



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: Trénor Dalmau, Ignacio Vicente

Tutor/a: Pérez García, Agustín José

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



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: Trénor Dalmau, Ignacio Vicente

Tutor: Pérez García, Agustín José

2022

0. RESUMEN. RESUM. ABSTRACT.

Resumen

La premisa de este trabajo es mejorar una estructura desde el punto de vista de reducir su coste material, económico y medioambiental. Se va a optimizar la celosía completa de un centro deportivo de la Universidad de A Coruña, cuyos arquitectos son Javier Estévez Cimadevila y José A. Vázquez Rodríguez. La estructura original está construida en madera, nosotros la estudiaremos cambiando el material a acero.

Primero se aportará una descripción del edificio y su proceso constructivo, así como de la celosía en particular, para así poder modelizarla.

Por último, mediante el programa de cálculo Architrave y VTAM, web de optimización, se estudiarán diferentes variantes de la celosía original, así como propuestas distintas, buscando aquellas que necesiten una cantidad de material menor. El proceso irá descartando aquellas configuraciones que claramente se vean alejadas del resto, centrándose en las que obtengan mejores resultados.

Palabras clave: Celosía espacial, barras tubulares, semioctaedro, fábrica reglada, tetraedro.

Resum

La premissa d'aquest treball és millorar una estructura des del punt de vista de reduir el seu cost material, econòmic i mediambiental. S'optimitzarà la gelosia completa d'un centre esportiu de la Universitat de A Coruña, els arquitectes de la qual són Javier Estévez Cimadevila i José A. Vázquez Rodríguez. L'estructura original està construïda en fusta, nosaltres l'estudiarem canviant el material a acer.

Primer s'aportará una descripció de l'edifici i el seu procés constructiu, així com de la gelosia en particular, per a així poder modelitzar-la.

Finalment, mitjançant el programa de càlcul Architrave i VTAM, web d'optimització, s'estudiaran diferents variants de la gelosia original, així com propostes diferents, buscant aquelles que necessiten una quantitat de material menor. El procés anirà descartant aquelles configuracions que clarament es vegem allunyades de la resta, centrant-se en les que obtinguen millors resultats.

Paraules clau: Gelosia espacial, barres tubulars, semioctaedre, fábrica reglada, tetraedre.

Abstract:

The premise of this essay is to improve a structure from the point of view of reducing its material, economic and environmental cost. The complete spatial truss of a sports center at the University of A Coruña, whose architects are Javier Estévez Cimadevila and José A. Vázquez Rodríguez, is going to be optimized. The original structure is built in wood, we will study it by changing the material to steel.

First, a description of the building and its construction process will be provided, as well as the spatial truss in particular, in order to model it.

Finally, through the calculation program Architrave and VTAM, an optimization website, different variants of the original spatial truss will be studied, as well as different proposals, looking for those that need a smaller amount of material. The process will discard those configurations that are clearly far from the rest, focusing on those that obtain the best results.

Keywords: Spatial truss, tubular bars, semioctahedron, ruled masonry, tetrahedron.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mi tutor, Agustín Pérez García, por llegar hasta el final.

En segundo lugar, agradecer a todos aquellos que me han acompañado durante la carrera.

Y por último y más importante, a mis padres.

ÍNDICE

0. RESUMEN, RESUM, ABSTRACT. PALABRAS CLAVE, PARAULES CLAU, KEYWORDS
1. OBJETIVOS, ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA
2. RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)
3. EL PROYECTO
4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL
5. MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA
6. PROPUESTA DE MEJORA DE LA ESTRUCTURA DE CUBIERTA EXISTENTE
7. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN
8. COMPARACIÓN ESTRUCTURA ORIGINAL CON ESTRUCTURA OPTIMIZADA
9. CONCLUSIONES
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
11. ÍNDICE DE IMÁGENES

1. OBJETIVOS, ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA

Objetivos:

Este trabajo cuenta con dos objetivos principales, aunque consecutivos, igual de importantes: por una parte, comparar la estructura original, de madera, con su equivalente en acero; por otra parte, la optimización de dicha estructura de acero reduciendo la cantidad de material, y por ende, su peso. Dado que la estructura se compone a partir de una repetición de una forma concreta un número limitado de veces, la optimización se centrará en dicha forma para mejorar la estructura a gran escala.

Se van a utilizar 3 programas para realizar el proceso de optimización: en primer lugar, se realizarán los modelos de las diferentes celosías en Autocad, en segundo lugar, a dichos modelos se les asignará el material, el tipo de sección y las acciones en el módulo de diseño de Architrave; por último, se utilizará la web de optimización VTAM para calcular dicha celosía.

Una vez se hayan calculado todas las posibilidades requeridas, se seleccionarán aquellas que hayan obtenido mejores resultados para refinar el proceso, modificando el canto, el tipo de sección y el tipo de acero, buscando una única solución final. Por último, se hará una comparativa de la mejor solución tanto con la celosía original de madera como con la celosía original de acero.

Antecedentes:

El trabajo se centra en la cubierta de un proyecto realizado, un edificio para el espacio deportivo de la Universidad de A Coruña, en el campus de A Zapateira. El proyecto se lleva a cabo en 2001 por los arquitectos Javier Estévez Cimadevila y José A. Vázquez Rodríguez, ambos profesores de dicha universidad. Dicha cubierta se realiza a partir de barras huecas de madera laminada y encolada. Una primera aproximación consistirá en transformar dicha cubierta y realizarla a partir de barras de acero.

Para la realización del trabajo se considerarán las dimensiones principales (ancho y largo) de la cubierta inalterables, modificando las dimensiones de las cerchas unitarias tales como su ancho, largo, alto, número de barras, forma primigenia (son semioctaedros)

Metodología:

En primer lugar, se introduce el trabajo aportando información sobre el edificio, sus autores, su geometría, así como su proceso constructivo.

En segundo lugar, el estudio se centra en la estructura espacial del edificio, todo lo relacionado a los esfuerzos que absorbe y las diferencias entre la celosía original y la celosía de acero.

Seguidamente, se realiza el grueso del trabajo: la optimización. Se irán calculando distintas celosías que o bien son similares a la original introduciendo modificaciones que buscan reducir su peso, o bien son celosías generadas a partir de geometrías diferentes. En esta parte del estudio es donde más utilizaremos la web VTAM, que será la que calcule el peso de todas las propuestas.

Por último, de todas las celosías se elegirán aquellas que hayan obtenido un peso menor y se introducirá el factor económico a través de la base de datos del Instituto Valenciano de la Edificación (IVE), obteniendo aquella celosía cuyo coste económico sea menor. Esta última celosía se comparará tanto con la celosía original en madera como con la celosía en acero.

2. RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En 2015, la ONU aprueba los siguiente 17 objetivos (ODS) [1]:

1. Fin de la pobreza.

Optimizar la estructura permite disminuir el coste final del proyecto, haciéndolo más accesible, también para países donde en un principio no podrían permitírselo.

2. Hambre cero.

3. Salud y bienestar.

Un uso más eficiente de los materiales permite ahorrar material, lo que conlleva una menor producción, reduciendo los residuos y gases que se generan en los procesos en los altos hornos.

4. Educación de calidad.

Todo avance en los procesos de creación y diseño de un proyecto permite mejorar la educación y el estudio sobre el tema.

5. Igualdad de género.

6. Agua limpia y saneamiento.

Un uso más eficiente de los materiales permite ahorrar material, lo que conlleva una menor producción, reduciendo los residuos que se generan en la fabricación y que pueden acabar vertidos en el mar.

7. Energía asequible y no contaminante.

8. Trabajo decente y crecimiento económico.

- Meta 8.2 Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra.

A partir de la optimización de los materiales se consigue un nivel mayor de productividad económica además de una modernización de la tecnología y la innovación. También permite una mejora en lo que a mano de obra se refiere.

- Meta 8.4 Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados.

La optimización de la estructura permite una mejora en la producción y en el consumo eficiente de los recursos.

9. Industria, innovación e infraestructura.
 - Meta 9.1 Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos.
 - Meta 9.4 De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.
 - Meta 9.5 Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.
 - Meta 9.6 Apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, incluso garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas.

10. Reducción de las desigualdades.

11. Ciudades y comunidades sostenibles.
 - Meta 11.6 De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo.

12. Producción y consumo responsables.
 - Meta 12.2 De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.
 - Meta 12.4 De aquí a 2020, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente.
 - Meta 12.5 De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

13. Acción por el clima.

14. Vida submarina.

15. Vida de ecosistemas terrestres.

16. Paz, justicia e instituciones sólidas.

17. Alianzas para lograr los objetivos.

3. EL PROYECTO

El proyecto se realizó en 2001, como parte del Campus de A Zapateira de la Universidad de A Coruña. Este campus está situado al sur de la ciudad de A Coruña, junto a la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, la Facultad de Ciencias y la Facultad de Filología, todas ellas de la ya citada UDC. Los proyectistas son Javier Estévez Cimadevila y José A. Vázquez Rodríguez.

J. Estévez es Catedrático de la Universidad de A Coruña en el departamento de Construcciones y Estructuras Arquitectónicas, Civiles y Aeronáuticas, donde es profesor titular J. A. Vázquez. Ambos pertenecen al Grupo de Investigación Grupo de Estructuras Arquitectónicas, donde ostentan los cargos de coordinador y PDI respectivamente. Ambos están centrados en las líneas de investigación de estructuras de madera y uniones de barras metálicas encoladas en piezas de madera.



Figura 1. Ubicación del proyecto

La idea del anteproyecto consistía en una malla espacial de módulos semioctaédricos apilables con diagonales paralelas a los bordes de la estructura. En un principio se pensó en sustentar dicha malla con cuatro barras tubulares de acero que estarían unidas a la capa inferior de la malla.

