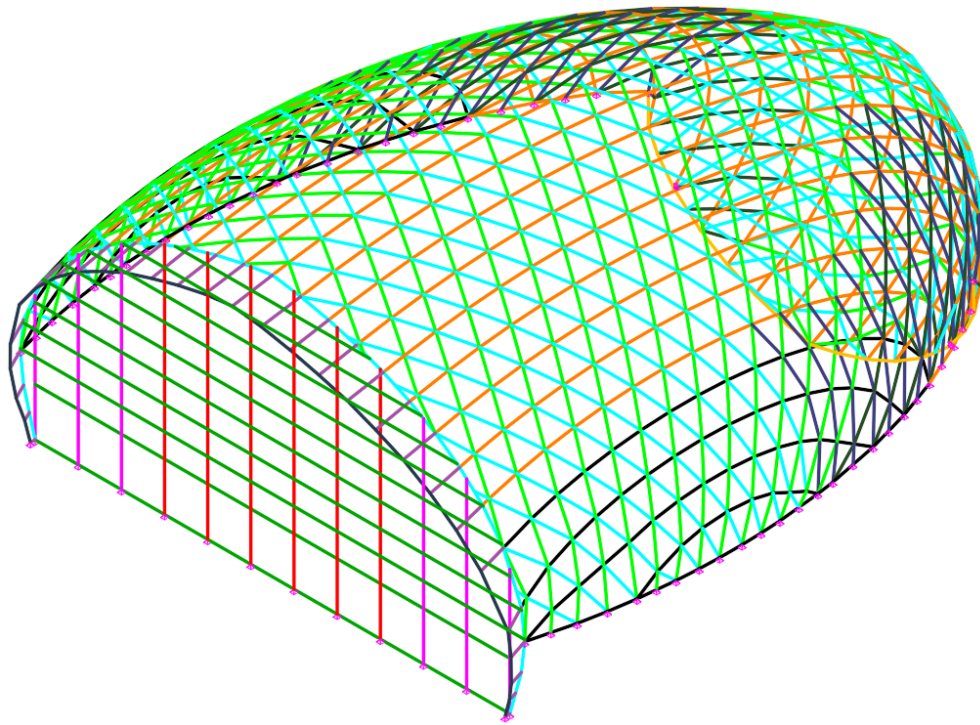


Figura 8-30. Modelo estructural ST\_G13\_F3\_ALT.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-31).

ST_G13_F3_ALT						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	444	HEB 160	HEB 100	22335,552	19,96%
	2	440		HEB 100	22613,604	20,21%
	3	435		HEB 100	19791,876	17,69%
	11	144		HEB 100	5806,86	5,19%
	12	112		HEB 100	6314,004	5,64%
	13	108		HEB 100	6006,372	5,37%
Travesaños de la fachada	4	10	HEB 140	HEB 100	6445,788	5,76%
Soportes de la fachada	5	6	IPE 600	IPE 500	10174,726	9,09%
	6	6		IPE 360	4498,909	4,02%
Viga Cajón Fachada	7	26	HEB 400	HEB 120	1658,07	1,48%
Viga Cajón Mirador	8	16	HEB 300	HEB 260	3260,58	2,91%
Visera de la cúpula	9	29	HEB 140	HEB 100	623,22	0,56%
	10	28		HEB 100	1247,664	1,12%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>				111892,34		
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>				48,73%		

Figura 8-31. Tabla de perfiles optimizados ST\_G13\_F3\_ALT.

Después de la Segunda rueda de optimizaciones se ha conseguido aumentar la reducción de pesos hasta porcentajes rondando el 45-50%. Los modelos de perfiles huecos siguen presentando un peso total mucho menor a las configuraciones con perfilera abierta. Además, se observa que los modelos con modulación más grande en la fachada presentan menor peso. Se ha conseguido reducir el peso del modelo ST\_G6\_F1\_ORG (63.419,03 kg) y el mejor modelo actual es el **ST\_G13\_F1\_ORG** con un peso de 60.365,82 kg.

### 8.4.3 MODELOS DE 20 BARRAS

#### ST\_G20\_F1\_ORG

Para esta configuración se han designado 20 grupos de barras, manteniendo la asignación de perfiles original y estableciendo una modulación en fachada con 5.14 metros de separación entre soportes y 3.43 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-32, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

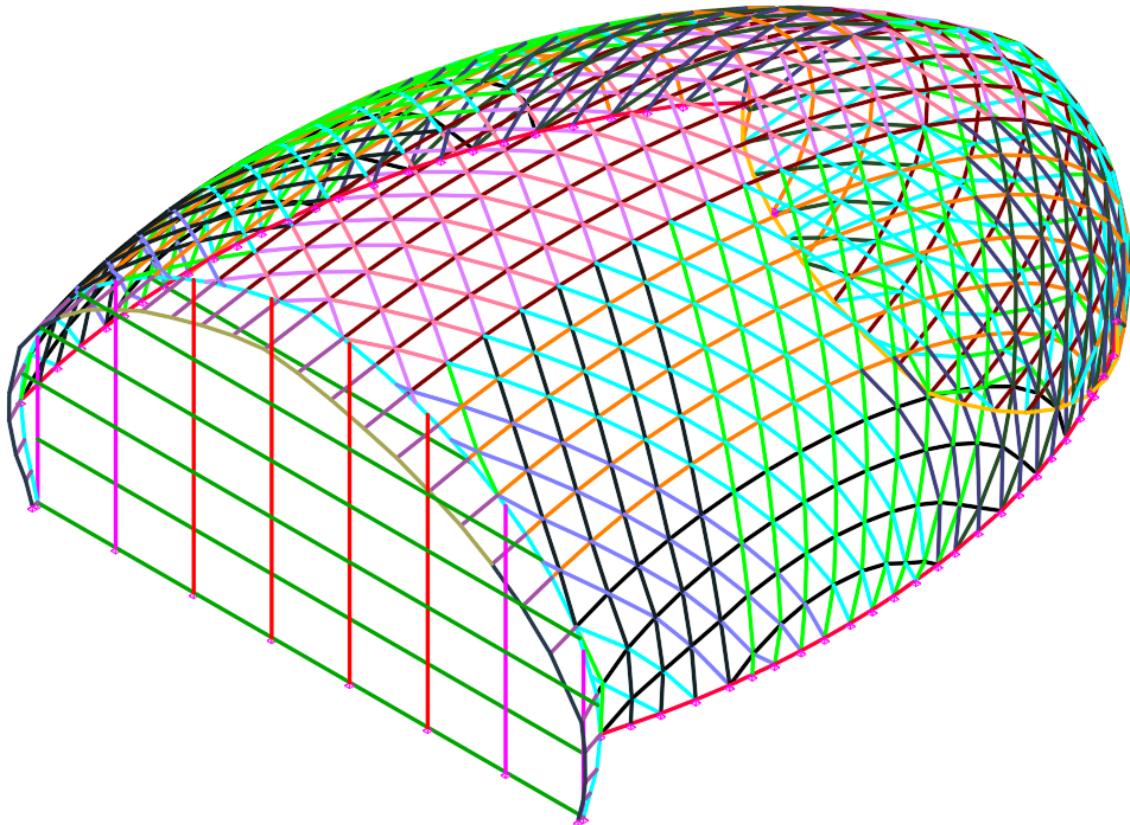


Figura 8-32. Modelo estructural ST\_G20\_F1\_ORG.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-33).



ST_G20_F1_ORG						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	248	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 60 x 4	5804,5418	10,61%
	2	270		PHR 80x 60 x 3	4479,3952	8,18%
	3	226		PHR 100 x 80 x 4	5297,291	9,68%
	11	116		PHR 120 x 60 x 4	2195,5	4,01%
	12	112		PHR 120 x 80 x 4	3683,169	6,73%
	13	108		PHR 120 x 80 x 4	3503,717	6,40%
	14	34		PHR 60 x 40 x 2	242,8712	0,44%
	15	64		PHR 100 x 80 x 4	6337,6896	11,58%
	16	84		PHR 70 x 50 x 2	749,412	1,37%
	18	112		PHR 100 x 80 x 4	2984,093	5,45%
	19	203		PHR 100 x 80 x 4	5061,742	9,25%
	20	106		PHR 80 x 60 x 3	1683,5669	3,08%
Travesaños de la fachada	4	6	PHC UNE lc 120 x 120 x 5	PHR UNE lc 100 x 100 x 5	2916,34	5,33%
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 550	7901,24	14,44%
	6	4		IPE 400	3278,535	5,99%
Viga Cajón Fachada	7	26	PHR UNE lc 500 x 300 x 20	PHR UNE lc 260 x 180 x 6,3	2622,483	4,79%
Viga Cajón Mirador	8	16	PHC UNE lc 300 x 300 x 16	PHC UNE lc 200 x 200 x 6,3	1342,0968	2,45%
Visera de la cúpula	9	29	PHC UNE lc 120 x 120 x 6,3	PHC UNE lc 40 x 40 x 3,2	210,2931	0,38%
	10	14		PHC UNE lc 50 x 50 x 2,6	117,923	0,22%
	17	14		PHC UNE lc 70 x 70 x 4	259,5728	0,47%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	54730,51					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	48,20%					

Figura 8-33. Tabla de perfiles optimizados ST\_G20\_F1\_ORG.

### ST\_G20\_F1\_ALT

Para la configuración de este modelo, se han designado 20 grupos de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas HEB e IPE. Se ha establecido una modulación en fachada con 5.14 metros de separación entre soportes y 3.43 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-34, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

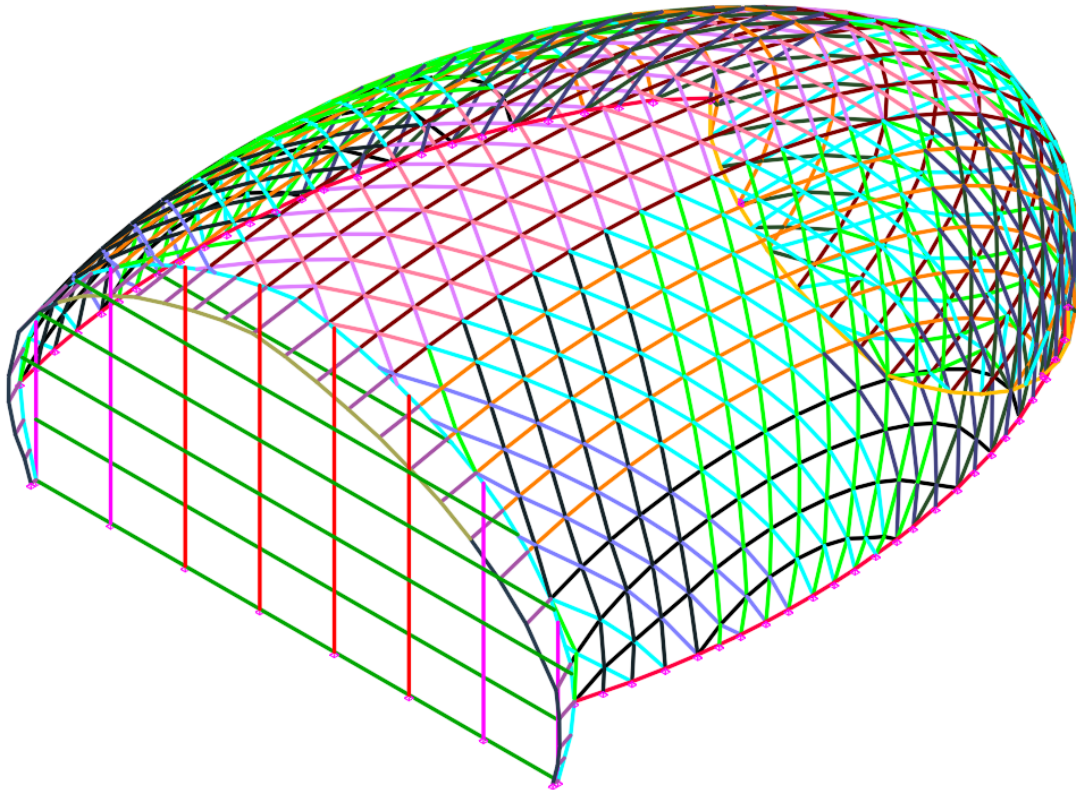


Figura 8-34. Modelo estructural ST\_G20\_F1\_ALT.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-35).

ST_G20_F1_ALT						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	248	HEB 160	HEB 100	12503,976	11,50%
	2	270		HEB 100	14211,456	13,07%
	3	226		HEB 100	9914,196	9,12%
	11	116		HEB 100	4478,82	4,12%
	12	112		HEB 100	6314,004	5,81%
	13	108		HEB 100	6006,372	5,52%
	14	34		HEB 100	1732,368	1,59%
	15	64		HEB 100	3060,816	2,82%
	16	84		HEB 100	4246,668	3,91%
	18	112		HEB 100	5584,908	5,14%
	19	203		HEB 100	9473,352	8,71%
Travesaños de la fachada	4	6	HEB 140	HEB 120	5261,235	4,84%
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 550	7901,24	7,27%
	6	4		IPE 400	3278,535	3,02%
Viga Cajón Fachada	7	26	HEB 400	HEB 140	2092,77	1,92%
Viga Cajón Mirador	8	16	HEB 300	HEB 260	3260,58	3,00%
Visera de la cúpula	9	29	HEB 140	HEB 140	1920,563	1,77%
	10	14		HEB 100	623,22	0,57%
	17	14		HEB 100	624,444	0,57%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>				108727,34		
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>				50,18%		

Figura 8-35. Tabla de perfiles optimizados ST\_G20\_F1\_ALT.