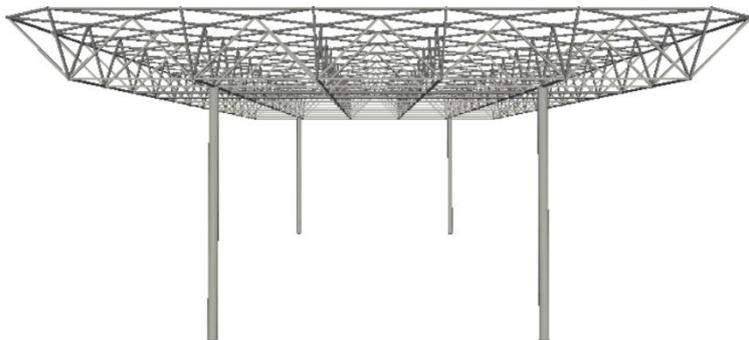


Figura 2. Modelización de una primera propuesta sustentada por cuatro barras tubulares.

Después de valorar la propuesta y viendo su potencial, la Universidad decide que el espacio a cubrir debe ser más versátil, albergando más disciplinas deportivas y también la posibilidad de realizar en su interior actividades culturales universitarias. Ante este nuevo enfoque del proyecto, se decide que se debe colocar un cerramiento para el espacio, dejando anticuada la propuesta inicial y con la necesidad de encontrar una nueva solución. Uno de los problemas a resolver era que además de como cerramiento, el elemento a proyectar debería también servir como soporte para la malla espacial.

Dado que la idea de los arquitectos era resolver simultáneamente ambos problemas, y que el proyecto contaba con un presupuesto muy limitado, como solución se propone un cerramiento de muros perimetrales de fábrica de ladrillo perforado “gresificado”, de 1 pie de espesor; un material que no necesita un acabado posterior ni mantenimiento una vez acabada la obra que incrementa el presupuesto.

Ambos proyectistas citan a Eladio Dieste (1917-2000), ingeniero uruguayo, como uno de sus referentes a la hora de la utilización del ladrillo como elemento estructural. Destacan “las enormes posibilidades de este material creando espacios sorprendentes, en los que, con escasos recursos, profundos conocimientos y mucho ingenio, combina de forma sutil la racionalidad constructiva y estructural, con una riqueza espacial de altísima calidad arquitectónica”.

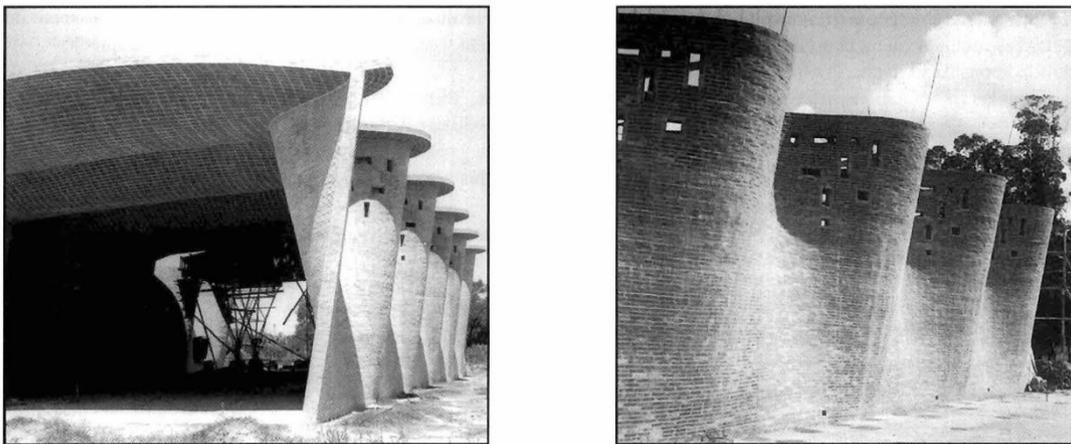


Figura 3. Iglesia de Atlántida. Departamento de Canelones. Uruguay, 1960. Eladio Dieste.

También los muros de fábrica necesitan absorber los dos tipos de acciones:

-Las transmitidas por la malla espacial de madera y la cubierta, que se componen por fuerzas verticales y horizontales, estas últimas debido a la manera en la que se apoya la cubierta en uno de sus laterales: se apoya sobre soportes inclinados en forma de V.

-La acción del viento, magnitud significativa dado que el muro alcanza los 10 m de altura y la propia ubicación del edificio además de su altitud.

Ante la intención de que el muro conserve su espesor en toda su altura, el bajo

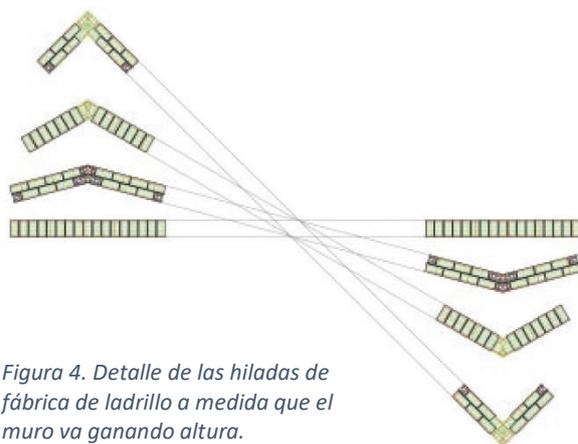


Figura 4. Detalle de las hiladas de fábrica de ladrillo a medida que el muro va ganando altura.

presupuesto del proyecto que no permite un uso excesivo de material, las influencias de Eladio Dieste, y las acciones a absorber, se genera una geometría con una serie de superficies regladas creadas a partir de una traza quebrada en la base del muro que se van difuminando hasta coronar el muro con una coronación lineal para poder colocar los apoyos de la malla espacial. La forma característica del muro viene dada porque en el arranque se proyecta el contorno de los módulos de la malla

espacial, lo que a medida que el muro va ganando altura genera unos paraboloides hiperbólicos que absorben las acciones manteniendo el espesor de 1 pie en toda su altura, además de “dotar al edificio de una expresividad formal que dignifica su impacto visual” recalcan los proyectistas.

Como se puede observar en la *Ilustración 3*, lo que en cota inferior la hilada forma un ángulo recto, a medida que el muro va ganando altura se va suavizando, llegando a coronar el muro de forma lineal. También podemos observar que no siempre los ladrillos se colocan de la misma manera según la hilada. En color oscuro están marcados aquellos ladrillos con una geometría diferente a la de los demás ladrillos.

El principal problema que presentaba la ejecución de esta solución constructiva radica en el replanteo de los muros, sobre todo por el trazado inclinado del zuncho de coronación y el arranque de los muros a diferentes cotas. Una vez ya replanteado a cota 0 el muro, se colocan 3 hilos de arriba abajo por cada arista del muro: un hilo que define perfectamente la arista y los otros dos fijan la posición de los tendeles.

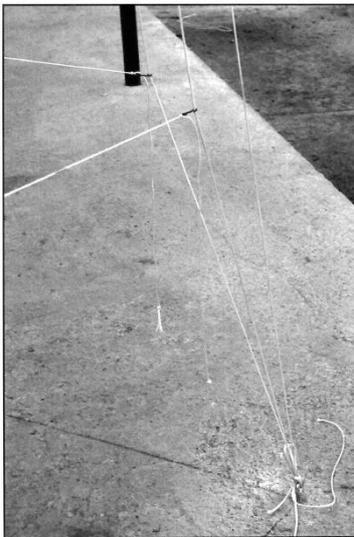


Figura 5. Detalle del replanteo de los muros

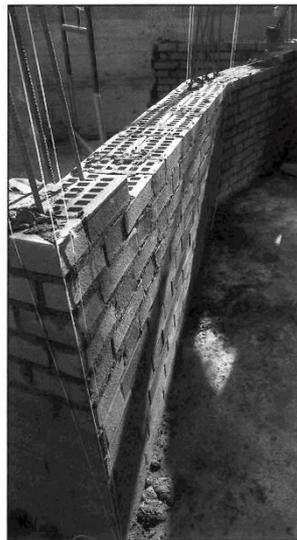


Figura 6. Detalle de la construcción del muro de fábrica guiado por los hilos del replanteo.

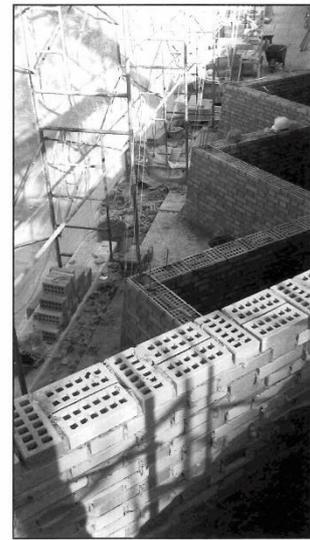


Figura 7. Detalle del proceso constructivo del muro de fábrica.

3.3 MALLA ESPACIAL

En lo que respecta a la estructura que soporta la cubierta, los proyectistas se deciden por una malla espacial de perfiles cuadrangulares huecos de madera laminada, que se unen formando semioctaedros cuyas diagonales son paralelas a los muros de fábrica.

3.3.1. Antecedentes.

Durante el s. XX los avances tecnológicos permiten empezar a utilizar mallas espaciales para cubrir espacios de grandes luces. Paralelamente y gracias al trabajo de investigación de Otto Hetzer (1846 – 1911), la madera lamina apareció en escena.

Karl Friedrich Otto Hetzer registró su primera patente en 1901 en Suiza, donde nombraba una serie de vigas compuestas por diferentes láminas de madera unidas entre sí mediante un adhesivo de tipo caseína (de origen animal), obteniendo una sección prácticamente homogénea. Más de 10 años antes, en 1890 Hetzer ya utilizó este sistema en edificio del Reichstag en Berlín proyectando vigas de 10 metros. En 1906 Hetzer patenta el sistema "Hetzer-Binder" que incluía la utilización de vigas curvas además de un sistema para mantener la forma de las estructuras incluso cuando atacaba la humedad.



Figura 8. Sala de exhibiciones en Amsterdam, luz de 30m, 1922 (Otto Hetzer).

El gran "boom" del sistema de Otto Hetzer se produce a partir de la Exposición Universal de 1910 en Bruselas, donde construye los hangares destinados a los dirigibles Zeppelin, salvando una luz de 43 metros, lo que le otorga un premio y el reconocimiento de toda la Exposición. Ya en la década de 1920 su sistema había sido utilizado entre otros en países como Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, Inglaterra y España, entre otros.

Lo que es muy curioso es que con los avances tecnológicos y de desarrollo tanto de las mallas espaciales como de la madera laminada, se encuentren muy pocos ejemplos durante el s.XX de proyectos donde combinen ambas técnicas.

3.3.2. Barras Huecas.

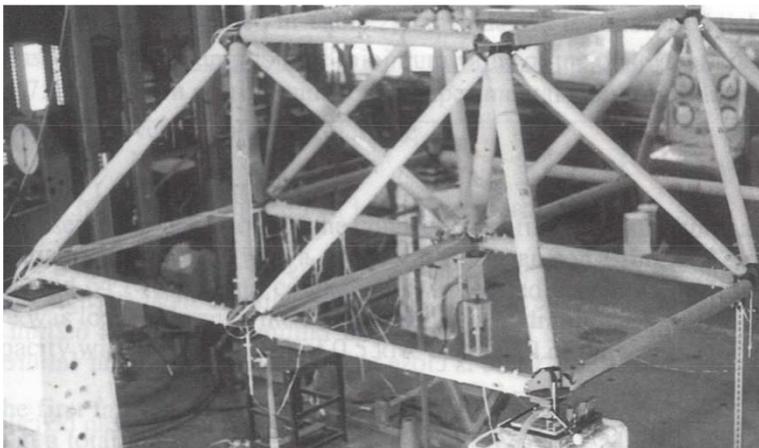


Figura 9. Pruebas con una malla espacial de bambú. Ghavam, K y Moreira, L.E. 1993.

Prácticamente, el único ejemplo de estructura en celosía construida a partir de barras huecas de madera anterior a este proyecto lo tenemos en los estudios de Luís Eustaquio Moreira y Khosrow Ghavami sobre el uso del bambú en celosías tridimensionales.

Además de estudiar el comportamiento de las barras huecas de bambú, también indagaron en la forma de conectar las

barras de madera hueca entre sí, mediante un nudo formado por chapas de aluminio, similar al que luego se utilizará en el proyecto.

Los propios proyectistas resaltan las ventajas de utilizar barras huecas de madera frente a utilizarlas perfiles macizos:

- Al crear las barras a partir de listones más pequeños, es posible conformar perfiles de mayor tamaño que además tengan menos imperfecciones, pudiendo cambiar los listones en caso de que éstos presenten algún problema, y no la pieza entera.
- La reducción de material con respecto a las secciones de madera maciza permiten conseguir elevados radios de giro con menos material, mejorando la eficiencia frente a esfuerzos de compresión.
- Al utilizar piezas de grosores menores, los cambios de humedad no modifican las dimensiones de la pieza tanto como en las piezas macizas.
- Por último, unos grosores menores permiten realizar tratamientos contra agentes bióticos de manera integral.

Parte del interés que despierta este proyecto es también la posibilidad de realizar un estudio sobre las barras huecas de madera laminada. De hecho, ambos proyectistas junto con D. Otero Chans y E. Martín Gutiérrez llevan a cabo un estudio sobre dicho tipo de barras aplicadas a las mallas espaciales, centrándose sobre todo en la unión entre barras, el gran problema a resolver; dicha unión tiene el problema de las solicitaciones a tracción.

Como ellos mismos cuentan en la investigación, una vez se les encarga el proyecto deciden realizar una serie de ensayos con diferentes geometrías y técnicas constructivas dado que la bibliografía existente sobre el tema era realmente escasa.

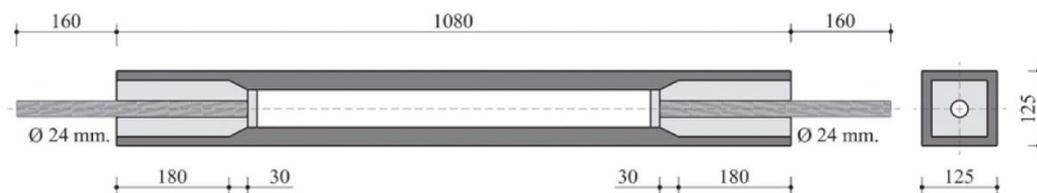


Figura 10. Geometrías de las probetas a ensayar.

La solución seleccionada es tapar los extremos de las barras con tacos de madera de alta densidad encolados a los listones que conformaban la sección de la barra. Esta solución permitía anclar fácilmente barras roscadas de acero a los tacos de madera de alta densidad; resolvía el problema, en caso de incendio, de que las llamas penetraran en el interior de barra y por último, los propios tacos servían como plantilla para conformar el resto de la pieza.

Durante la ejecución del proyecto, se decidieron guardar 21 barras como las utilizadas en la estructura durante 10 años para testearlas más adelante, y estudiar así la degradación de los materiales. De éstas 21 barras, 17 barras fueron de 2450 mm de longitud (correspondientes a los semioctaedros) y 4 fueron de 3465 mm de longitud (correspondientes al cordón inferior). De las 17 barras de 2450 mm de longitud, 9 se ensayaron a doble tracción y 9 a doble compresión. Todas las barras de 3465 mm de longitud se ensayaron a doble compresión.



Figura 11. Ejecución de las barras huecas de 3465 mm de longitud.



Figura 12. Ejemplo de fallo de las probetas a compresión.



Figura 13. Ejemplo de fallo de las probetas a compresión.

3.3.3. Diseño de la estructura.

Ésta se resuelve mediante una malla espacial construida a partir de semioctaedros donde sus diagonales son paralelas a la coronación de los muros. Estos módulos semioctaédricos tienen 2,45m de lado y 1,732 de altura. Están orientados con la cima de la pirámide hacia abajo, dejando en la parte superior la cara cuadrada. En total hay 78 módulos, dispuestos en 13 columnas y 6 filas, unidos en la parte superior entre sí a partir de las esquinas de las caras cuadradas, y en la parte inferior a partir de barras que unen las cimas de las pirámides.

El diseño final de la estructura viene dado por dos premisas:

- Por un lado, el módulo no se refiere solo a la geometría de la estructura, si no, también a la manera de construir y ensamblar la estructura.
- Por otro lado, el apilamiento. Ya que el presupuesto del proyecto era escaso, la posibilidad de apilar los módulos permitía transportarlos más fácil y económicamente.

Las dimensiones totales de la celosía son 46,04m x 21,27m. El cordón inferior, formado por las barras que unen las cimas de las pirámides invertidas, está orientada



Figura 14. Módulos apilados esperando a ser colocado en la estructura.

paralela a los muros de fábrica, cuyos ejes coinciden con los bordes de los paraboloides que definen los muros.



La estructura se soporta a través de sus 4 lados principales, 3 de ellos descansan sobre los muros de fábrica y el otro (uno de los lados de mayor dimensión) descansa sobre 4 soportes en forma de V formados por puntales de barras de madera de sección hueca con dimensiones 150 mm x 150 mm y 30 mm de espesor, unidos directamente al muro de contención del terreno.

Figura 15. Celosía ya colocada.

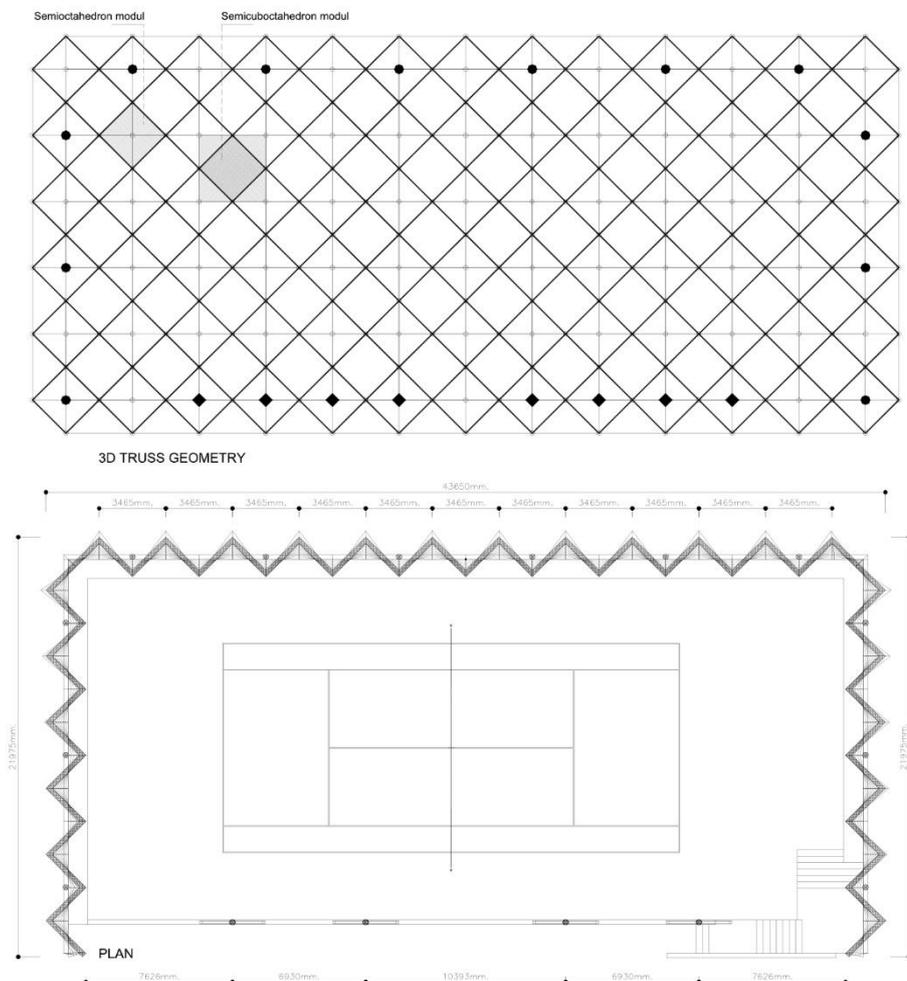


Figura 16. Esquema en planta del proyecto. Superior, celosía de madera. Inferior, muros de fábrica.