### ST\_G20\_F2\_ORG

Para la configuración de este modelo, se han designado 20 grupos de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas HEB e IPE. Se ha establecido una modulación en fachada con 4 metros de separación entre soportes y 2.5 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-36, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

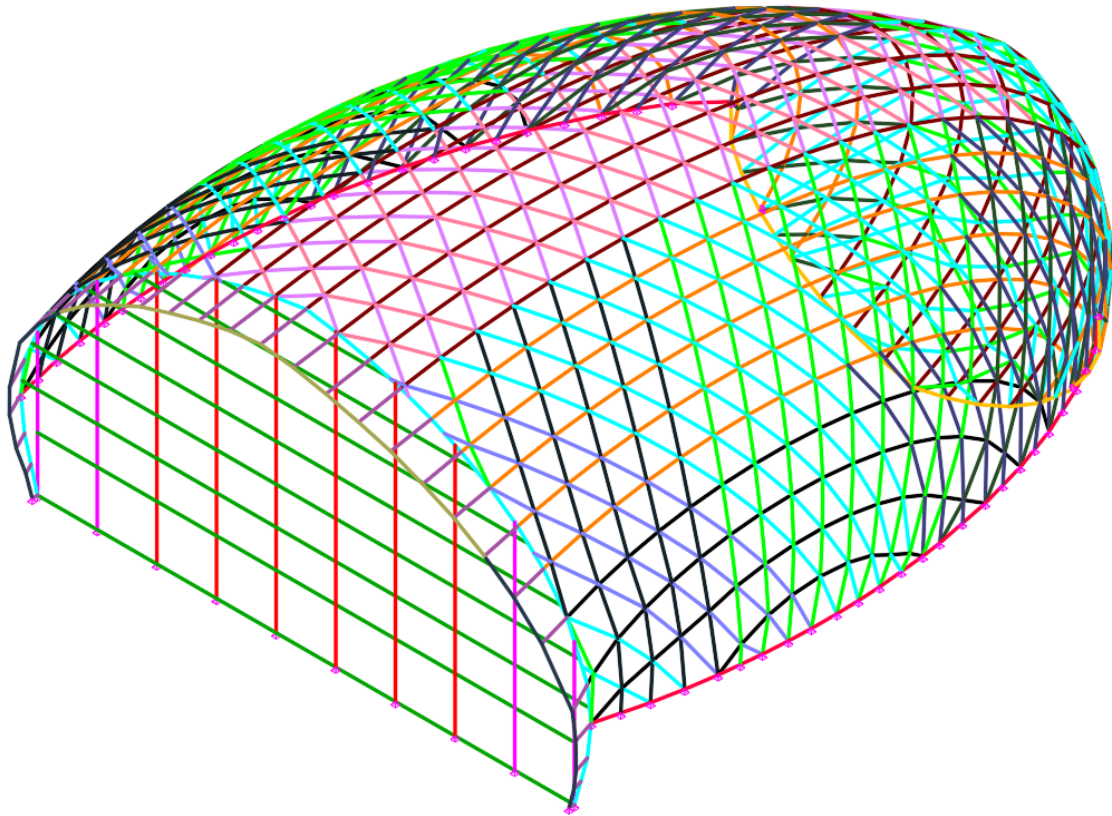


Figura 8-36. Modelo estructural ST\_G20\_F2\_ORG.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-37).

ST_G20_F2_ORG						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	248	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 80 x 4	6681,046	11,39%
	2	270		PHR 80x 60 x 3	4479,3952	7,64%
	3	226		PHR 100 x 80 x 4	5297,291	9,03%
	11	116		PHR 140 x 60 x 4	2612,645	4,45%
	12	112		PHR 100 x 80 x 4	3373,659	5,75%
	13	108		PHR 100 x 80 x 4	3209,287	5,47%
	14	34		PHR 60 x 40 x 2	242,8712	0,41%
	15	64		PHR 100 x 80 x 4	1635,436	2,79%
	16	84		PHR 100 x 40 x 4	1765,2816	3,01%
	18	112		PHR 140 x 80 x 4	3531,633	6,02%
19	203	PHR 100 x 80 x 4	5061,742	8,63%		
20	106	PHR 80 x 60 x 4	2220,3184	3,79%		
Travesaños de la fachada	4	6	PHC UNE lc 120 x 120 x 5	PHR UNE lc 120 x 120 x 4	3522,816	6,01%
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 500	9958,86	16,98%
	6	4		IPE 240	1467,767	2,50%
Viga Cajón Fachada	7	26	PHR UNE lc 500 x 300 x 20	PHR UNE lc 300 x 200 x 6,3	2990,736	5,10%
Viga Cajón Mirador	8	16	PHC UNE lc 300 x 300 x 16	PHC UNE lc 220 x 220 x 6,3	1480,9344	2,53%
Visera de la cúpula	9	29	PHC UNE lc 120 x 120 x 6,3	PHC UNE lc 50 x 50 x 2,6	219,9814	0,38%
	10	14		PHC UNE lc 60 x 60 x 2,6	142,974	0,24%
	17	14		PHC UNE lc 70 x 70 x 4	259,5728	0,44%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	58649,09					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	44,50%					

Figura 8-37. Tabla de perfiles optimizados ST\_G20\_F2\_ORG.

### ST\_G20\_F2\_ALT

Para la configuración de este modelo, se han designado 20 grupos de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas HEB e IPE. Se ha establecido una modulación en fachada con 4 metros de separación entre soportes y 2.5 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-38, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

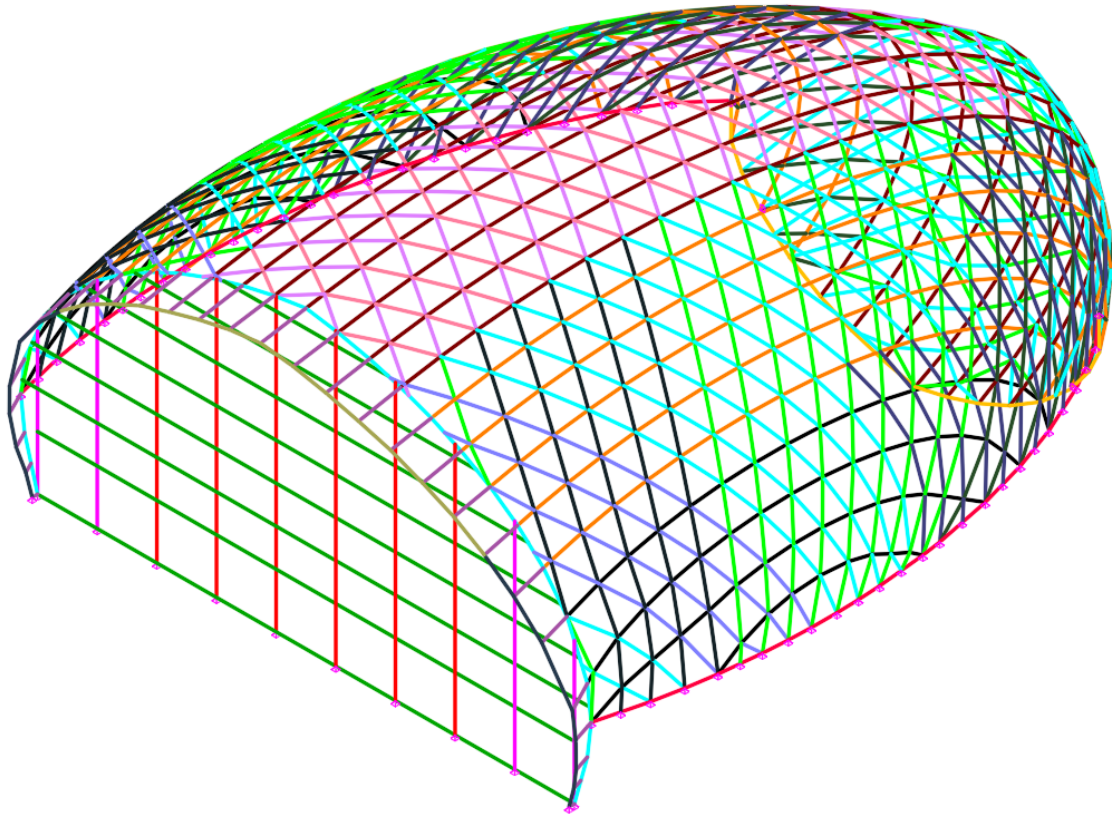


Figura 8-38. Modelo estructural ST\_G20\_F2\_ALT.

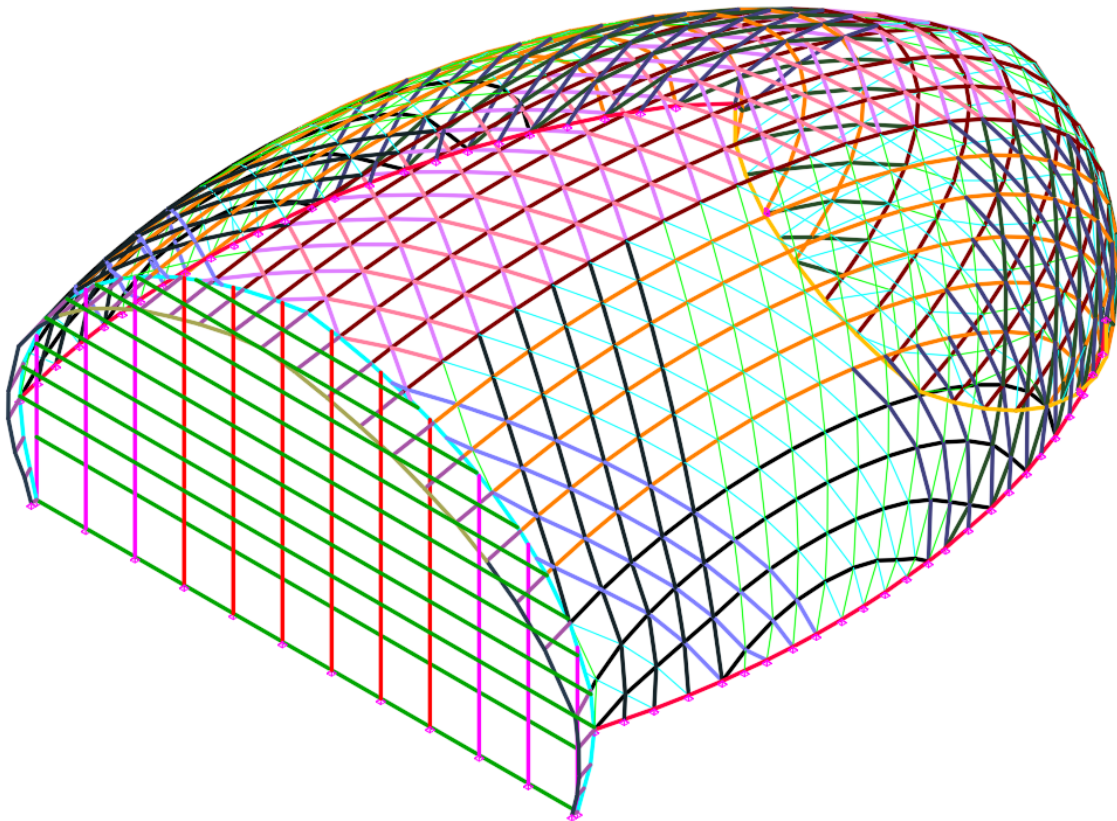
A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-39).

ST_G20_F2_ALT						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	248	HEB 160	HEB 100	12503,976	11,36%
	2	270		HEB 100	14211,456	12,91%
	3	226		HEB 100	9914,196	9,00%
	11	116		HEB 100	4478,82	4,07%
	12	112		HEB 100	6314,004	5,73%
	13	108		HEB 100	6006,372	5,46%
	14	34		HEB 100	1732,368	1,57%
	15	64		HEB 120	4006,068	3,64%
	16	84		HEB 100	4246,668	3,86%
	18	112		HEB 100	5584,908	5,07%
	19	203		HEB 100	9473,352	8,60%
20	106	HEB 100	5341,332	4,85%		
Travesaños de la fachada	4	6	HEB 140	HEB 100	4990,656	4,53%
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 500	9958,86	9,05%
	6	4		IPE 360	2729,951	2,48%
Viga Cajón Fachada	7	26	HEB 400	HEB 140	2092,77	1,90%
Viga Cajón Mirador	8	16	HEB 300	HEB 260	3260,58	2,96%
Visera de la cúpula	9	29	HEB 140	HEB 120	1521,633	1,38%
	10	14		HEB 100	623,22	0,57%
	17	14		HEB 100	624,444	0,57%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>				110100,23		
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>				49,55%		

Figura 8-39. Tabla de perfiles optimizados ST\_G20\_F2\_ALT.

### ST\_G20\_F3\_ORG

Este modelo, presenta 20 familias de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones huecas. Se ha establecido una modulación en fachada con 3.27 metros de separación entre soportes y 1.8 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-40, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.



*Figura 8-40. Modelo estructural ST\_G20\_F3\_ORG.*

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-41).

ST_G20_F3_ORG						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	248	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 60 x 4	5804,5418	9,71%
	2	270		PHR 100 x 60 x 4	6597,1808	11,04%
	3	226		PHR 100 x 80 x 4	5297,291	8,86%
	11	116		PHR 120 x 60 x 4	2195,5	3,67%
	12	112		PHR 120 x 80 x 4	3683,169	6,16%
	13	108		PHR 120 x 80 x 4	3503,717	5,86%
	14	34		PHR 60 x 40 x 2	242,8712	0,41%
	15	64		PHR 140 x 60 x 4	1785,476	2,99%
	16	84		PHR 80 x 60 x 3	2081,7	3,48%
	18	112		PHR 100 x 60 x 4	2592,6019	4,34%
	19	203		PHR 100 x 80 x 4	5061,742	8,47%
	20	106		PHR 80 x 60 x 4	2220,3184	3,71%
	Travesaños de la fachada	4		6	PHC UNE Ic 120 x 120 x 5	PHR UNE Ic 60 x 60 x 5
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 500	10174,726	17,02%
	6	4		IPE 360	4498,909	7,53%
Viga Cajón Fachada	7	26	PHR UNE Ic 500 x 300 x 20	PHR UNE Ic 200 x 100 x 6,3	1763,64	2,95%
Viga Cajón Mirador	8	16	PHC UNE Ic 300 x 300 x 16	PHC UNE Ic 200 x 200 x 6,3	1342,0968	2,25%
Visera de la cúpula	9	29	PHC UNE Ic 120 x 120 x 6,3	PHC UNE Ic 50 x 50 x 2,6	219,9814	0,37%
	10	14		PHC UNE Ic 50 x 50 x 2,6	117,923	0,20%
	17	14		PHC UNE Ic 70 x 70 x 4	259,5728	0,43%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	59774,56					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	43,43%					

Figura 8-41. Tabla de perfiles optimizados ST\_G20\_F3\_ORG.