Con el objetivo de abaratar costes, la estandarización de la estructura es total. De las 803 barras que constituyen la estructura, 759 tienen la misma sección cuadrada hueca de 12,5 cm de lado y 2,5 cm de espesor, y de éstas, 624 miden 2,45 m de longitud y 171 miden 3,645 m de longitud; quedando solamente las 8 barras de sección cuadrada hueca que forman los soportes en V. La madera de todas las barras proviene de una conífera de la familia de las pináceas (*Picea abies*) de clases resistente GL28h, clase que se refiere a la madera laminada encolada.

En contrapartida con el aspecto económico, unificar las secciones de toda la estructura significa sobredimensionar la mayoría de las barras de ésta desde el punto de vista de la resistencia.

Como ya hemos indicado antes, la unión entre las barras y los nudos de acero se realiza a partir de colocar tacos de madera de alta densidad en sus extremos. Esta madera pertenece a la familia del Elondo o Tali (*Erythropelumn ivorense*), conocido comúnmente como roble africano. Estos tacos son los que soportan las varillas metálicas roscadas de 24 mm de diámetro, que además están pegadas con resina epoxi a los tacos.



Figura 17. Tacos de madera en el interior de las barras.



Figura 18. Detalle de un nudo del cordón superior.

Los nudos de hierro fundido del nivel superior se forman a partir de un cuarto de esfera al que se le suelda una aleta en su base para rigidizarla. De esta manera, a la hora de unir los módulos, se coloca una abrazadera para unir dos cuartos de esferas dando pie a una semiesfera. Los nudos del nivel superior son directamente semiesferas con las altes soldadas. Los nudos de los soportes en V que están en contacto con la celosía se forman a partir de unir otra semiesfera mediante abrazadera al nudo, creando una esfera completa.

3.3.4. Proceso constructivo.

La forma en la que se fueron uniendo los diferentes módulos de la estructura es la siguiente:

- Primero se divide la celosía en 3 sectores (Véase *Figura 19*). Dos de estos sectores cuentan con las cuatro columnas de los extremos largos de los módulos de la celosía, por lo que cuenta con dos apoyos en el antiguo lado largo, tres apoyos en el lado corto y un soporte en V en lado restante, es decir, es portante por sí mismo. El otro sector, sector central, cuenta con dos apoyos en el antiguo lado largo y dos soportes en V en el lado opuesto.

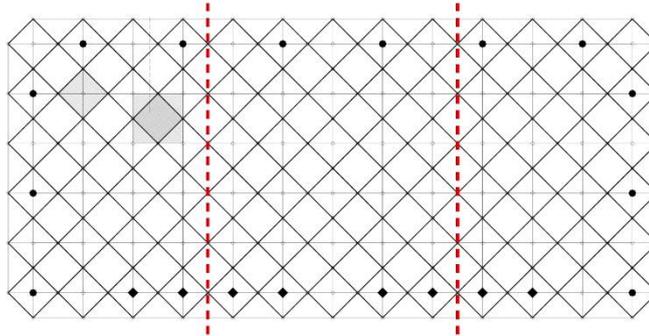


Figura 19. División de la celosía para su posterior construcción.

- Una vez acordados los 3 sectores, se van ensamblando los módulos de uno de los sectores laterales en el interior de los muros de fábrica, para su posterior elevación mediante una grúa y su colocación en el lugar que le corresponde.
- A continuación, se ensamblan los módulos del sector central también en el interior de los muros de fábrica para su posterior elevación y colocación en su ubicación mediante una grúa.
- Por último, se ensamblan los módulos del otro sector lateral en el exterior de los muros de carga, ya que se hiciera en el interior habría problemas a la hora de ubicarlo en su posición.



Figura 20. Ensamblaje de todo el primer sector.



Figura 21. Colocación del primer sector.



Figura 22. El primer sector ya está colocado, el segundo se está acabando de ensamblar.

4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

4.1.1 ACCIONES PERMANENTES. Peso propio y cubierta.

En este caso podemos diferenciar dos tipos de acciones permanentes: unas, las de la celosía original en madera; otras, las de la celosía en acero. Cabe destacar que, en ambas celosías, la cubierta es la misma, por lo que ese valor no varía.

Celosía original

Como podemos consultar en la fuente bibliográfica [10], el peso total por m² de la celosía es de 14,45 kg/m². Diferencia, además, entre el peso aportado por la madera, 9,00 kg/m²; por lo que, con una sencilla resta, el peso aportado por los nudos de hierro sería de 5,45 kg/m². Estos valores, utilizando un factor de conversión kg/m² a kN, darían como resultado:

$$14,45 \text{ kg/m}^2 \times 43,65 \text{ m} \times 21,975 \text{ m} \times 0,00980665 \text{ kN/kg} = \mathbf{135,93 \text{ kN}}$$

Celosía de acero

Siendo éste el objeto de estudio del trabajo ahora no es posible conocer el peso propio de la celosía. A la hora de calcular cada una de las geometrías diferentes, el propio programa informático (Architrave) ya tiene en cuenta el peso de cada una de las barras de la celosía según qué forma y sección queramos que calcule, por lo que no es necesario saber este dato en este momento.

Cubierta

La información de este dato no se encuentra en ninguna de las fuentes bibliográficas consultadas y gracias a las imágenes podemos hacernos una idea del tipo de cubierta que es. Dado que se trata de un cerramiento ligero con un sistema de evacuación de aguas, supondremos (probablemente sobredimensionado) que la carga es de 0,3kN/m².

4.1.2 ACCIONES VARIABLES

Como cargas variables, solo se van a tener en cuenta las cargas gravitatorias, la carga de sismo y las acciones térmicas; aunque estas dos últimas no interfieran en el cálculo final.

Sobrecargas de uso

La única sobrecarga de uso considerada es la de mantenimiento. Este tipo de cubierta pertenece a la categoría G de “cubiertas accesibles únicamente para conservación” y a la subcategoría de uso G1 “cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado)” a la que corresponde una carga uniforme de 0,4 kN/m².

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ⁽⁴⁾⁽⁶⁾	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁵⁾	0,4 ⁽⁴⁾	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Tabla 1. Valores característicos de las sobrecargas de uso según el DBSE-AE.

Sobrecarga de nieve

Los valores de sobrecarga de nieve se obtienen de “DB SE-AE”, capítulo 3 “Acciones Variables”, subcapítulo 3.5 “Nieve” y apartados 3.5.1, 3.5.2, 3.5.3 y 3.5.4.

Según el apartado 3.5.1 “Determinación de la carga de nieve”, en estructuras ligeras lo podemos calcular a través de la expresión

$$qn = \mu \cdot sk$$

Donde:

μ = coeficiente de forma de la cubierta según 3.5.3

sk = valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal según 3.5.2

Tabla 3.8 Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas

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

Tabla 2. Valores característicos de s_k según el DBSE-AE.

El coeficiente de forma $\mu = 1$ dado que la inclinación de la cubierta es inferior a 30°. El valor característico de la carga de nieve $s_k = 0,3$ dado que nos encontramos en A Coruña.

$$qn = \mu \cdot s_k = 1 \cdot 0,3 = 0,3 \text{ kN/m}$$

Carga de sismo

Según la NSCE-02, las construcciones con una aceleración sísmica básica igual o mayor de 0,04g deberán tener en cuenta estos efectos a la hora de realizar los cálculos. Como podemos ver en el siguiente mapa, A Coruña se encuentra en una zona donde la aceleración sísmica básica es inferior a 0,04g, por lo que no será necesario incluir estos efectos en los cálculos.

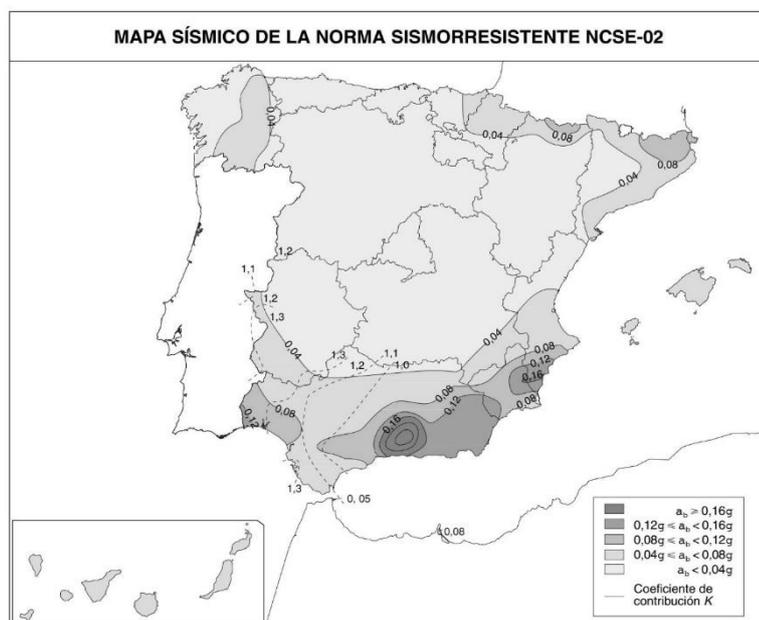


Figura 23. Mapa de peligrosidad sísmica (NCSE-02)

Acciones térmicas

Dado que cuenta con dos juntas de dilatación, no es necesario contabilizar las acciones térmicas en el cálculo.

4.2 REPARTO DE CARGAS

4.2.1 Pesos propios

Con la información extraída de la fuente bibliográfica [10], podemos calcular los pesos propios de la celosía original de madera de la siguiente forma:

Barras huecas de madera:

$$9,00 \text{ kg/m}^2 \times 43,65 \text{ m} \times 21,975 \text{ m} \times 0,00980665 \text{ kN/kg} = \mathbf{84,66 \text{ kN}}$$

Uniones metálicas:

$$5,45 \text{ kg/m}^2 \times 43,65 \text{ m} \times 21,975 \text{ m} \times 0,00980665 \text{ kN/kg} = \mathbf{51,27 \text{ kN}}$$

Peso total:

$$51,27 \text{ kN} + 84,66 \text{ kN} = 135,93 \text{ kN}$$

Para el cálculo de la estructura en su versión de acero, el peso propio tanto de los nudos como de las barras las calcula el propio programa Architrave, por lo que no es necesario calcularlos a priori y luego suponerlos como acciones exteriores.

Cerramiento de cubierta:

La información de este dato no se encuentra en ninguna de las fuentes bibliográficas consultadas y gracias a las imágenes podemos hacernos una idea del tipo de cubierta que es. Dado que se trata de un cerramiento ligero con un sistema de evacuación de aguas, supondremos (probablemente sobredimensionando) que la carga es de 0,3kN/m². Esta cubierta sobresale 0,7m en cada una de las direcciones de la celosía, por eso las dimensiones son mayores en este cálculo (45,05 m en vez de 43,65 m y 23,375 m en vez de 21,975 m).

$$0,3 \text{ kN/m}^2 \times 45,05 \text{ m} \times 23,375 \text{ m} = \mathbf{315,92 \text{ kN}}$$

4.2.2 Acciones variables

Sobrecarga de uso

Como se indica en la *Tabla 1*, ésta cubierta pertenece a la subcategoría G1, cubierta ligera sin forjado; donde el valor de la carga uniforme es de 0,4 kN/m².

$$0,4 \text{ kN/m}^2 \times 45,05 \text{ m} \times 23,375 \text{ m} = \mathbf{421,2175 \text{ kN}}$$

Sobrecarga de nieve

Según la *Tabla 2*, el valor característico de sobrecarga de nieve en la zona del edificio es de 0,3 kN/m². La carga total de la sobrecarga de nieve será:

$$0,3 \text{ kN/m}^2 \times 45,05 \text{ m} \times 23,375 \text{ m} = \mathbf{315,92 \text{ kN}}$$

Suma de acciones variables

$$\text{Carga total} = 421,2175 \text{ kN} + 315,92 \text{ kN} = \mathbf{737,1375 \text{ kN}}$$

Cargas variables por m2

$$737,1375 \text{ kN} / (45,05 \text{ m} \times 23,375 \text{ m}) = 0,7 \text{ kN/m}^2$$

4.2.3 Reparto de cargas totales

Cargas totales por m2

$$(737,1375 \text{ kN} + 315,92 \text{ kN}) / (45,05 \text{ m} \times 23,375 \text{ m}) = 1 \text{ kN/m}^2$$

Para la representación del reparto de cargas puntuales en cada uno de los nudos, y debido a la doble simetría de la estructura, solo se ha representado $\frac{1}{4}$ de la misma, por simplicidad y por claridad visual.

Carga puntual en un nudo interior (trama gris)

$$1 \text{ kN/m}^2 \times 2,45 \text{ m} \times 2,45 \text{ m} = 6,01 \text{ kN}$$

Carga puntual en un nudo exterior (trama granate)

$$1 \text{ kN/m}^2 \times [(2,45 \text{ m} \times 2,45 \text{ m})/2 + (0,7 \text{ m} \times 3,4648 \text{ m})] = 5,43 \text{ kN}$$

Carga puntual en un nudo de esquina (trama azul)

$$1 \text{ kN/m}^2 \times [(2,45 \text{ m} \times 2,45 \text{ m})/2 + (0,7 \text{ m} \times 3,4648 \text{ m}) + (0,7 \text{ m} \times 0,7 \text{ m})/2] = 5,68 \text{ kN}$$

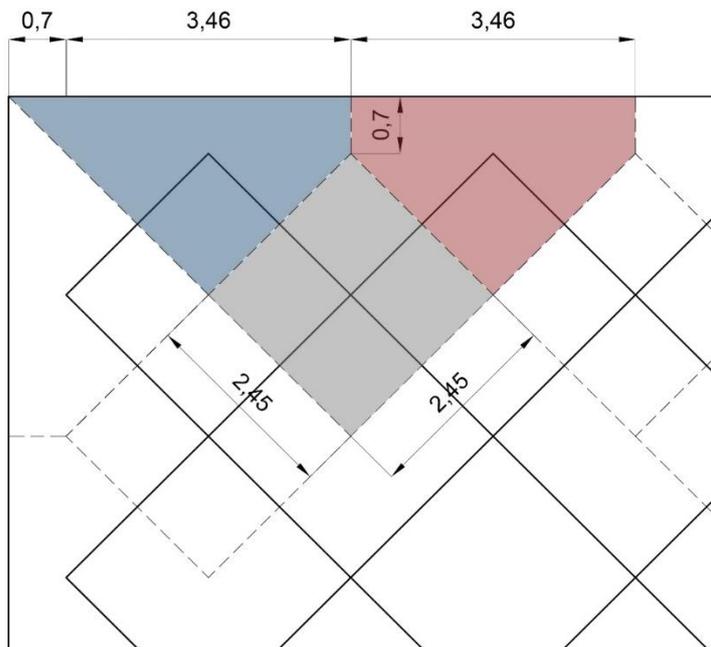


Figura 24. Dimensiones del ámbito de carga de cada nudo.

Como el mantenimiento de una cubierta no suele hacerse justo después de una nevada, se decide acumular todas las cargas variables y ponderarlas como si fueran permanentes, pensando en la poca probabilidad de que interfieran ambas simultáneamente. Esta consideración siempre queda del lado de la seguridad, ya que

tanto la combinación “carga permanente + sobrecarga de nieve” ($0,3 \times 1,35 + 0,3 \times 1,5 = 0,855 \text{ kN/m}^2$) como “carga permanente + sobrecarga de uso” ($0,3 \times 1,35 + 0,4 \times 1,5 = 1,005 \text{ kN/m}^2$), no superan la combinación de ambas cargas variables ponderadas como permanentes ($0,3 \times 1,35 + 0,3 \times 1,35 + 0,4 \times 1,35 = 1,35$).

Las cargas se van a aplicar como cargas puntuales en los nudos para no generar flexiones en las barras de la capa superior. También, dado que se quiere estudiar un gran número de celosías, aumentar el número de cargas supone un aumento considerable de trabajo.

Ambas consideraciones se van a aplicar a todas las celosías, por lo que los resultados no se ven afectados: la búsqueda de la configuración óptima no varía.

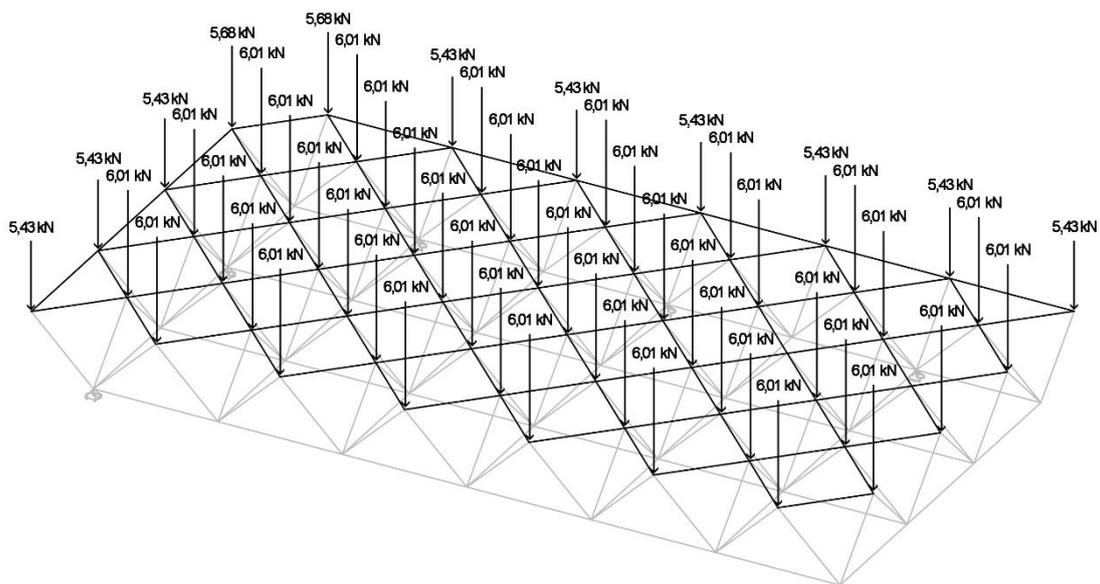


Figura 25. Reparto de cargas puntuales.

4.3 PREDIMENSIONAMIENTO

Como la celosía original es de madera, y el objeto de este estudio son las celosías metálicas, necesitamos hacer un cambio de material a la hora de calcular la celosía. Para simplificar este primer cálculo, se ha decidido cambiar el material de las secciones, pero intentando mantener sus dimensiones. Dado que todas las barras de la celosía original tienen una sección de dimensiones 125 mm x 125 mm y las barras de los soportes en V unas dimensiones 150 mm x 150 mm, se van a buscar esas mismas dimensiones en la serie PH0 UNE Ic, o en su defecto, las más similares. Se utilizarán PH0 UNE Ic 120 12.5 para la mayoría de barras y PH0 UNE Ic 150 16.0 para las barras de los soportes.