### ST\_G20\_F3\_ALT

Este modelo, presenta 13 familias de barras, esta vez se ha establecido la asignación de perfiles con secciones abiertas. Se ha establecido una modulación en fachada con 3.27 metros de separación entre soportes y 1.8 metros de separación entre travesaños, se mantiene la altura entre el primer y segundo travesaño, ya que alberga las puertas de acceso. El modelo resultante de la estructura puede consultarse en la Figura 8-42, donde cada familia tiene un color asignado para que pueda distinguirse.

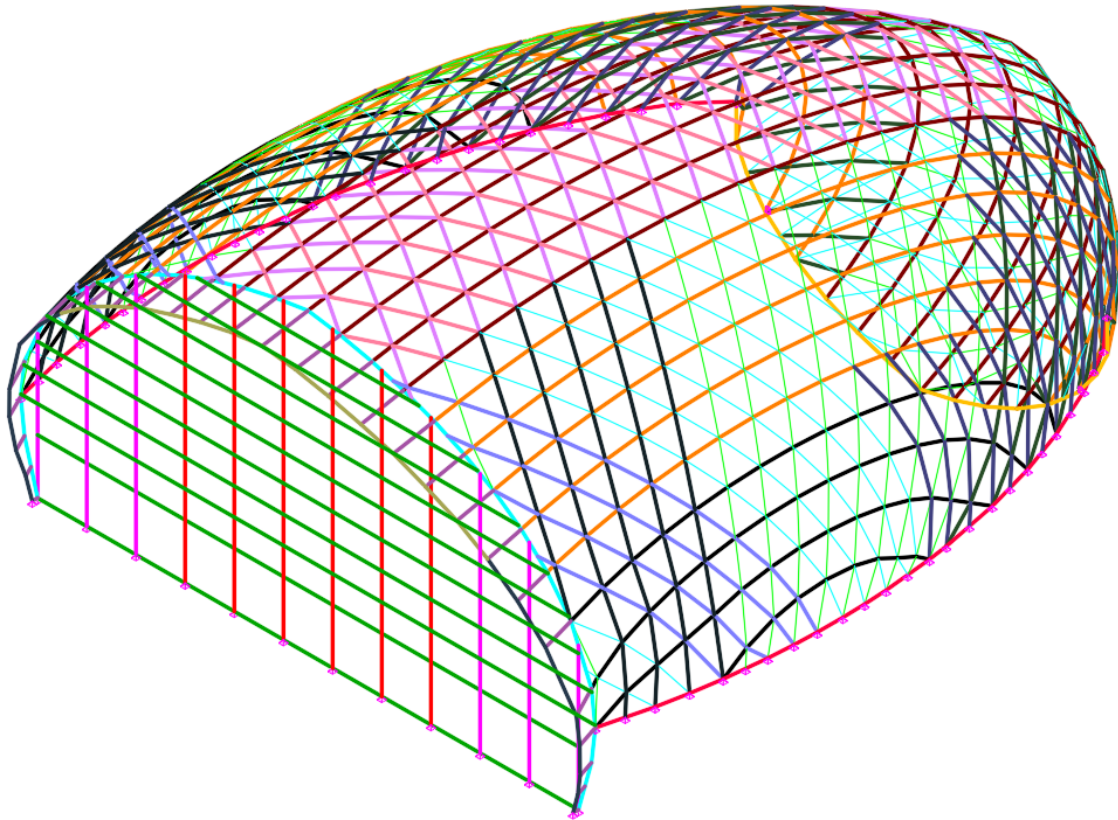


Figura 8-42. Modelo estructural ST\_G20\_F3\_ALT.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los perfiles asignados por VTAM que aportan la mejor configuración para este modelo de estructura y el peso optimizado (Figura 8-43).

ST_G20_F3_ALT						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	248	HEB 160	HEB 100	12503,976	11,18%
	2	270		HEB 100	14211,456	12,70%
	3	226		HEB 100	9914,196	8,86%
	11	116		HEB 100	4478,82	4,00%
	12	112		HEB 100	6314,004	5,64%
	13	108		HEB 100	6006,372	5,37%
	14	34		HEB 100	1732,368	1,55%
	15	64		HEB 100	3060,816	2,74%
	16	84		HEB 100	4246,668	3,80%
	18	112		HEB 100	5584,908	4,99%
	19	203	HEB 100	9473,352	8,47%	
	20	106	HEB 100	5341,332	4,77%	
Travesaños de la fachada	4	6	HEB 140	HEB 100	6445,788	5,76%
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 500	10174,726	9,09%
	6	4		IPE 360	4498,909	4,02%
Viga Cajón Fachada	7	26	HEB 400	HEB 120	1658,07	1,48%
Viga Cajón Mirador	8	16	HEB 300	HEB 260	3260,58	2,91%
Visera de la cúpula	9	29	HEB 140	HEB 100	1162,596	1,04%
	10	14		HEB 100	623,22	0,56%
	17	14		HEB 100	624,444	0,56%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>				111892,34		
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>				48,73%		

Figura 8-43. Tabla de perfiles optimizados ST\_G20\_F3\_ALT.



Tras este último proceso de optimización de modelos se ha comprobado que el modelo que presenta una mejor configuración con un menor peso es el modelo ST\_G20\_F1\_ORG con un total de 54.730,51 kg.

Para comprobar que la configuración es válida se va a comparar el peso de la estructura con la succión realizada por el viento en la espina de la cúpula, para comprobar si la cúpula tiene riesgo de ser succionada. Según el cálculo de cargas de viento que se presenta en la Figura 6-19, la mayor succión de viento pertenece a la hipótesis de cargas de viento SE-NO, la HIP 04. Se aplicará esta succión máxima a toda la superficie ocupada por la zona B de viento y se comparará con la masa de la estructura.

$$-1.4 \left( \frac{kN}{m^2} \right) \cdot 1498,55 (m^2) = -2097,97 kN > 536,906 kN = 54730,51kg \rightarrow \text{Hay riesgo}$$

Eso implicaría que los apoyos llegarán a trabajar como anclajes a tracción. De todos modos, el detalle constructivo aportado en el proyecto de ejecución de la cúpula es compatible con ello.

No obstante, no se ha tenido en cuenta el peso del vidrio, que es una carga permanente.

Ese peso añadiría:

$$0.25 \left( \frac{kN}{m^2} \right) \cdot 2755,46 (m^2 \text{ de malla monocapa}) = 688,865 kN$$

Esto supone un peso total de:

$$536,906 kN + 688,865 kN = 1225,771 kN$$

En definitiva, en el peor de los casos el anclaje a tracción de cada uno de los apoyos tendría que soportar una fuerza ascendente de unos:

$$2097,97 kN - 1225,771 kN = 872,199 kN$$

Por lo tanto, el reparto entre todos los anclajes de los laterales sería de:

$$\frac{872,199 kN}{2 \cdot 26 \text{ anclajes}} = 16,77 kN/\text{anclaje}$$

Como se ve en los apoyos de la cúpula (Figura 6-4 y Figura 6-5), los apoyos que están acotados tienen 4 barras de anclaje de 16 mm de diámetro, cada barra de anclaje soportaría una tracción de:

$$\frac{16,77 kN/\text{anclaje}}{4 \text{ barras}/\text{anclaje}} = 4,19 kN/\text{barra}$$

equivalente a una tensión de:

$$\frac{4190 N}{\pi \cdot 8^2} = 20,83 N/mm^2$$

La tensión que debe soportar cada barra queda bastante alejada de los, por lo menos, 275 N/mm<sup>2</sup> de resistencia del acero de dichas barras y placas de anclaje. Por lo tanto, cabe dar por buena la configuración optimizada atendiendo a la solución constructiva de los anclajes.

Con la estructura construida (de peso  $1077 \text{ kN} = 106.743,151 \text{ kg}$ ) más el peso del vidrio (otros  $688,865 \text{ kN}$ ) nos vamos a  $1765 \text{ kN}$ . El problema persiste, aunque con menor intensidad.

A continuación, se muestra una comparación de la volumetría de los perfiles de la estructura de partida (Figura 8-44) y la estructura seleccionada (Figura 8-45).

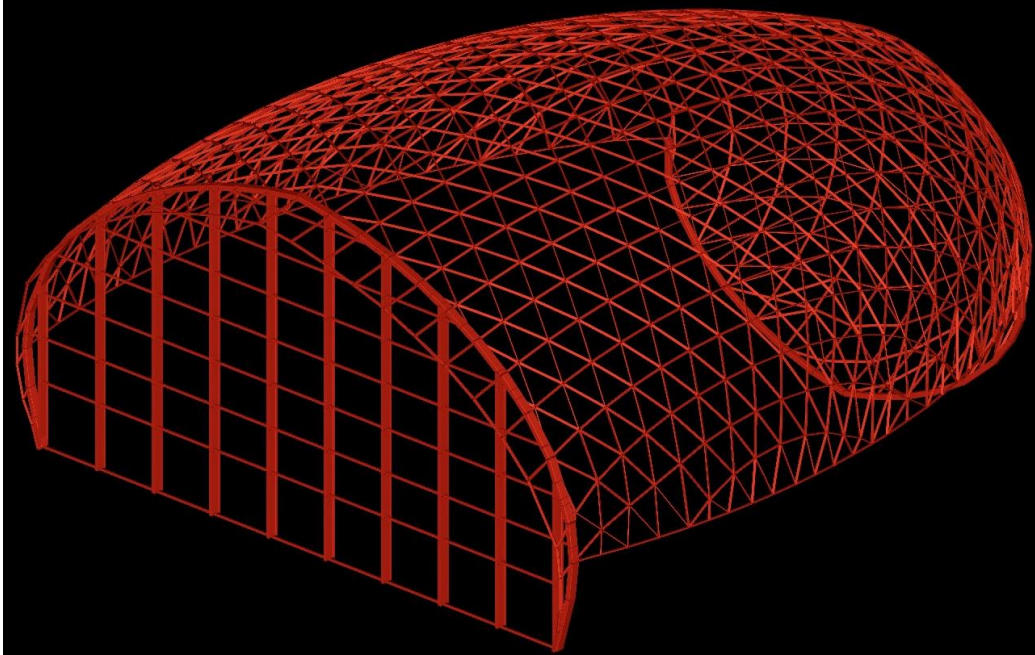


Figura 8-44. Modelo 3D de la estructura de partida.

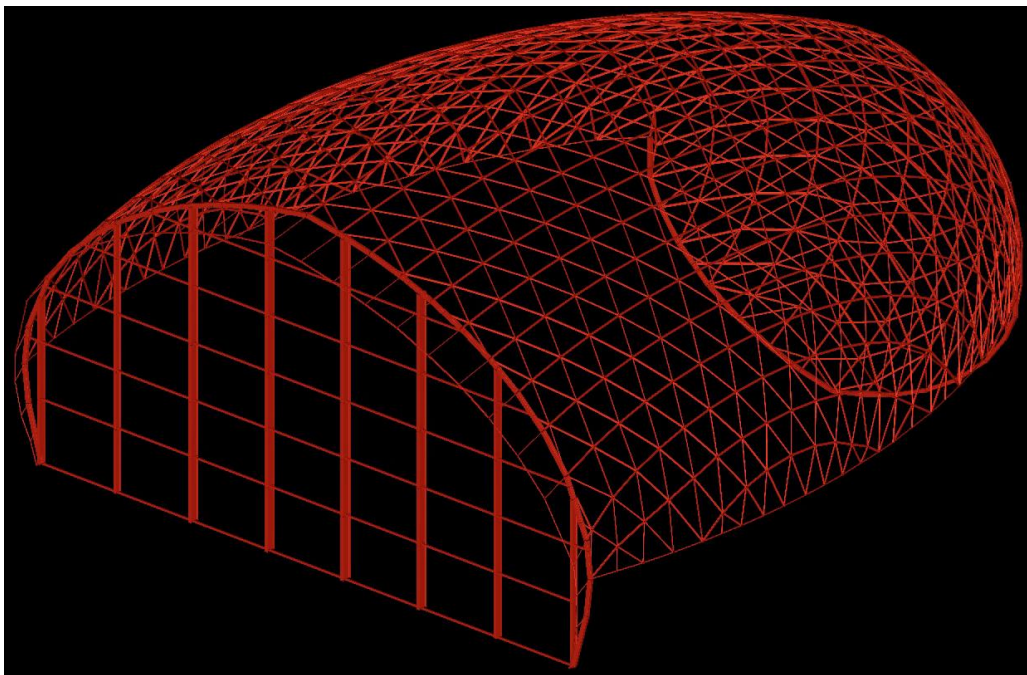


Figura 8-45. Modelo 3D de la estructura seleccionada ST\_G20\_F1\_ORG.

Puede verse la diferencia de tamaño en los perfiles usados en la malla monocapa de la cúpula que sostienen los paneles de vidrio. Además, puede observarse como las vigas cajón igualan su tamaño, ya que pasan a ser perfiles de dimensiones más similares, no como era en el modelo original. En los soportes no se aprecia casi variación de dimensiones. En las barras de la visera sí que se aprecia gran cambio de dimensión. Siendo que el voladizo no presenta una excesiva carga para las barras esta es resistida con un perfil bastante inferior al propuesto por el estudio que proyectó la estructura.