4.4 DEFINICIÓN Y ADAPTACIÓN DEL MODELO

Teniendo en cuenta que es necesario acotar el TFG, se han tomado las siguientes consideraciones:

- No se tienen en cuenta las acciones sísmicas, debido principalmente a que el edificio se encuentra en una zona de sismicidad baja.
- Se supone en todo momento que el muro de fábrica es indeformable y que resiste todos los esfuerzos de las diferentes celosías a optimizar, los muros de fábrica no son objeto de estudio de este TFG.
- Las dimensiones de la cubierta no van a variar, se entiende que son las dimensiones necesarias para cumplir su función: evitar que penetre la lluvia y la luz solar directa en el interior del complejo deportivo. Esto puede llevar a que en determinadas celosías cuyos nudos perimetrales se acerquen mucho al borde de la cubierta, éstos reciban unas cargas casi ridículas, aceptamos esas situaciones.
También se entiende que la cubierta es resistente en todas y cada una de las celosías a calcular. Algunas celosías pueden alejar mucho los nudos perimetrales de los bordes de la cubierta, suponiendo una posible flexión excesiva de la cubierta, aceptamos esas situaciones.

4.5 COMPROBACIÓN FLECHAS MÁXIMAS

Se van a seguir los criterios del DBSE – Seguridad Estructural, fuente bibliográfica [20]. Dado que la celosía tiene dos dimensiones principales, se van a calcular ambas y se comprobará aquella más restrictiva, aunque como es lógico siempre será la más restrictiva la dimensión menor.

Integridad de los elementos constructivos.

Se tomará como flecha máxima admitida 1/300 de la longitud en cada una de las dimensiones.

- Dimensión mayor: 43,64m
 $f = 43,64\text{m} / 300 = 0,145\text{m}$
- Dimensión menor: 21,975m
 $f = 21,975 / 300 = \mathbf{0,073\text{m}}$

Confort de los usuarios

Debido a que la celosía se encuentra a 10m de altura, el confort de los usuarios no va a cambiar con una variación de +-10cm en la flecha de la obra. Igualmente calcularemos la flecha, pero no la tendremos en cuenta.

- Dimensión mayor: 43,64m
 $f = 43,64\text{m} / 350 = 0,125\text{m}$
- Dimensión menor: 21,975m
 $f = 21,975 / 350 = \mathbf{0,063\text{m}}$

Apariencia en obra

Se tomará como flecha máxima admitida 1/300 de la longitud en cada una de las dimensiones.

- Dimensión mayor: 43,64m
 $f = 43,64\text{m} / 300 = 0,145\text{m}$
- Dimensión menor: 21,975m
 $f = 21,975 / 300 = \mathbf{0,073\text{m}}$

Restricciones impuestas por VTAM

En VTAM es posible restringir el número máximo de movimientos permitidos en cada una de las direcciones. (Figura 28). Debido a que los apoyos de la estructura se modelizan como "carritos", es necesario restringir los movimientos de la estructura en las direcciones X e Y, por lo que se ha optado por una restricción de 100mm en cada una de esas direcciones.

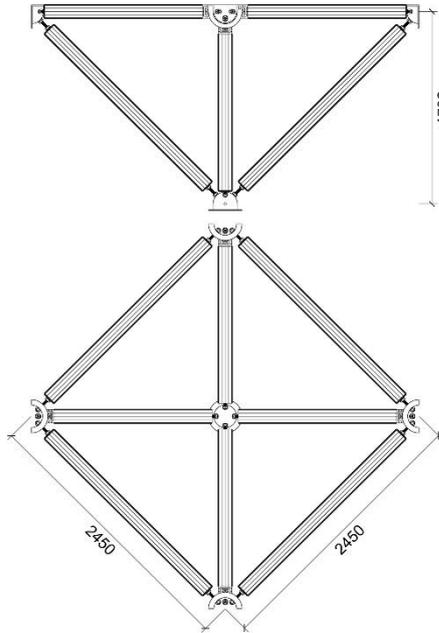
```
** MaximumAllowedMovements ** mm  
100 100 73
```

Figura 26. Recorte de un documento de argumentos donde se pueden comprobar los movimientos máximos permitidos.

5. MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

5.1 MEDIDAS DE LA CELOSÍA (a ejes)

5.1.1 Medidas de un solo módulo



Cada uno de los semioctaedros regulares se acota (e ejes):

Canto: 1,732m

Aristas horizontales: 2,450m

Aristas diagonales: 2,450m

Figura 27. Representación acotada de un único módulo de semioctaedro.

5.1.2 Medidas de la celosía completa

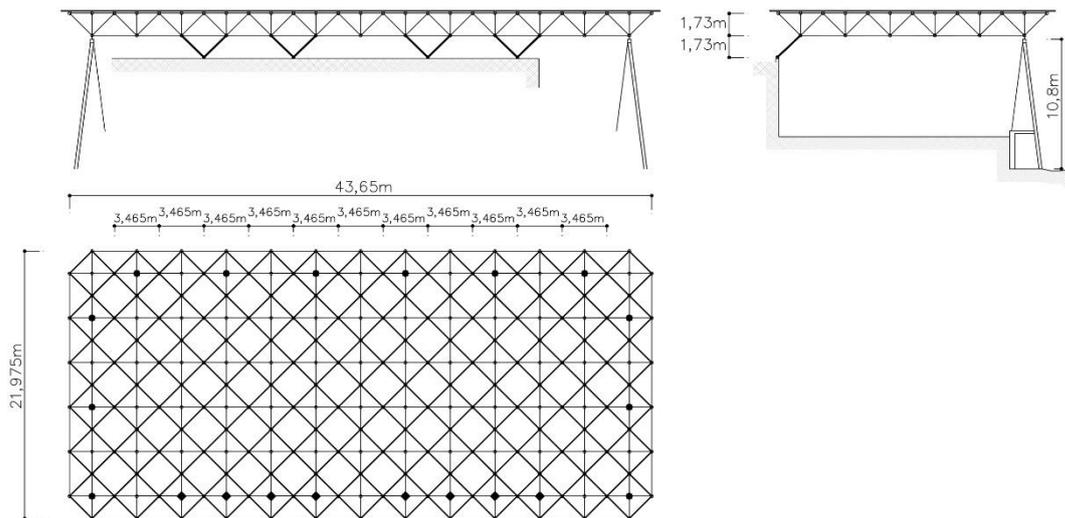


Figura 28. Representación acotada de la celosía completa.

Longitud mayor: 43,65m

Longitud de las barras de apoyo: 3,465m

Longitud menor: 21,97m

Longitud de las barras del cordón inferior: 3,465m

Canto: 1,732m

Longitud de las barras laterales: 3,465m

La estructura completa está formada por 78 semioctaedros regulares, colocados como una pirámide con el vértice ubicado en la parte inferior (pirámide invertida). Los semioctaedros están unidos entre ellos en el cordón superior mediante los nudos y en el cordón inferior mediante barras que unen las cúspides de las "pirámides".



Figura 29. Modelización de la estructura, barras de apoyo.

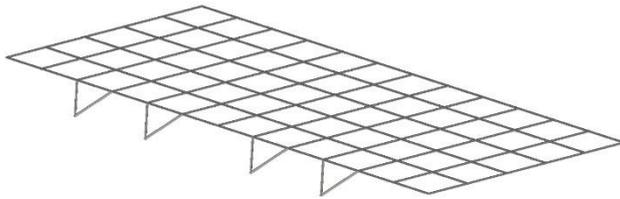


Figura 30. Modelización de la estructura, cordón inferior.

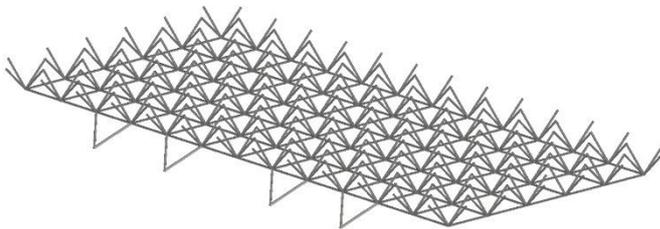


Figura 31. Modelización de la estructura, barras inclinadas.

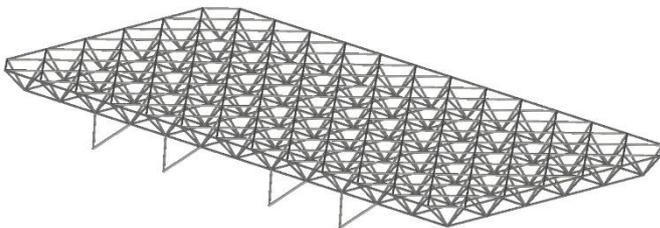


Figura 32. Modelización de la estructura, cordón superior.

las bases cuadradas de los semioctaedros. Las diagonales de dichos cuadrados son paralelas a las direcciones principales de la estructura.

Para la optimización de la estructura se va a calcular como una estructura completa y compacta, no separando cada uno de los módulos independientemente, dado que es necesario tener en cuenta las interacciones de unos módulos con los otros.

Con el fin de entender fácilmente la estructura, podemos hablar de 4 tipos de barras que forman la estructura.

-Barras de apoyo: se encargan de unir la estructura a los apoyos que hay situados en el terreno, no sobre los muros de fábrica.

-Cordón inferior: formado a partir de cuadrados cuyos lados son paralelos a las dimensiones principales de la estructura. Estas barras unen las cimas de los semioctaedros.

-Barras inclinadas: le otorgan canto a la estructura. Son aquellas barras que forman los triángulos de los semioctaedros.