#### 8.4.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS PRELIMINARES

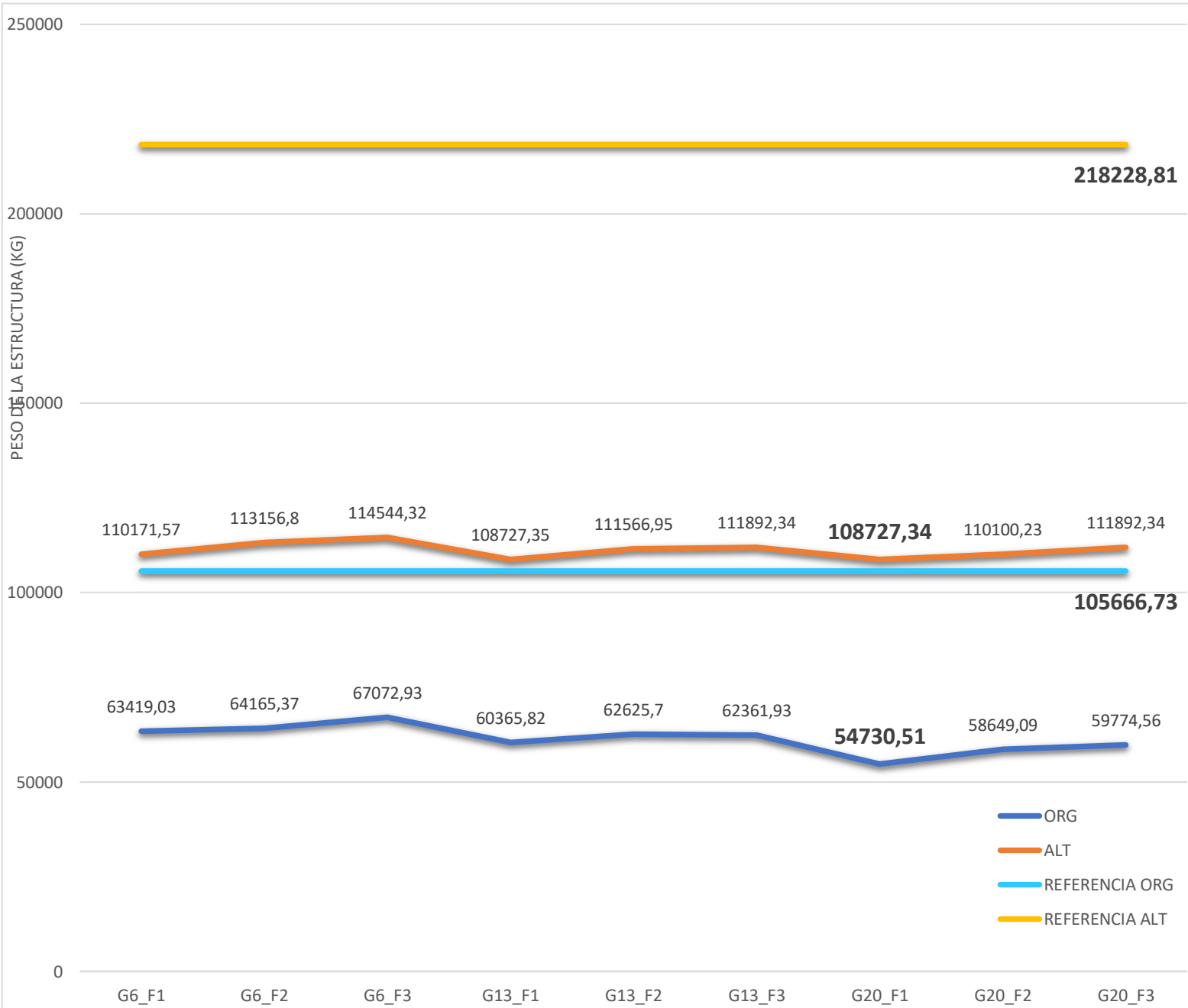


Figura 8-46. Gráfico de comparación de las iteraciones.

Lo primero que llama la atención de la Figura 8-46 es la amplia diferencia que hay en el peso de los modelos que presentan perfil hueco con los modelos que presentan perfil abierto. A pesar de ello, en cuanto a reducción de peso respecto al peso inicial se refiere, los perfiles abiertos presentan mayor reducción de peso, siendo esta hasta del 50,18% como se muestra en la Figura 8-35. En lo que respecta a la variación de pesos de un modelo a otro, vemos como las configuraciones que usan perfiles abiertos no presentan casi variación de peso, siendo esta de 5.81 toneladas entre el más pesado (ST\_G6\_F3\_ALT, Figura 8-43) y el más ligero (ST\_G20\_F1\_ALT, Figura 8-35). En cambio, las configuraciones de perfiles huecos sí que muestran mayor variación del peso, siendo esta de 12.34 toneladas, más del doble que la anterior (Figura 8-17 vs Figura 8-33). Esta variación de perfiles es principalmente debido a la cantidad de secciones disponibles para cada tipo de sección. Las secciones HEB e IPE poseen mucha menos variedad que las secciones PHR, PHC y sus homólogas PHR UNE Ic y PHC UNE Ic, por esto, cuando VTAM realiza las asignaciones de perfiles para calcular las diferentes configuraciones, tiene menos variedad de combinaciones con los perfiles abiertos que con los cerrados.

#### 8.4.5 PROCESO FINAL DE OPTIMIZACIÓN

A continuación, para seguir probando diferentes comprobaciones de la cúpula se van a realizar iteraciones con mayor permisividad en los desplazamientos de los nudos. Antes se ha establecido una limitación de 50 mm para los movimientos horizontales, tanto en el eje x como en el eje y (limitación de  $L/220$  de la mitad de la altura), y una limitación de 100 mm en el eje z (limitación de  $L/420$  de la mitad de la altura). La nueva limitación mantendrá la limitación de movimientos horizontales, pero será más permisiva con los movimientos verticales, siendo esta vez de  $L/300$ , lo que resulta en una limitación de 140 mm. Se espera que esta nueva configuración presente un peso aún menor debido a que no se necesita tanta rigidez. Además, se van a realizar las optimizaciones empleando diferentes tipos de aceros. Se tomará el modelo que resulte de la última optimización con los nuevos movimientos y se realizarán pruebas con acero S235 (ST\_G20\_F1\_ORG\_235) y S355 (ST\_G20\_F1\_ORG\_355). Para seleccionar el mejor modelo entre estos 3 últimos se elegirá no solo el criterio de peso si no el precio del material de estos materiales. El precio por kilogramo de acero se obtendrá del generador de precios del IVE [4].

##### ST\_G20\_F1\_ORG\_235

La optimización realizada con esta configuración presenta la nueva limitación de movimientos en los nudos, que se ha definido anteriormente y además presenta un material diferente, el acero S235. Se adjunta el modelo de la estructura como referencia (Figura 8-47) y la tabla de perfilaría asignada por VTAM con el peso total de la nueva configuración (Figura 8-48).

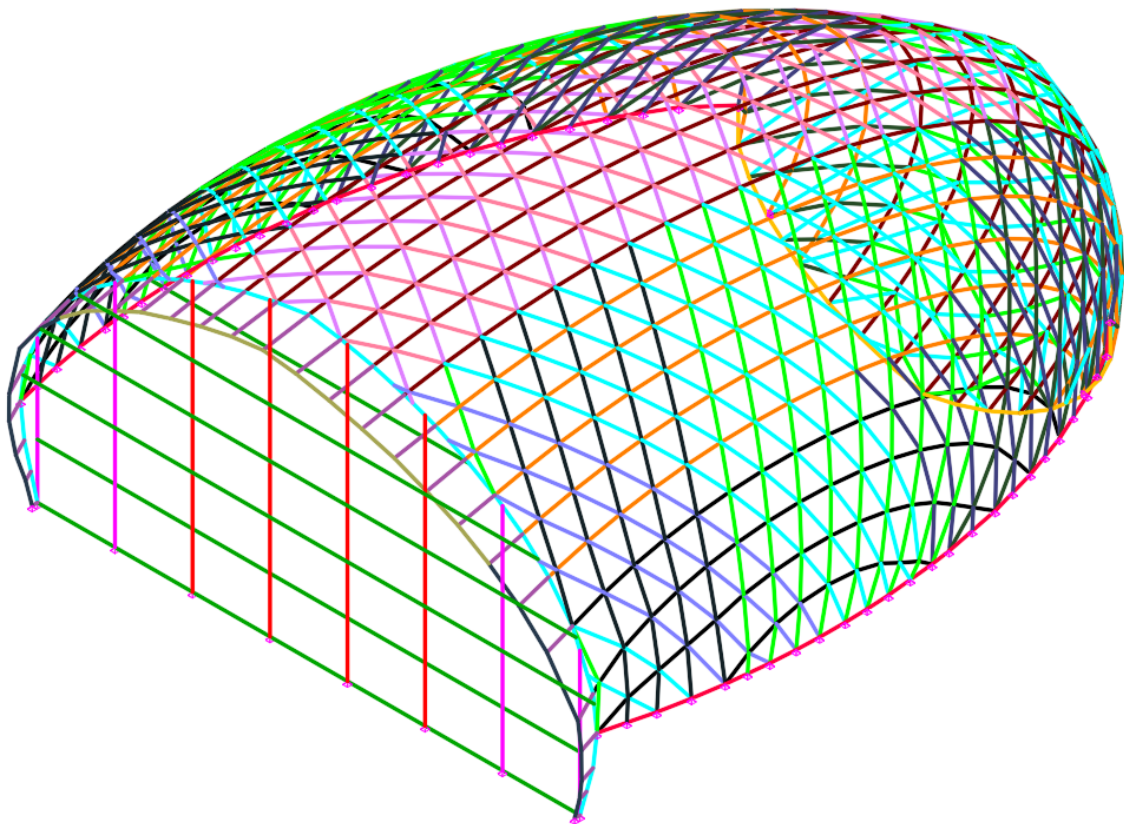


Figura 8-47. Modelo estructural ST\_G20\_F1\_ORG\_235.

ST_G20_F1_ORG_235							
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO	
Barras de la cubierta	1	248	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 60 x 4	5804,5418	9,59%	
	2	270		PHR 120 x 60 x 4	6966,4	11,51%	
	3	226		PHR 100 x 80 x 4	5297,291	8,75%	
	11	116		PHR 100 x 80 x 4	2393,095	3,95%	
	12	112		PHR 100 x 80 x 4	3373,659	5,57%	
	13	108		PHR 120 x 80 x 4	3503,717	5,79%	
	14	34		PHR 60 x 40 x 2	242,8712	0,40%	
	15	64		PHR 120 x 100 x 4	1995,532	3,30%	
	16	84		PHR 70 x 50 x 2	749,412	1,24%	
	18	112		PHR 120 x 80 x 4	3257,863	5,38%	
	19	203		PHR 120 x 80 x 4	5526,122	9,13%	
20	106	PHR 100 x 50 x 3	1772,5891	2,93%			
Travesaños de la fachada	4	6	PHC UNE lc 120 x 120 x 5	PHC UNE lc 120 x 120 x 5	3527,195	5,83%	
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 550	7901,24	13,05%	
	6	4		IPE 360	2823,595	4,66%	
Viga Cajón Fachada	7	26	PHR UNE lc 500 x 300 x 20	PHR UNE lc 300 x 200 x 6,3	2990,736	4,94%	
Viga Cajón Mirador	8	16	PHC UNE lc 300 x 300 x 16	PHC UNE lc 250 x 250 x 6,3	1342,4474	2,22%	
Visera de la cúpula	9	29	PHC UNE lc 120 x 120 x 6,3	PHC UNE lc 140 x 140 x 5	1206,4783	1,99%	
	10	14		PHC UNE lc 50 x 50 x 2,6	117,923	0,19%	
	17	14		PHC UNE lc 50 x 50 x 3,2	143,5609	0,24%	
<b>PESO OPTIMIZADO</b>						<b>60539,61</b>	
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>						<b>42,71%</b>	

Figura 8-48. Tabla de perfiles optimizados ST\_G20\_F1\_ORG\_235.

Según el generador de precios del IVE. El precio para ejecutar un kg de acero S235 con las condiciones de ejecución de la estructura se establece según la Figura 8-49:

EERA.1\$ | kg | Suministro y montaje de acero estructural en celosías y cerchas

TIPO ACERO	GRADO DUCTILIDAD	FABRICACIÓN	SECCIÓN	PROTECCIÓN	MONTAJE
a <input checked="" type="radio"/> S 235	<input checked="" type="radio"/> JR	<input checked="" type="radio"/> laminado en caliente	<input type="radio"/> serie IPN, IPE, HEB, HEA, HEM, UPN	<input checked="" type="radio"/> imprimación	<input type="radio"/> soldado
b <input type="radio"/> S 275	<input type="radio"/> J0	<input type="radio"/> conformado en frío	<input checked="" type="radio"/> serie L, LD, T, red, cua, rect, chapa	<input type="radio"/> galvanizado	<input checked="" type="radio"/> atornillado
c <input type="radio"/> S 355	<input type="radio"/> J2		<input type="radio"/> huecos: red, cua, rect		
d			<input type="radio"/> serie L, U, C, Z, omega, tb		



EEHE.1aaabab | kg | Suministro y montaje acero S 235 JR atornillado e/celosías, cerchas

3,25 €

Suministro de acero S 235JR, en perfil laminado en caliente serie L, LD, T, redondo, cuadrado, rectangular, hexagonal o chapa, acabado con capa de imprimación antioxidante, con montaje atornillado en celosías y cerchas de acero, incluso parte proporcional de cortes, piezas especiales y despuntes, según SE-A del CTE y Código Estructural.

Código	Unidad	Resumen	Precio unitario	Rendimiento	Importe
EEHE.1aaabab	kg	Suministro y montaje acero S 235 JR atornillado	2,83 €	1,150	3,25 €

Figura 8-49. Coste de ejecución del acero S235JR.

Por lo tanto, el coste de ejecución de esta configuración estructural sería:

$$3,25 \left( \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) \cdot 60.539,61 \text{ (kg)} = 196.753,73 \text{ €}$$

### ST\_G20\_F1\_ORG\_275

La segunda optimización realizada con este modelo presenta una nueva limitación de movimientos en los nudos, que se ha expresado anteriormente. Se adjunta el modelo de la estructura como referencia (Figura 8-510) y la tabla de perfilería asignada por VTAM con el peso total de la nueva configuración (Figura 8-511).