-Cordón superior: formado a partir de cuadrados en la zona interna y triángulos en la zona externa. Son aquellas barras que forman

6. PROPUESTA DE MEJORA DE LA ESTRUCTURA DE CUBIERTA EXISTENTE

6.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS FIJOS

Para la realización de este estudio ha sido necesario restringir varios parámetros de la estructura con el fin de acotar los resultados y hacer este trabajo viable; de otro modo, las soluciones al problema serían tan numerosas que sería casi imposible determinar que la solución encontrada es realmente la más optimizada. Los parámetros, que aún restringidos permiten una gran cantidad de geometrías diferentes, son los siguientes:

6.1.1 Dimensiones.

Como ya se ha explicado antes, la parte estructural del proyecto del complejo deportivo de A Zapateira puede dividirse en dos partes claramente diferenciadas: por un lado, los tres muros de fábrica reglada y por otro lado la cercha tridimensional. Dado que el objeto de estudio de este trabajo es solamente la cubierta tridimensional, no se modificarán las dimensiones de los muros de fábrica, así como tampoco el tamaño de la cubierta ligera. Además de ser una limitación impuesta por el propio título del trabajo, también es una ventaja para el que suscribe porque acota sustancialmente el estudio. Esto no quita que los apoyos que conectan la celosía con los muros de fábrica puedan desplazarse, atendiendo a las necesidades de las distintas geometrías estudiadas, pero siempre sobre los ejes que marca la fábrica.

En cuanto al canto de las diferentes celosías, estos van a variar dependiendo de la propia construcción de la celosía, así como de posibles modificaciones dentro de una misma celosía.

6.1.2 Aplicación de fuerzas.

Atendiendo a razones de simplificación, facilidad de cálculo y sencillez a la hora de modelizar las diferentes geometrías, en todos los casos las fuerzas se aplicarán sobre los nudos del cordón superior de la celosía. Aunque solo en la primera celosía a estudiar se ha explicado cómo se calcula la fuerza que recae sobre cada nudo, cada vez que la geometría de la celosía cambie y se reagrupen las fuerzas, se mostrará un esquema de aplicación de cargas puntuales; por motivos de claridad de representación y sencillez, los esquemas no representarán toda la celosía completa, si no una parte significativa donde se puedan observar cada uno de los diferentes nudos según la carga que se les aplica. Cabe decir que todos los esquemas se van a representar a la misma escala, a modo de facilidad de comparación, aunque no las fuerzas, que en cada esquema seguirán su propia escala.

6.1.3 Materiales.

Como el propio nombre de este trabajo indica, las celosías a estudiar van a ser construidas en acero. Se ha decidido que se van a calcular todas utilizando acero S275, hasta que se llegan a un grupo muy reducido de celosías, candidatas todas a ser la

propuesta más optimizada, donde se calcularán también en acero S235 y S355 para luego llevar a cabo una comparación entre todas ellas.

Como también se va a estudiar la celosía original del proyecto, realizada en madera, al final del estudio se realizará una comparación entre la celosía más optimizada en acero y la celosía de madera.

6.1.4 Tipo de sección.

Como ya hemos indicado, la celosía original está construida en madera de sección cuadrada hueca de dimensiones exteriores 12,5 cm x 12,5 cm, por lo que se ha decidido utilizar las secciones tubulares cuadrangulares huecas PHC UNE Ic. Las siglas de los perfiles significan Perfil Hueco Cuadrado UNE Laminado en Caliente. De la misma forma que una vez se hayan encontrado un número reducido de celosías candidatas a ser la propuesta más optimizada, se calcularán también con perfiles de sección circular hueca PH0 UNE Ic, intentado conseguir una solución alternativa y, seguramente, más optimizada.



Figura 33. Sección de las barras huecas de dimensiones 12,5 cm x 12,5 cm

6.1.5 Apoyos.

Aunque gracias a la coronación lineal del muro de fábrica la posición y el número de apoyos puede variar en cada uno de los lados, quedando a disposición de la geometría de cada celosía, el tipo de apoyo según el lado no va a cambiar. Todos los apoyos de los lados cortos de la celosía serán apoyos deslizantes pudiendo girar en la dirección larga, todos los apoyos del lado largo de la celosía serán carritos pudiendo girar en la dirección corta de la celosía y todos los apoyos de los soportes en V serán rótulas.

6.1.6 Geometría.

Es el parámetro que ha sido necesario restringirlo de una forma más severa. A lo largo de la historia de la arquitectura los arquitectos han utilizado soluciones de lo más imaginativas para cubrir espacios de grandes luces: cúpulas, superficies regladas, bóvedas, cerchas, estructuras con cables, vigas de gran canto, elementos de doble curvatura, arcos catenarios, etc. En este estudio solo vamos a trabajar con celosías planas tridimensionales.

Una vez hemos definido que la celosía tiene que ser plana, se van a estudiar diferentes tipos de celosía como formadas a partir de semioctaedros o las formadas a partir de tetraedros regulares. A partir de este punto se les van a hacer diferentes modificaciones como añadir o eliminar barras, cambiar los apoyos, reducir sus dimensiones, aumentar o disminuir el canto, etc.

7. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

7.1 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Primero se modela la celosía en AutoCAD mediante líneas y de manera tridimensional. Una vez el modelo está acabado, se abre la herramienta de diseño de Architrave dentro del propio AutoCAD para poder asignar a cada línea el perfil que le corresponda, añadir las fuerzas que se aplican a la celosía y colocar los apoyos. Acto seguido se crean tantas capas como grupos de barras se precisen. Un “grupo de barras” es un conjunto de barras de la celosía a las que se les va a asignar el mismo perfil, es decir, posteriormente se tomará la barra más solicitada y se le asignará el perfil necesario para no sobrepasar las limitaciones de ELU y ELS; a continuación, se les asignará el mismo perfil a todas las barras del grupo de forma automática. Dentro de la herramienta de diseño de Architrave también deberemos asignar a cada barra el material y la sección del perfil, exportando el archivo en formato AVEX una vez hayamos terminado el proceso.

Con el archivo AVEX podemos calcular la celosía en el módulo de cálculo de Architrave, donde también se puede redimensionar. A partir de estos cálculos podemos comparar las celosías entre sí.

Con el mismo archivo AVEX exportado desde el módulo de diseño de Architrave podemos importarlo en la aplicación VTAM para encontrar una mejor solución. La herramienta VTAM funciona de la siguiente manera:

1. Se importa el archivo AVEX con la celosía modelizada y también un archivo de texto donde se especifica el tipo de acero, el tipo de sección, las limitaciones de ELU y ELS, así como que parámetro es por el que queremos que la aplicación se rijan a la hora de clasificar una solución mejor o peor que otra, en nuestro caso será el peso total de la estructura.
2. VTAM realiza una búsqueda heurística para encontrar la mejor solución: asigna de manera aleatoria un perfil a cada grupo de barras y calcula la estructura para obtener el peso total de la misma.
3. VTAM moviliza hasta seis ordenadores con dos procesadores cada uno, calculando al mismo tiempo, por lo que cuando con uno de ellos encuentra una configuración de la estructura que cumple con las restricciones de deformación y resistencia, calcula su coste (kg de acero en este caso) y comprueba si es mejor que cualquier otra configuración encontrada hasta entonces. Si lo es, la información se comparte entre los procesadores para orientar la búsqueda de todos ellos.
4. Por último y cuando VTAM ya no es capaz de encontrar una solución mejor, la aplicación devuelve un archivo de texto con todas las soluciones correctas que cumplen con las limitaciones de ELU y ELS ordenadas de menos a mayor peso, entendiendo como mejor solución aquella que pesa menos. También devuelve un archivo AVE con la celosía modelizada y con los perfiles correctos ya asignados a cada grupo de barras, para su posterior comprobación en Architrave.

Si los grupos de barras los configuramos con menos barras en cada uno teniendo más grupos de barras, la solución que obtendremos será más cerca de ser la ideal; pero esto

repercute mucho en el tiempo de cálculo de la aplicación VTAM. Con un ejemplo sencillo: si la estructura fuese solamente un pórtico de una altura formado por dos pilares y una viga, cada barra en un grupo diferente de barras, teniendo en cuenta que a cada barra se le puede aplicar un total de 10 perfiles diferentes (por ejemplo), esto supondría 1000 soluciones distintas (10^3). Si en vez de un pórtico fueran 4 y en vez de 10 perfiles diferentes fueran 20, las posibilidades ascenderían a 4096000000000000 (20^{12}). La estructura original cuenta con 803 barras y más de 100 tipos de perfiles PHC UNE Ic diferentes, esto supondría 100^{803} posibilidades diferentes, sin contar que se pueden utilizar tanto acero S275 como S235 o S355, por lo que las posibilidades se multiplican por 3. De intentar calcular todas esas posibilidades, probablemente no acabaríamos nunca. Lo que se viene a explicar aquí es que es necesario agrupar las barras y hacerlo de manera razonable para que la solución sea suficientemente buena, aunque estadísticamente pueda existir una mejor.

7.2 RESUMEN DEL PROCESO

A continuación, se va a explicar el proceso seguido para la optimización de la celosía:

7.1.1. En primer lugar, se va a analizar la celosía original aumentando el número de grupos siguiendo dos criterios diferentes: en primer lugar, agruparemos las barras según el tipo de barras que representen en la celosía y en segundo lugar agruparemos las barras atendiendo a la posición que ocupan en la celosía desde un punto de vista concéntrico, se agruparán las barras a medida que se van alejando del centro de la celosía en “anillos” concéntricos.

7.1.2. En segundo lugar, se va a estudiar una celosía formada a partir de semioctaedros de dimensiones reducidas a la mitad con respecto a los semioctaedros de la celosía original. También se analizarán posibles variantes de esta celosía aumentando el número de grupos y aumentando el canto.

7.1.3. A continuación, se va a estudiar una celosía orientada inversamente con respecto a la celosía original, donde el cordón superior pasa a ser el cordón inferior y viceversa. También se estudiarán diferentes variantes aumentando el número de grupos y cambiando el tipo de apoyo.