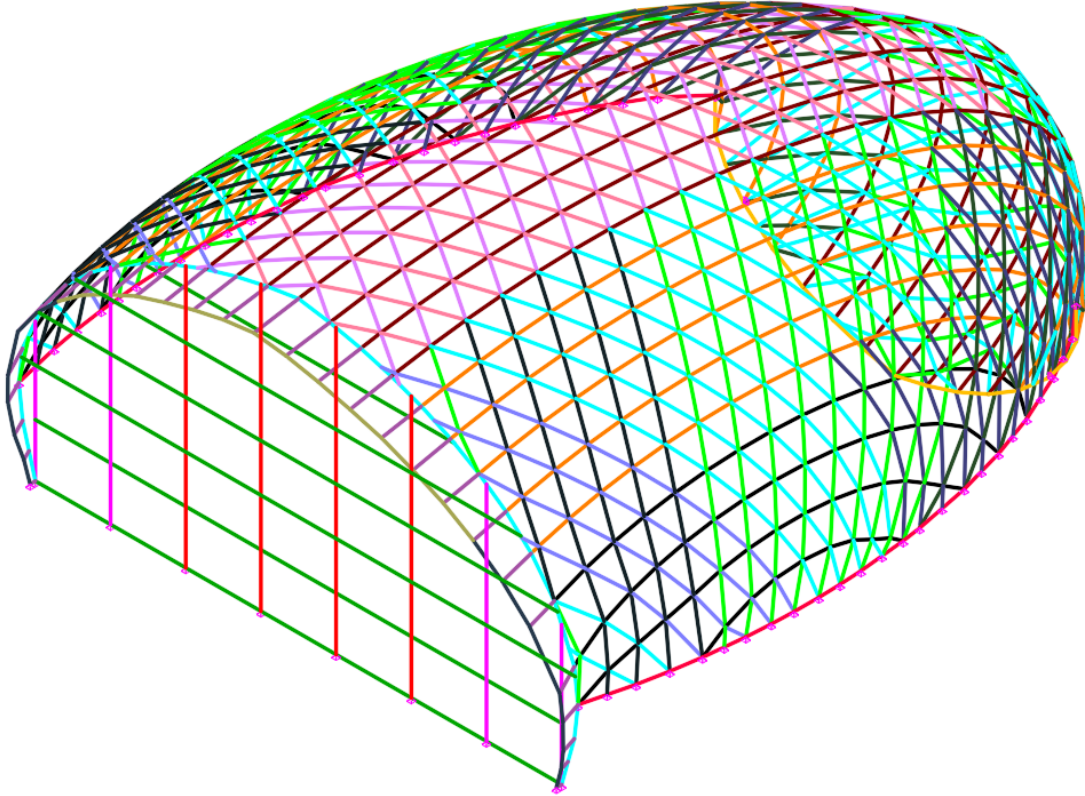


Figura 8-510. Modelo estructural ST\_G20\_F1\_ORG\_275.

ST_G20_F1_ORG_275						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	248	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 60 x 4	5804,5418	9,90%
	2	270		PHR 80 x 60 x 4	5907,5072	9,88%
	3	226		PHR 100 x 80 x 4	5297,291	8,86%
	11	116		PHR 100 x 80 x 4	2393,095	4,00%
	12	112		PHR 140 x 100 x 4	4503,3705	7,53%
	13	108		PHR 120 x 80 x 4	3503,717	5,86%
	14	34		PHR 60 x 40 x 2	242,8712	0,41%
	15	64		PHR 100 x 80 x 4	1635,436	2,74%
	16	84		PHR 80 x 60 x 3	1338,5331	2,24%
	18	112		PHR 140 x 80 x 4	3531,633	5,91%
	19	203		PHR 100 x 60 x 4	4397,6786	7,36%
	20	106		PHR 140 x 60 x 4	3115,777	5,21%
	Travesaños de la fachada	4		6	PHC UNE lc 120 x 120 x 5	PHR UNE lc 100 x 100 x 5
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 550	7901,24	13,22%
	6	4		IPE 400	3278,535	5,48%
Viga Cajón Fachada	7	26	PHR UNE lc 500 x 300 x 20	PHR UNE lc 250 x 150 x 6,3	2377,809	3,98%
Viga Cajón Mirador	8	16	PHC UNE lc 300 x 300 x 16	PHC UNE lc 200 x 200 x 6,3	1342,0968	2,25%
Visera de la cúpula	9	29	PHC UNE lc 120 x 120 x 6,3	PHC UNE lc 40 x 40 x 3,2	210,2931	0,35%
	10	14		PHC UNE lc 50 x 50 x 2,6	117,923	0,20%
	17	14		PHC UNE lc 70 x 70 x 4	259,5728	0,43%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	58613,39					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	44,53%					

Figura 8-50. Tabla de perfiles optimizados ST\_G20\_F1\_ORG\_275.

Esta configuración presenta un peso mayor que el modelo ST\_G20\_F1\_ORG. Esto puede ser debido a que, tal y como se ha explicado en el apartado 8.3, VTAM ha encontrado un mínimo local y se ha quedado atascado buscando, siendo incapaz de encontrar otro valle en el mapeado del territorio. Por eso vamos a descartar esta configuración y mantener la configuración optimizada del modelo ST\_G20\_F1\_ORG (Figura 8-33).

Según el generador de precios del IVE. El precio para ejecutar un kg de acero S275 con las condiciones de ejecución de la estructura se establece según la Figura 8-52:

EERA.1\$ | kg | Suministro y montaje de acero estructural en celosías y cerchas

	TIPO ACERO	GRADO DUCTILIDAD	FABRICACIÓN	SECCIÓN	PROTECCIÓN	MONTAJE
a	<input type="radio"/> S 235	<input checked="" type="radio"/> JR	<input checked="" type="radio"/> laminado en caliente	<input type="radio"/> serie IPN, IPE, HEB, HEA, HEM, UPN	<input checked="" type="radio"/> imprimación	<input type="radio"/> soldado
b	<input checked="" type="radio"/> S 275	<input type="radio"/> J0	<input type="radio"/> conformado en frío	<input checked="" type="radio"/> serie L, LD, T, red, cua, rect, chapa	<input type="radio"/> galvanizado	<input checked="" type="radio"/> atornillado
c	<input type="radio"/> S 355	<input type="radio"/> J2		<input type="radio"/> huecos: red, cua, rect		
d				<input type="radio"/> serie L, U, C, Z, omega, tb		



EERA.1baabab | kg | Suministro y montaje acero S 275 JR atornillado e/celosías, cerchas

4,05 €

Suministro de acero S 275JR, en perfil laminado en caliente serie L, LD, T, redondo, cuadrado, rectangular, hexagonal o chapa, acabado con capa de imprimación antioxidante, con montaje atornillado en celosías y cerchas de acero, incluso parte proporcional de cortes, piezas especiales y despuntes, según SE-A del CTE y Código Estructural.

Código	Unidad	Resumen	Precio unitario	Rendimiento	Importe
EERE.1baabab	kg	Suministro y montaje acero S 275 JR atornillado	3,52 €	1,150	4,05 €

Figura 8-52. Coste de ejecución del acero S275JR.

Por lo tanto, el coste de ejecución de esta configuración estructural sería:

$$4,05 \left( \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) \cdot 54.730,51 (\text{kg}) = 221.658,56 \text{ €}$$

### ST\_G20\_F1\_ORG\_355

La optimización realizada con esta configuración presenta la nueva limitación de movimientos en los nudos, que se ha definido anteriormente y además presenta un material diferente, el acero S355. Se adjunta el modelo de la estructura como referencia (Figura 8-543) y la tabla de perfilería asignada por VTAM con el peso total de la nueva configuración (Figura 8-544).



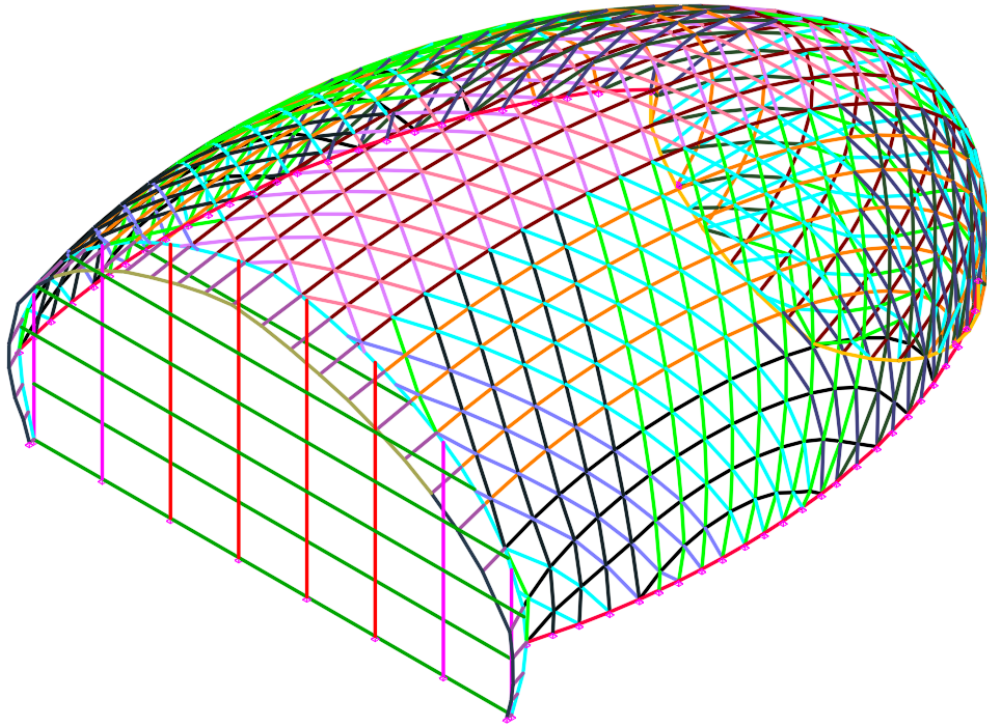


Figura 8-543. Modelo estructural ST\_G20\_F1\_ORG\_355.

ST_G20_F1_ORG_355						
FUNCIÓN DE LA BARRA	FAMILIA	Nº BARRAS	PERFIL ASIGNADO	PERFIL OPTIMIZADO	PESO ABSOLUTO	PESO RELATIVO
Barras de la cubierta	1	248	PHR 140 x 60 x 5	PHR 100 x 60 x 4	5804,5418	10,49%
	2	270		PHR 80 x 60 x 3	4479,3952	8,09%
	3	226		PHR 120 x 80 x 4	5783,281	10,45%
	11	116		PHR 100 x 80 x 4	2393,095	4,32%
	12	112		PHR 120 x 80 x 4	3683,169	6,65%
	13	108		PHR 120 x 80 x 4	3503,717	6,33%
	14	34		PHR 80 x 40 x 3	455,1712	0,82%
	15	64		PHR 120 x 60 x 4	1500,4	2,71%
	16	84		PHR 100 x 50 x 5	2285,7066	4,13%
	18	112		PHR 100 x 60 x 5	3219,5352	5,82%
	19	203		PHR 100 x 80 x 4	5061,742	9,15%
20	106	PHR 80 x 60 x 3	1683,5669	3,04%		
Travesaños de la fachada	4	6	PHC UNE lc 120 x 120 x 5	PHC UNE lc 100 x 100 x 4	2372,482	4,29%
Soportes de la fachada	5	4	IPE 600	IPE 550	7901,24	14,28%
	6	4		IPE 400	3278,535	5,92%
Viga Cajón Fachada	7	26	PHR UNE lc 500 x 300 x 20	PHR UNE lc 200 x 100 x 6,3	1763,64	3,19%
Viga Cajón Mirador	8	16	PHC UNE lc 300 x 300 x 16	PHC UNE lc 200 x 200 x 5	1072,1348	1,94%
Visera de la cúpula	9	29	PHC UNE lc 120 x 120 x 6,3	PHC UNE lc 40 x 40 x 2,6	173,8195	0,31%
	10	14		PHC UNE lc 50 x 50 x 2,6	117,923	0,21%
	17	14		PHC UNE lc 70 x 70 x 3,2	205,087	0,37%
<b>PESO OPTIMIZADO</b>	55349,82					
<b>REDUCCIÓN DE PESO</b>	47,62%					

Figura 8-53. Tabla de perfiles optimizados ST\_G20\_F1\_ORG\_355.

Según el generador de precios del IVE. El precio para ejecutar un kg de acero S355 con las condiciones de ejecución de la estructura se establece según la Figura 8-55:

EEERA.1\$ | kg | Suministro y montaje de acero estructural en celosías y cerchas

TIPO ACERO	GRADO DUCTILIDAD	FABRICACIÓN	SECCIÓN	PROTECCIÓN	MONTAJE
a <input type="radio"/> S 235	<input checked="" type="radio"/> JR	<input checked="" type="radio"/> laminado en caliente	<input type="radio"/> serie IPN, IPE, HEB, HEA, HEM, UPN	<input checked="" type="radio"/> imprimación	<input type="radio"/> soldado
b <input type="radio"/> S 275	<input type="radio"/> J0	<input type="radio"/> conformado en frío	<input checked="" type="radio"/> serie L, LD, T, red, cua, rect, chapa	<input type="radio"/> galvanizado	<input checked="" type="radio"/> atornillado
c <input checked="" type="radio"/> S 355	<input type="radio"/> J2		<input type="radio"/> huecos: red, cua, rect		
d			<input type="radio"/> serie L, U, C, Z, omega, tb		

**FIE BDC**

EEERA.1caabab | kg | Suministro y montaje acero S 355 JR atornillado e/celosías, cerchas 4,66 €

Suministro de acero S 355JR, en perfil laminado en caliente serie L, LD, T, redondo, cuadrado, rectangular, hexagonal o chapa, acabado con capa de imprimación antioxidante, con montaje atornillado en celosías y cerchas de acero, incluso parte proporcional de cortes, piezas especiales y despuntes, según SE-A del CTE y Código Estructural.

Código	Unidad	Resumen	Precio unitario	Rendimiento	Importe
EEHE.1caabab	kg	Suministro y montaje acero S 355 JR atornillado	4,05 €	1,150	4,66 €

Figura 8-55. Coste de ejecución del acero S355JR.

Por lo tanto, el coste de ejecución de esta configuración estructural sería:

$$4,66 \left( \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) \cdot 55.349,82 \text{ (kg)} = 257.930,16 \text{ €}$$

Una vez analizados los diferentes materiales posibles se observa que es más rentable el acero S235JR. Este acero presenta un peso mayor de la optimización realizada, aunque su precio de construcción por unidad de peso es menor. En cambio, el acero S275 consigue reducir el peso, pero el coste de ejecución por unidad de peso es más caro que el acero S235. Después de este último proceso se da por finalizado el proceso de optimización, seleccionándose la configuración **ST\_G20\_F1\_ORG\_235**.

Respecto al riesgo de succión de la estructura seleccionada, se puede observar que seguirá habiendo cierta tracción en los apoyos (aunque menor que en el caso del modelo ST\_G20\_F1\_ORG ya que esta pesa más), pero como se ha demostrado en la página 88, esta situación no es incompatible con la estructura o los detalles presentados por el estudio. Cada barra soportaría 19,49 N/mm<sup>2</sup>. Valor muy lejano de los 235 N/mm<sup>2</sup> que soportan las barras de anclaje.

$$-2097,97 \text{ kN (succión del viento)} > 1282,75 \text{ kN (peso del vidrio)} + (\text{peso de la estructura})$$

$$2097,97 \text{ kN} - 1282,75 \text{ kN} = 815,22 \text{ kN}$$

$$\frac{815,22 \text{ kN}}{2 \cdot 26 \text{ anclajes}} = 15,67 \text{ kN/anclaje}$$

$$\frac{15,67 \text{ kN/anclaje}}{4 \text{ barras/anclaje}} = 3,91 \text{ kN/barra}$$

$$\frac{3919 \text{ N}}{\pi \cdot 8^2 \text{ mm}^2} = 19,49 \text{ N/mm}^2$$

## 9. COMPARACIÓN CON LA ESTRUCTURA ORIGINAL

Finalmente, después de los varios procesos de optimización se ha seleccionado el modelo ST\_G20\_F1\_ORG\_235 como la mejor configuración de la estructura.

El modelo ha sido seleccionado por presentar el menor peso en la primera respecto a los demás 17 posibles modelos. Es cierto que los modelos de sección de acero abierta presentan una mayor reducción de peso del total, pero los modelos de sección de acero hueca permiten un mayor ajuste a las solicitaciones, siendo por lo tanto más eficientes en el uso del material. Además, en el segundo proceso de optimización se ha observado que la configuración seleccionada presenta un coste global más barato que los modelos homólogos con diferentes clases de acero.

Finalmente, el proceso de optimización ha logrado reducir el peso de la bóveda desde un peso inicial de 106.743,15 kg (Figura 9-1) hasta un total de 60.539,61 kg (Figura 9-2). Esta reducción supone un 56,7% del peso inicial. Aplicando los precios unitarios del instituto valenciano de la edificación hemos conseguido un ahorro de 235.556,03 € partiendo de un precio inicial de 432.309,76 €, llegando a un coste de 196.753,73 €. En lo que respecta a los gases de efecto invernadero, cada tonelada de acero producida genera 1.91 toneladas de CO<sub>2</sub> [22] (media mundial de 2022 según un estudio de la World Steel Association) que se emiten a la atmósfera. La optimización ha conseguido reducirlos de 203,8 toneladas, a 115,25 toneladas, una reducción de aproximadamente la mitad. Esta reducción alinea el objetivo del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, reduciendo los residuos emitidos, limitando así el impacto sobre el clima y la biodiversidad.

A continuación, se muestra la imagen de la estructura del modelo con las barras en verdadera magnitud en comparación con la estructura original.

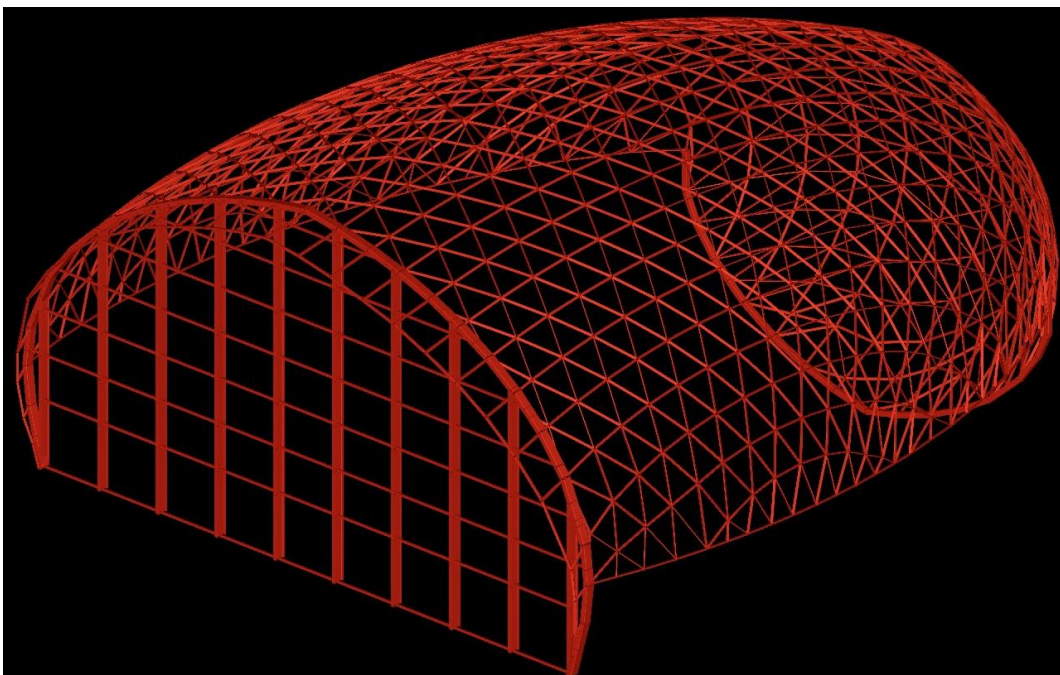


Figura 9-1. Visualización 3d de las barras de la estructura original

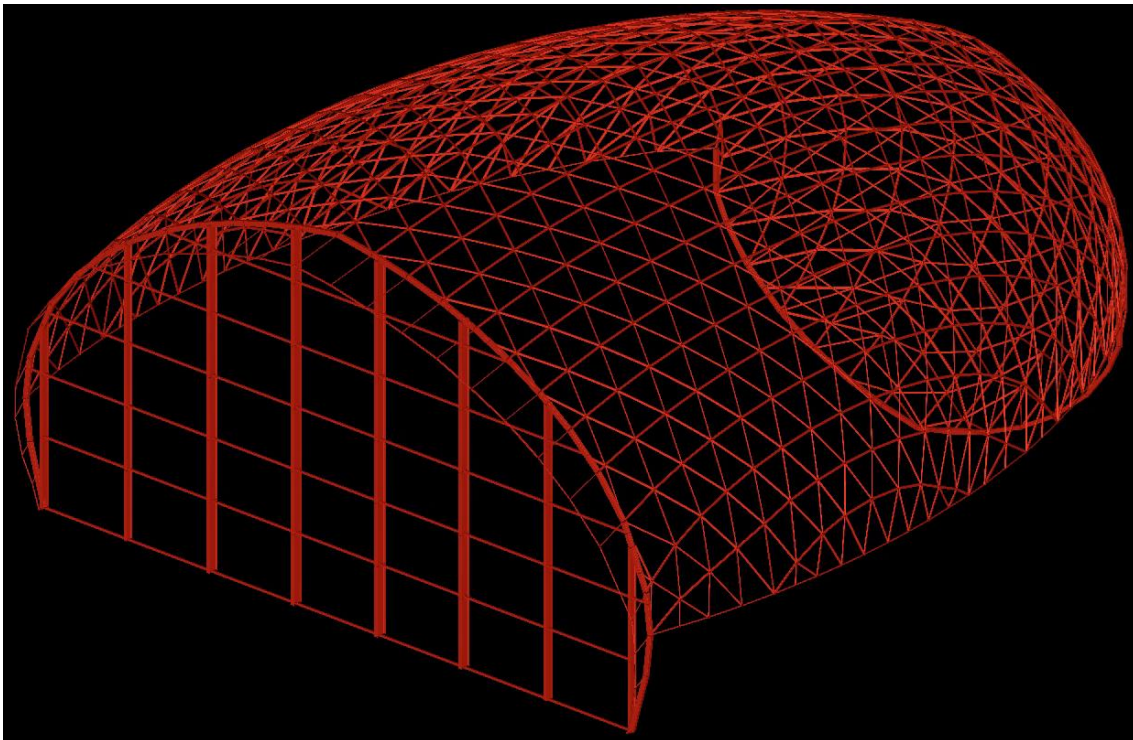


Figura 9-2. Visualización 3d de las barras de la estructura solución ST\_G20\_F1\_ORG\_235.

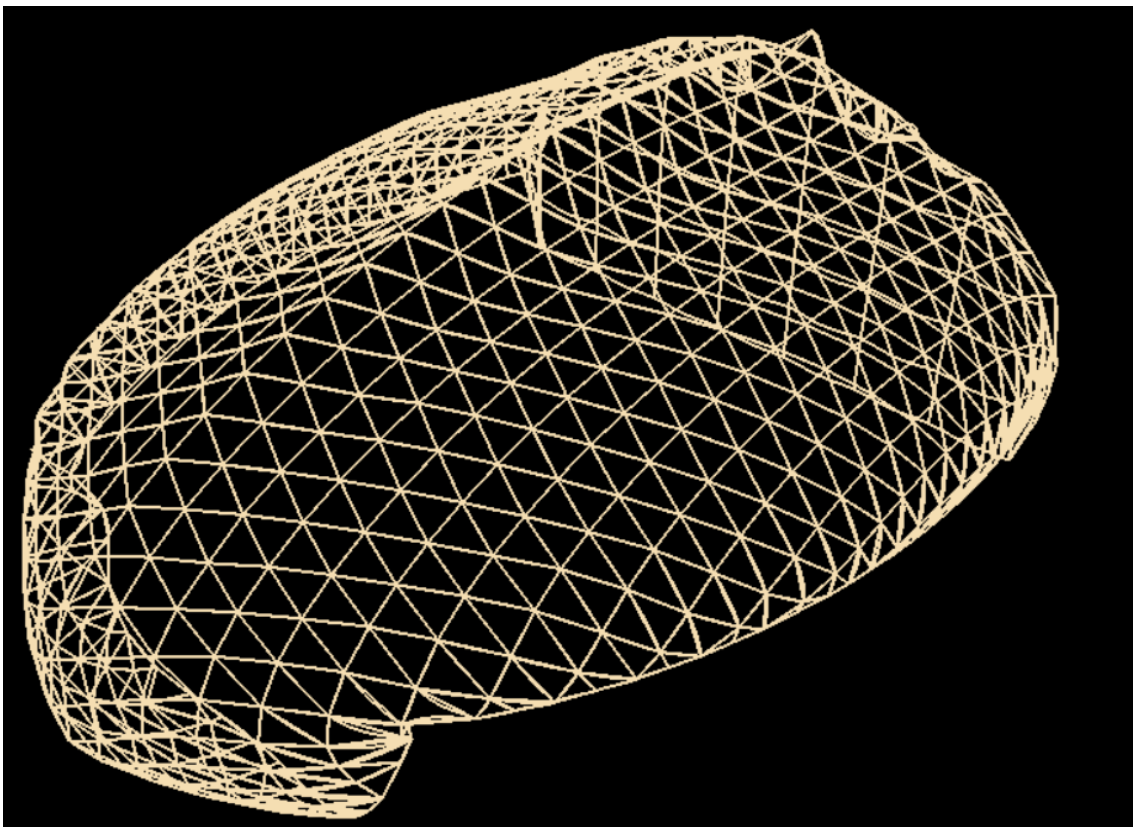


Figura 9-3. Deformada de la estructura solución ST\_G20\_F1\_ORG\_235.

## 10. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo final de grado se ha expuesto como a lo largo de varias exposiciones regionales y nacionales surge la actual Feria de Muestras de Valencia y como se hace necesaria la presencia de un edificio como el que se ha estudiado. Se ha analizado la construcción del edificio y se ha estudiado la estructura de este, en concreto de su cubierta.

La estructura de la cubierta está formada por un entramado triangulado monocapa de barras de acero rectangulares huecas que conforman un elipsoide deformado. La estructura de barras sujeta una envolvente compuesta por paneles de vidrio de control solar con forma triangular que se deforma para amoldarse a los triángulos formados por las barras. La cubierta presenta dos frentes principales, en uno de ellos se encuentra el acceso al edificio a través de una fachada de montantes y travesaños compuesta de paneles de vidrio. En la fachada trasera se encuentra uno de los extremos del elipsoide que hace la función de mirador para los visitantes del edificio.

La parte principal del trabajo ha sido el proceso de modelado y de optimización de la estructura de estudio. Se contactó con los despachos encargados de proyectar, calcular y construir la cúpula para solicitar la información necesaria. Se generó un modelo inicial en Architrave de acuerdo con las especificaciones del proyecto de ejecución facilitado modificando aquellos aspectos que diferían de la realidad para asemejarse más a la construcción actual. A su vez se calcularon las acciones y se aplicaron sobre el modelo para poder verificar el cumplimiento de las barras de la estructura y poder obtener el peso de partida.

Posteriormente se procedió a identificar aquellos parámetros sobre los cuales se podía actuar para generar diferentes combinaciones de la cúpula y poder entonces generar una cantidad de iteraciones de la estructura suficientes como para alcanzar un resultado satisfactorio para el problema planteado. La modulación de los montantes y travesaños de la fachada, los tipos de perfiles asignados a las barras o las familias en las que se agrupan las barras han sido los parámetros sobre los cuales se han generado los diferentes modelos que se han mandado a optimizar. Cada uno de los modelos se envió a la web de optimización VTAM y se comparó con el modelo inicial para ver el peso de la configuración optimizada y la reducción de peso respecto al peso inicial.

Tras la primera aproximación al resultado se compararon los modelos optimizados entre sí. De esta comparación se extraen varias conclusiones:

- La asignación de barras en diferentes familias ha sido vital para la optimización permitiendo un mayor ajuste de los perfiles a las exigencias de las diferentes familias de barras.
- Una modulación más amplia en fachada permite, no solo eliminar barras, sino que además se puede llegar a reducir la sección de los perfiles usados levemente.

Además, el segundo proceso de optimización ha permitido determinar el tipo de acero más rentable para la estructura, resultando que el acero S275JR no es el óptimo, si no el S235JR. Esta conclusión puede tener una valiosa aplicación más allá del campo de la optimización, puesto que en gran medida en la construcción se acude

al acero S275 de forma automática sin plantear la posibilidad de que otros materiales puedan funcionar igual de bien.

Ha sido muy didáctico ir observando como cada proceso de optimizado iba ajustando cada vez más los modelos. Personalmente, me ha permitido comprender mejor ciertos aspectos de las estructuras que muchas veces, por falta de tiempo, no se puede uno parar a pensar con detenimiento.

El proceso de trabajo ha supuesto en mí un proceso interno de aprendizaje que valoro mucho. Architrave y VTAM son programas muy útiles en el manejo de las estructuras y muy intuitivos a la hora de usarlos. Además, proporcionan datos de manera visual y clara para una correcta interpretación de estos. El manejo de los programas ha permitido trabajar de manera eficiente pudiendo estudiar 21 estructuras diferentes aparte de la original. El proceso de trabajo ha permitido alcanzar una precisión en la optimización suficiente como para proponer un modelo como óptimo. Siempre me ha gustado la resolución de problemas y este trabajo ha supuesto un desafío tanto a la hora de la modelización como a la hora de la optimización que me ha ayudado a comprender más el comportamiento de las estructuras y ganar más intuición en el desarrollo de los cálculos.

Previo a la realización del trabajo la optimización de estructuras era algo que desconocía, era consciente de que muchas veces se sobredimensionaban las estructuras ya fuera por comodidad de construcción, uniformidad de perfiles, u otros motivos. De todos modos, creo que es un campo de grandísima utilidad y que queda muchas veces descuidado en los proyectos. La optimización estructural no solo permite ahorro de presupuesto en materiales como se ha podido demostrar en el trabajo, permite una reducción de las emisiones de gases contaminantes y un mayor ahorro de energía. Antes, estos aspectos eran más dejados de lado, pero hoy en día la emergencia climática es un problema de todos y, siendo la construcción uno de los sectores que más contaminación produce, todo ahorro es bienvenido. Este trabajo me ha permitido no solo aprender el uso de herramientas muy útiles para el futuro como Architrave y VTAM sino concienciarme de que tras un edificio o una estructura hay detrás un gasto sustancial de recursos, tanto financieros como energéticos.

## 11. REFERENCIAS

- [1] A. Pérez García, A. Alonso Durá, F. Gómez Martínez, J. M. Alonso Ávalos, and P. Lozano Lloret, "Architrave." Universitat Politècnica de València, Valencia, 2019. Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.architrave.es/index.php>
- [2] A. Pérez García and P. Lozano Lloret, "About the VTAM research project." Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <https://vtam.optimizer.upv.es/About.aspx>
- [3] Feria Valencia, "Centro de eventos: Convention & Exhibition Centre." Accessed: Mar. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.feriavalencia.com/wp-content/uploads/2015/11/CENTRO-DE-EVENTOS-B.pdf>
- [4] "IVE." Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: [https://bdc.five.es/BDC23/1/EERA.1\\$](https://bdc.five.es/BDC23/1/EERA.1$)
- [5] "Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible." Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [6] N. Bas Martín and M. Portolés Sanz, "Ilustración y Progreso: La Real Sociedad Económica de Amigos del País de Valencia (1776-2009)," Real Sociedad Económica de Amigos del País de Valencia, Ed., 2010. Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://rseap.webs.upv.es/rseapv/ilustracion-y-progreso/>
- [7] REAL SOCIEDAD ECONÓMICA DE AMIGOS DEL PAIS DE VALENCIA, "ALBUM DE LA EXPOSICIÓN REGIONAL DE AGRICULTURA, INDUSTRIA Y ARTES DE 1883," BIBLIOTECA NACIONAL DE ESPAÑA. Accessed: Apr. 04, 2023. [Online]. Available: <https://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000205866&page=1>
- [8] "Tomas Llavador - Arquitectos+Ingenieros." Accessed: Apr. 03, 2023. [Online]. Available: [https://www.tomasllavador.com/index.php/es/jose\\_maria\\_tomas\\_llavador/curriculum](https://www.tomasllavador.com/index.php/es/jose_maria_tomas_llavador/curriculum)
- [9] "¿Quiénes somos? – Feria Valencia." Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.feriavalencia.com/quienes-somos/>
- [10] "Espacios – Feria Valencia." Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.feriavalencia.com/espacios-en-feria-valencia/>
- [11] Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.
- [12] "Mero.de - International Trade Center EUROVEA." Accessed: Nov. 14, 2023. [Online]. Available: <https://mero-tsk.de/en/construction-systems-hidden/32-references/46-facade-roof-projects/151-international-trade-center-eurovea-2.html>
- [13] "Mero.de - EGO Roof Erbach - Wave in Free Form." Accessed: Nov. 14, 2023. [Online]. Available: <https://mero-tsk.de/en/construction-systems-hidden/32-references/36-space-structures/720-ego-roof-erbach-wave-in-free-form-en.html>
- [14] MERO TSK, "MERO VISION," 41, 2007. Accessed: Mar. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.mero.de/images/pdf/Vision41.pdf>

- [15] “Mero.de - • TK-Disc Node System.” Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.mero.de/en/construction-systems/nodesx/tk-disc-node-system-en.html>
- [16] “Documento Básico SE-AE.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>
- [17] “NCSE 02”, Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: [https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/0820200.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf)
- [18] “Documento básico SE.” Accessed: Oct. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE.pdf>
- [19] “Documento Básico SE-A.” Accessed: Sep. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-A.pdf>
- [20] A. Perez-Garcia, A. Guardiola-Víllora, P. L. Lloret, J. Miguel, A. Abalos, and A. G. Víllora, “VTAM. Vast Territories Aerial Mapping. Web based application for Structural Optimization. FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM Vast Territories Aerial Mapping Web based application intended for Structural Optimization,” 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.11870.25921/1.
- [21] A. Perez-Garcia, P. L. Lloret, J. Miguel, A. Abalos, and A. G. Víllora, “Vast Territories Aerial Mapping Web based application intended for Structural Optimization”, doi: 10.13140/RG.2.2.20656.58888.
- [22] “Sustainability Indicators 2023 report - worldsteel.org.” Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators-2023-report/>



## 12. ÍNDICE DE IMÁGENES

### **FIGURA 1-1. PORTADA**

[https://www.feriavalencia.com/wp-content/uploads/2015/06/exteriores-centro-de-eventos-feria-valencia-convention-exhibition-centre-feria-valencia-exteriors\\_6921083734\\_o.jpg](https://www.feriavalencia.com/wp-content/uploads/2015/06/exteriores-centro-de-eventos-feria-valencia-convention-exhibition-centre-feria-valencia-exteriors_6921083734_o.jpg)

### **RELACIÓN CON LOS ODS**

#### **FIGURA 2-1. ODS 1.**

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

#### **FIGURA 2-2. ODS 3.**

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

#### **FIGURA 2-3. ODS 8.**

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

#### **FIGURA 2-4. ODS 9.**

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

#### **FIGURA 2-5. ODS 11.**

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

#### **FIGURA 2-6. ODS 12.**

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

#### **FIGURA 2-7. ODS 13.**

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

#### **FIGURA 2-8. ODS 15.**

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

### **LA FIRA VALENCIA Y SUS ANTECEDENTES**

#### **FIGURA 3-1. CARTEL DE LA EXPOSICIÓN REGIONAL DE 1867.**

<https://almadeherrero.blogspot.com/2016/06/exposiciones-regionales-valencianas.html>

#### **FIGURA 3-2. FOTOGRAFÍA DE LA FERIA NACIONAL VALENCIANA.**

REAL SOCIEDAD ECONÓMICA DE AMIGOS DEL PAIS DE VALENCIA, "ALBUM DE LA EXPOSICIÓN REGIONAL DE AGRICULTURA, INDUSTRIA Y ARTES DE 1883," BIBLIOTECA NACIONAL DE ESPAÑA. Accessed: Apr. 04, 2023. [Online]. Available: <https://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000205866&page=1>

#### **FIGURA 3-3. CARTEL PUBLICITARIO DE LA EXPOSICIÓN NACIONAL VALENCIANA DE 1910.**

<http://sofima.hol.es/wp-content/uploads/2020/05/ExposicionValenciana-6.jpg>

#### **FIGURA 3-4. CARTEL PUBLICITARIO DE LA EXPOSICIÓN REGIONAL VALENCIANA DE 1909.**

<https://bivaldi.gva.es/es/consulta/registro.cmd?id=7105>

#### **FIGURA 3-5. UNA DE LAS SALAS DE LA FERIA MUESTRARIO EN LA ESTACIÓN DEL NORTE EN 1917. FOTO DE GÓMEZ DURÁN**

<https://www.valenciabonita.es/wp-content/uploads/2017/02/0001-16-1080x572.jpg>

#### **FIGURA 3-6. LA FERIA MUESTRARIO EN SU ANTIGUO EMPLAZAMIENTO EN LA ALAMEDA.**

<https://www.valenciabonita.es/wp-content/uploads/2017/02/Feria-muestrario-c-1948-post-31102.jpg>

**FIGURA 3-7. ACTUAL EMPLAZAMIENTO DE LA FERIA DE MUESTRAS INTERNACIONAL DE VALENCIA.**

[https://valenciaplaza.com/public/Image/2019/4/1554926524imagen146243g\\_NoticiaAmpliada\\_forCrop\\_NoticiaAmpliada.jpg](https://valenciaplaza.com/public/Image/2019/4/1554926524imagen146243g_NoticiaAmpliada_forCrop_NoticiaAmpliada.jpg)

**FIGURA 3-8. FACHADA SURESTE DEL CENTRO DE EVENTOS.**

<http://www.jdiezarnal.com/benimametferiamuestrasrepcion01.jpg>

**EL FORO SUR**

**FIGURA 4-1. RETRATO DE JOSÉ MARÍA TOMÁS LLAVADOR.**

<https://www.tomasllavador.com/images/JoseMTomas.jpg>

**FIGURA 4-2. ORGANIZACIÓN DE LOS FOROS DE LA FERIA DE MUESTRAS DE VALENCIA**

Elaboración propia

**FIGURA 4-3. ESTRUCTURA DEL PABELLÓN 5**

[https://www.feriavalencia.com/wp-content/uploads/2015/07/pab5.lat\\_.jpg](https://www.feriavalencia.com/wp-content/uploads/2015/07/pab5.lat_.jpg)

**FIGURA 4-4. FACHADA DE ACCESO DEL CENTRO DE EVENTOS.**

<https://www.feriavalencia.com/wp-content/uploads/2015/09/auditorios-present.-producto-29.jpg>

**FIGURA 4-5. VISTA INTERIOR DE LA CUBIERTA DEL CENTRO DE EVENTOS Y SU NÚCLEO DE COMUNICACIÓN.**

<https://www.feriavalencia.com/wp-content/uploads/2015/09/evenos.jpg>

**FIGURA 4-6. EL PABELLÓN 5 DURANTE UNA GALA.**

<https://www.feriavalencia.com/wp-content/uploads/2015/07/WRH9503.jpg>

**FIGURA 4-7. PLANTA DE CUBIERTAS DEL CENTRO DE EVENTOS.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 4-8. PLANTA DE ACCESO AL CENTRO DE EVENTOS.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 4-9. ALZADOS TRANSVERSALES DEL CENTRO DE EVENTOS.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 4-10. SECCIONES LONGITUDINALES DEL CENTRO DE EVENTOS.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**LA MALLA TRIDIMENSIONAL**

**FIGURA 5-1. MALLA ESPACIAL MONOCAPA DEL EGO ROOF ERBACH.**

[https://mero-tsk.de/images/Bausysteme/Referenzen/EGO\\_Dach\\_Erbach/EGO\\_4\\_Small.jpg](https://mero-tsk.de/images/Bausysteme/Referenzen/EGO_Dach_Erbach/EGO_4_Small.jpg)

**FIGURA 5-2. MALLA ESPACIAL MONOCAPA DEL INTERNATIONAL TRADE CENTRE EUROVEA.**

<https://mero->

[Tsk.de/images/Bausysteme/Referenzen/international\\_trade\\_center\\_eurovea/Bratislava\\_innen.JPG](https://mero-tsk.de/images/Bausysteme/Referenzen/international_trade_center_eurovea/Bratislava_innen.JPG)

**FIGURA 5-3. BOCETO DEL ESTADO ANTERIOR DE LA CÚPULA.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 5-4. MALLA ESPACIAL MONOCAPA DE LA CUBIERTA DEL CENTRO DE EVENTOS.**

Elaboración propia

**FIGURA 5-5. NUDO DE UNIÓN DE LAS BARRAS DE LA ESTRUCTURA. FOTOGRAFÍA IN SITU.**

Elaboración propia

**FIGURA 5-6. NUDOS DE UNIÓN DE LAS BARRAS DE LA ESTRUCTURA. MODELO DE MERO TSK.**

[https://www.mero.de/images/Bausysteme/knotensysteme/tellerknoten/06\\_Tellerknoten.jpg](https://www.mero.de/images/Bausysteme/knotensysteme/tellerknoten/06_Tellerknoten.jpg)

**FIGURA 5-7. DETALLE DEL ANCLAJE DE LA MALLA ESPACIAL A LA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO DEL EDIFICIO.**

Elaboración propia

**FIGURA 5-8. VISTA INTERIOR DE LA PENÚLTIMA PLANTA CON DETALLE DEL MIRADOR.**

<https://www.feriavalencia.com/wp-content/uploads/2017/05/hall-planta-3-catering.jpg>

**FIGURA 5-9. DETALLE DEL PERFIL DE LA VIGA CAJÓN DE LA FACHADA.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 5-10. DETALLE DEL PERFIL DE LA VIGA CAJÓN DEL MIRADOR.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 5-11. DETALLE DE PERFILERÍA USADA EN LA FACHADA.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 5-12. DIAGRAMAS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA ESTRUCTURA.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 5-13. EJECUCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE ACERO DE LA CUBIERTA. FOTOGRAFÍA IN SITU**

<https://www.tomasllavador.com/uploads/projects/590ed9beeb57a99aa25634ee71183f2c48b95ea0.jpg>

**FIGURA 5-14. INSTALACIÓN DE LOS PANELES DE VIDRIO. FOTOGRAFÍA IN SITU.**

<https://www.tomasllavador.com/uploads/projects/748fb976c6c2ec652399406f64e294a1ba0d9657.jpg>

**MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA**

**FIGURA 6-1. FRAGMENTO DEL DOCUMENTO CON COORDENADAS DE LOS NUDOS.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 6-2. APOYO TIPO DE LAS BARRAS TRIANGULADAS.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 6-3. ESQUEMA DE APOYO DE LA CUBIERTA EN LA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO DEL EDIFICIO.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 6-4. APOYO DE LA VIGA CAJÓN DE LA FACHADA.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 6-5. UNIÓN DE LA VIGA CAJÓN DEL MIRADOR CON LA VIGA DE HORMIGÓN ARMADO.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 6-6. APOYO DESLIZANTE DE LA VIGA CAJÓN DEL MIRADOR A NIVEL DE PENÚLTIMA PLANTA.**

Tomás Llavador Arquitectos + Ingenieros, "Proyecto básico y de ejecución de las obras de ampliación del recinto ferial de Valencia Fase III. Pabellón especial. Foro Sur." 2004.

**FIGURA 6-7. MODELO DE BARRAS DE LA ESTRUCTURA CON IDENTIFICACIÓN DE LOS ARCOS.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-8. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PANELES DE VIDRIO.**

A. Pérez García, A. Alonso Durá, F. Gómez Martínez, J. M. Alonso Ávalos, and P. Lozano Lloret, "Architrave." Universitat Politècnica de València, Valencia, 2019. Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.architrave.es/index.php>

**FIGURA 6-9. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PANELES DE ALUMINIO.**

A. Pérez García, A. Alonso Durá, F. Gómez Martínez, J. M. Alonso Ávalos, and P. Lozano Lloret, "Architrave." Universitat Politècnica de València, Valencia, 2019. Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.architrave.es/index.php>

**FIGURA 6-10. MODELO DE LA ESTRUCTURA CON LOS ELEMENTOS FINITOS Y ÁREAS DE REPARTO.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-11. TABLA 3.8 SOBRECARGAS DE NIEVE EN PROVINCIAS.**

"Documento Básico SE-A." Accessed: Sep. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-A.pdf>

**FIGURA 6-12. MODELO CON CARGAS HIP 03**

Elaboración propia

**FIGURA 6-13. FIGURA D.1 VALOR DE VELOCIDAD DE VIENTO.**

"Documento Básico SE-AE." Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

**FIGURA 6-14. TABLA 3.4 VALORES DEL COEFICIENTE DE EXPOSICIÓN.**

"Documento Básico SE-AE." Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

**FIGURA 6-15. ESQUEMA DE ACCIÓN DEL VIENTO DIRECCIÓN SE-NO.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-16. ESQUEMA PARA CÁLCULO DE ESBELTEZ.**

[https://calculocivil.com/sites/default/files/imagenes/\\_espana/cte/viento/edificio.gif](https://calculocivil.com/sites/default/files/imagenes/_espana/cte/viento/edificio.gif)

**FIGURA 6-17. OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE PRESIÓN Y SUCCIÓN.**

“Documento Básico SE-AE.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

**FIGURA 6-18. DIVISIÓN DE LA CUBIERTA EN 3 ZONAS SEGÚN ANEJO D.12.**

“Documento Básico SE-AE.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

**FIGURA 6-19. CÁLCULO DE CARGAS DE VIENTO PARA DIRECCIÓN SE-NO.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-20. MODELO CON CARGAS APLICADAS HIP 04.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-21. ESQUEMA DE ACCIÓN DEL VIENTO EN DIRECCIÓN SO-NE.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-22. ESQUEMA PARA CÁLCULO DE ESBELTEZ.**

[https://calculocivil.com/sites/default/files/imagenes/\\_espana/cte/viento/edificio.gif](https://calculocivil.com/sites/default/files/imagenes/_espana/cte/viento/edificio.gif)

**FIGURA 6-23. OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE PRESIÓN Y SUCCIÓN.**

“Documento Básico SE-AE.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

**FIGURA 6-24. DIVISIÓN DE LA CUBIERTA EN 3 ZONAS.**

“Documento Básico SE-AE.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

**FIGURA 6-25. TABLA 3.5 OBTENCIÓN DE COEFICIENTE EÓLICO (USADO EN FACHADA).**

“Documento Básico SE-AE.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

**FIGURA 6-26. CÁLCULO DE CARGAS DE VIENTO PARA DIRECCIÓN SO-NE.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-27. MODELO CON CARGAS APLICADAS HIP 05.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-28. ESQUEMA DE ACCIÓN DEL VIENTO EN DIRECCIÓN NO-SE.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-29. ESQUEMA PARA CÁLCULO DE ESBELTEZ.**

[https://calculocivil.com/sites/default/files/imagenes/\\_espana/cte/viento/edificio.gif](https://calculocivil.com/sites/default/files/imagenes/_espana/cte/viento/edificio.gif)

**FIGURA 6-30. DIVISIÓN DE LA CUBIERTA EN 3 ZONAS.**

“Documento Básico SE-AE.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

**FIGURA 6-31. OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE PRESIÓN Y SUCCIÓN.**

“Documento Básico SE-AE.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

**FIGURA 6-32. TABLA 3.5 OBTENCIÓN DE COEFICIENTES EÓLICOS.**

“Documento Básico SE-AE.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

**FIGURA 6-33. CARGAS DE VIENTO EN DIRECCIÓN NO-SE.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-34. MODELO CON CARGAS HIP 06,**

Elaboración propia

**FIGURA 6-35. VISTA TRASERA DEL MODELO ESTRUCTURAL.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-36. VISTA FRONTAL DEL MODELO ESTRUCTURAL.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-37. MAPA DE ACELERACIONES SÍSMICAS.**

“NCSE 02”, Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: [https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/0820200.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf)

**FIGURA 6-38. DETALLE DE LAS BARRAS DE LA FACHADA CON INCLINACIÓN.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-39. DETALLE DE LA VIGA CAJÓN DE MIRADOR CON INCLINACIÓN.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-40. TABLA DE BARRAS Y PERFILES ASIGNADOS.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-41. PERFILES ASIGNADOS POR COLORES**

Elaboración propia

**FIGURA 6-42. MODELO 3D DE LA ESTRUCTURA DE BARRAS.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-43. COMBINACIONES DE HIPÓTESIS ESTADO LÍMITE ÚLTIMO.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-44. COMBINACIONES DE HIPÓTESIS ESTADO LÍMITE DE SERVICIO.**

Elaboración propia

**FIGURA 6-45. COEFICIENTES DE MINORACIÓN Y LIMITACIÓN DE FLECHAS.**

A. Pérez García, A. Alonso Durá, F. Gómez Martínez, J. M. Alonso Ávalos, and P. Lozano Lloret, “Architrave.” Universitat Politècnica de València, Valencia, 2019. Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.architrave.es/index.php>

**FIGURA 6-46. DEFORMADA DE LA ESTRUCTURA ORIGINAL.**

Elaboración propia

**PROPUESTA DE MEJORA DE LA CUBIERTA EXISTENTE**

**FIGURA 7-1. TIPOS DE ACEROS ESTRUCTURALES.**

“Documento Básico SE-A.” Accessed: Sep. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-A.pdf>

**PROCESO DE OPTIMIZACIÓN**

**FIGURA 8-1. TABLA DE ASIGNACIÓN DE PERFILES HUECOS Y CÁLCULO DEL PESO TOTAL.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-2. TABLA DE ASIGNACIÓN DE PERFILES ABIERTOS Y CÁLCULO DEL PESO**

Elaboración propia

**FIGURA 8-3. MAPA TOPOGRÁFICO RELACIONANDO LOS PUNTOS CON EL COSTE.**

A. Perez-Garcia, A. Guardiola-Víllora, P. L. Lloret, J. Miguel, A. Abalos, and A. G. Víllora, "VTAM. Vast Territories Aerial Mapping. Web based application for Structural Optimization. FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM Vast Territories Aerial Mapping Web based application intended for Structural Optimization," 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.11870.25921/1.

**FIGURA 8-4. MAPA TOPOGRÁFICO CON NIVEL DEL MAR AÑADIDO.**

A. Perez-Garcia, A. Guardiola-Víllora, P. L. Lloret, J. Miguel, A. Abalos, and A. G. Víllora, "VTAM. Vast Territories Aerial Mapping. Web based application for Structural Optimization. FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM Vast Territories Aerial Mapping Web based application intended for Structural Optimization," 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.11870.25921/1.

**FIGURA 8-5. VISUALIZACIÓN DEL PROCESO ITERATIVO DE BÚSQUEDA DE VTAM.**

A. Perez-Garcia, A. Guardiola-Víllora, P. L. Lloret, J. Miguel, A. Abalos, and A. G. Víllora, "VTAM. Vast Territories Aerial Mapping. Web based application for Structural Optimization. FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM Vast Territories Aerial Mapping Web based application intended for Structural Optimization," 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.11870.25921/1.

**FIGURA 8-6. FICHERO DE ARGUMENTOS.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-7. DESPACHO EN LA ETSAV CON LOS ORDENADORES DE CÁLCULO.**

A. Perez-Garcia, A. Guardiola-Víllora, P. L. Lloret, J. Miguel, A. Abalos, and A. G. Víllora, "VTAM. Vast Territories Aerial Mapping. Web based application for Structural Optimization. FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM Vast Territories Aerial Mapping Web based application intended for Structural Optimization," 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.11870.25921/1.

**FIGURA 8-8. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G6\_F1\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-9. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G6\_F1\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-10. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G6\_F1\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-11. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G6\_F1\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-12. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G6\_F2\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-13. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G6\_F2\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-14. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G6\_F2\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-15. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G6\_F2\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-16. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G6\_F3\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-17. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G6\_F3\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-18. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G6\_F3\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-19. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G6\_F3\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-20. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G13\_F1\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-21. TABLAS DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G13\_F1\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-22. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G13\_F1\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-23. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G13\_F1\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-24. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G13\_F2\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-25. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G13\_F2\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-26. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G13\_F2\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-27. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G13\_F2\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-28. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G13\_F3\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-29. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G13\_F3\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-30. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G13\_F3\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-31. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G13\_F3\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-32. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G20\_F1\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-33. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G20\_F1\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-34. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G20\_F1\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-35. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G20\_F1\_ALT.**



Elaboración propia

**FIGURA 8-36. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G20\_F2\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-37. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G20\_F2\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-38. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G20\_F2\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-39. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G20\_F2\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-40. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G20\_F3\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-41. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G20\_F3\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-42. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G20\_F3\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-43. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G20\_F3\_ALT.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-44. MODELO 3D DE LA ESTRUCTURA DE PARTIDA.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-45. MODELO 3D DE LA ESTRUCTURA SELECCIONADA ST\_G20\_F1\_ORG.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-46. GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE LAS ITERACIONES.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-47. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G20\_F1\_ORG\_235.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-48. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G20\_F1\_ORG\_235.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-49. COSTE DE EJECUCIÓN DEL ACERO S235JR.**

[https://bdc.f-ive.es/BDC23/3/EERA.1\\$/aaabab](https://bdc.f-ive.es/BDC23/3/EERA.1$/aaabab)

**FIGURA 8-50. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G20\_F1\_ORG\_275.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-51. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G20\_F1\_ORG\_275.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-52. COSTE DE EJECUCIÓN DEL ACERO S275JR.**

[https://bdc.f-ive.es/BDC23/3/EERA.1\\$/baabab](https://bdc.f-ive.es/BDC23/3/EERA.1$/baabab)

**FIGURA 8-53. MODELO ESTRUCTURAL ST\_G20\_F1\_ORG\_355**

Elaboración propia

**FIGURA 8-54. TABLA DE PERFILES OPTIMIZADOS ST\_G20\_F1\_ORG\_355.**

Elaboración propia

**FIGURA 8-55. COSTE DE EJECUCIÓN DEL ACERO S355JR.**

[https://bdc.f-ive.es/BDC23/3/EERA.1\\$/caabab](https://bdc.f-ive.es/BDC23/3/EERA.1$/caabab)

**COMPARACIÓN CON LA ESTRUCTURA ORIGINAL**

**FIGURA 9-1. VISUALIZACIÓN 3D DE LAS BARRAS DE LA ESTRUCTURA ORIGINAL**

Elaboración propia

**FIGURA 9-2. VISUALIZACIÓN 3D DE LAS BARRAS DE LA ESTRUCTURA SOLUCIÓN ST\_G20\_F1\_ORG\_235.**

Elaboración propia

**FIGURA 9-3. DEFORMADA DE LA ESTRUCTURA SOLUCIÓN ST\_G20\_F1\_ORG\_235.**

Elaboración propia