7.1.4. Acto seguido, volveremos a la mejor celosía que haya resultado del punto **7.1.1.** para seguir estudiando sus posibles variantes añadiendo o eliminando barras y cambiando el tipo de apoyo. Las celosías resultantes de los puntos **7.1.2.** y **7.1.3.** no van a conseguir resultados tan buenos como los del punto **7.1.1.**, por lo que no las seguiremos estudiando tan en profundidad.

7.1.5. En quinto lugar, se van a estudiar unas celosías formadas a partir de tetraedros regulares, cada una de ellas tendrá un número diferente de tetraedros y se variarán sus cantos para ajustarlos al canto de la celosía original.

7.1.6. Una vez seleccionadas las mejores celosías de cada uno de los pasos anteriores, se va a llevar un proceso de variación del canto de cada una de las celosías, siguiendo una serie de 20cm en 20cm.

7.1.7. En séptimo lugar, escogeremos las dos mejores celosías y las estudiaremos esta vez modificando el tipo de acero y el tipo de sección de las barras, así como aumentando considerablemente el número de grupos de barras. Después compararemos la viabilidad económica de cada una de estas celosías, obteniendo la estructura más optimizada posible.

7.4 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Como las configuraciones son muy amplias, se van a utilizar los siguientes códigos para diferenciarlas de una forma más cómoda. Primero colocaremos aquellos códigos en negrita, que son los que definen la geometría principal de la celosía, seguido del código xG, que define el número de grupos de barras en las que está dividido; y por último iremos añadiendo cuantos códigos necesitemos para definir la estructura.

ORG: Estructura original.

/2: Estructura con los módulos de dimensiones reducidas a la mitad.

INV: Estructura orientada de forma inversa.

TR: Estructura formada a partir de tetraedros regulares.

xG: x=número de grupos que tiene la estructura.

+DiagS: Cuenta con barras diagonales en el cordón superior

+Diags: Cuenta con barras diagonales en el cordón inferior

+DiagSs: Cuenta con barras diagonales tanto en el cordón superior como en el cordón inferior.

Cxcm: x=número de cm de más o menos en el canto

TRcORG: Estructura formada a partir de tetraedros con una altura igual al canto original de la celosía.

7.4.1 Fase inicial.

Se van a analizar cuatro estructuras distintas con sus modificaciones. Por un lado, se analizará la estructura original, añadiendo o quitando barras; por otro lado, se analizará una estructura a partir de los mismos semioctaedros pero con las dimensiones reducidas a la mitad; de otra forma, se analizará otra estructura igual que la original pero orientada de forma inversa: lo que en la estructura original es el cordón inferior en ésta será el cordón superior y viceversa, con las “pirámides” orientadas con la cima hacia arriba; y por último se va a estudiar una estructura creada a partir de tetraedros regulares y sus respectivas modificaciones.

En cada una de las celosías se mostrará una tabla con cada uno de los grupos de barras y la asignación de cada perfil a cada grupo, así como el peso de la estructura ya optimizada.

7.4.1.1 Estructura original.

En un primer momento vamos a estudiar la misma estructura pero enfocándola desde dos puntos diferentes: En primer lugar agruparemos las barras según el tipo de barras que representen en la celosía, a saber: barras de apoyo, barras diagonales interiores, barras del cordón superior, barras del cordón inferior y barras perimetrales; en segundo lugar agruparemos las barras atendiendo a la posición que ocupan en la celosía desde

un punto de vista concéntrico, se agruparán las barras a medida que se van alejando del centro de la celosía en “anillos” concéntricos.

Estos dos primeros cálculos servirán como toma de contacto con el trabajo, ayudan a pulir los posibles fallos de modelización de la estructura, al ser dos agrupaciones sencillas facilitan la toma de contacto con la herramienta VTAM, permiten sacar conclusiones rápidas y encaucen fácilmente el tipo de agrupaciones de barras futuras.

Celosía_ORG_5G

Celosía original con 5 grupos de barras diferentes. Los grupos son:

Apoyos: Las 8 barras que trabajan en pares y unen la celosía con las articulaciones que están colocadas en el lado del terreno.

Diagonales interiores: Cada una de las barras diagonales que forman los semioctaedros y que proporcionan en canto a la estructura.

Cordón inferior: Cada una de las barras que componen los cuadrados del nivel inferior que se han formado a partir de la unión de las cimas de las pirámides.

Cordón superior: Cada una de las barras que componen los cuadrados del nivel superior que forman las bases cuadradas de los semioctaedros.

Perimetrales exteriores: Cada una de las barras que “cierran” la celosía en el cordón inferior y que están colocados en el perímetro de la celosía. No forman parte de los semioctaedros. No se incluyen en este grupo aquellas 4 barras que forman los chaflanes de la estructura, estas barras pertenecen al grupo “Cordón superior”.

Nombre	Celosía_ORG_5G		
Número de grupos de barras	5	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos	PHC UNE Ic 70 6.3	8
	Diagonales interiores	PHC UNE Ic 50 4.0	312
	Cordón inferior	PHC UNE Ic 50 4.0	137
	Cordón superior	PHC UNE Ic 50 4.0	312
	Perimetrales exteriores	PHC UNE Ic 80 4.0	34
Acero	S275		
Peso total	12959,66 kg		

Tabla 3. Características y asignación de barras de la celosía ORG_5G.

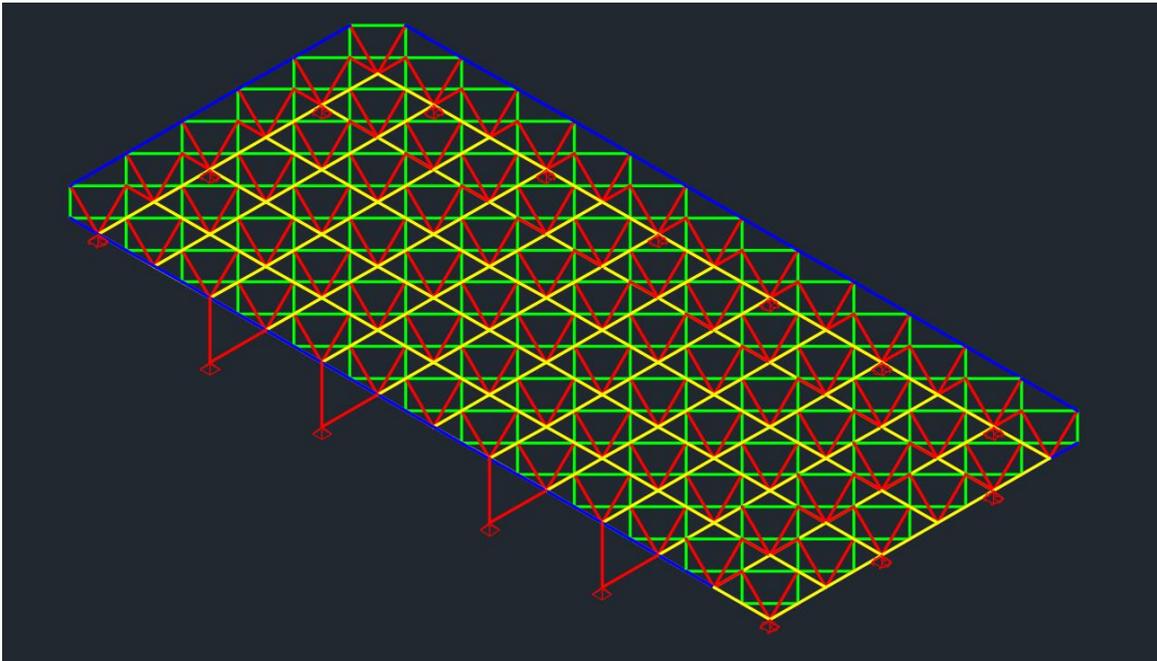


Figura 34. Representación de la celosía ORG_5G con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Celosía_ORG_8G

Celosía original con 8 grupos de barras diferentes. Se ha seguido un criterio donde se agrupan las barras de forma concéntrica, es decir, se toma el centro de la estructura y se agrupan las barras más cercanas, independientemente de si forman parte del cordón superior, cordón inferior o las barras inclinadas que unen ambos cordones. A medida que las barras se van alejando del centro de la celosía se van agrupando en “anillos” concéntricos. Los grupos son:

Apoyos: Las 8 barras que trabajan en pares y unen la celosía con las articulaciones que están colocadas en el lado del terreno.

Grupo central: Incluye 8 barras del cordón superior, 2 barras diagonales y 1 barras del cordón inferior.

Grupo 1: Incluye 40 barras del cordón superior, 32 barras diagonales y 16 barras del cordón inferior.

Grupo 2: Incluye 72 barras del cordón superior, 64 barras diagonales y 32 barras del cordón inferior.

Grupo 3: Incluye 40 barras del cordón superior, 36 barras diagonales y 18 barras del cordón inferior.

Grupo 4: Incluye 40 barras del cordón superior, 36 barras diagonales y 18 barras del cordón inferior.

Grupo 5: Incluye 40 barras del cordón superior, 36 barras diagonales y 18 barras del cordón inferior.

Grupo 6: Incluye 72 barras del cordón inferior, 106 barras diagonales, 34 barras del cordón inferior y 34 barras perimetrales.

Nombre	Celosía_ORG_8G		
Número de grupos de barras	8	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos	PHC UNE Ic 70 3.2	8
	Grupo central	PHC UNE Ic 50 4.0	11
	Grupo 1	PHC UNE Ic 50 6.3	88
	Grupo 2	PHC UNE Ic 50 4.0	168
	Grupo 3	PHC UNE Ic 50 4.0	94
	Grupo 4	PHC UNE Ic 50 4.0	94
	Grupo 5	PHC UNE Ic 50 6.3	94
	Grupo perimetral	PHC UNE Ic 50 6.3	246
Acero	S275		
Peso total	13305,80 kg		

Tabla 4. Características y asignación de barras de la celosía ORG_8G.

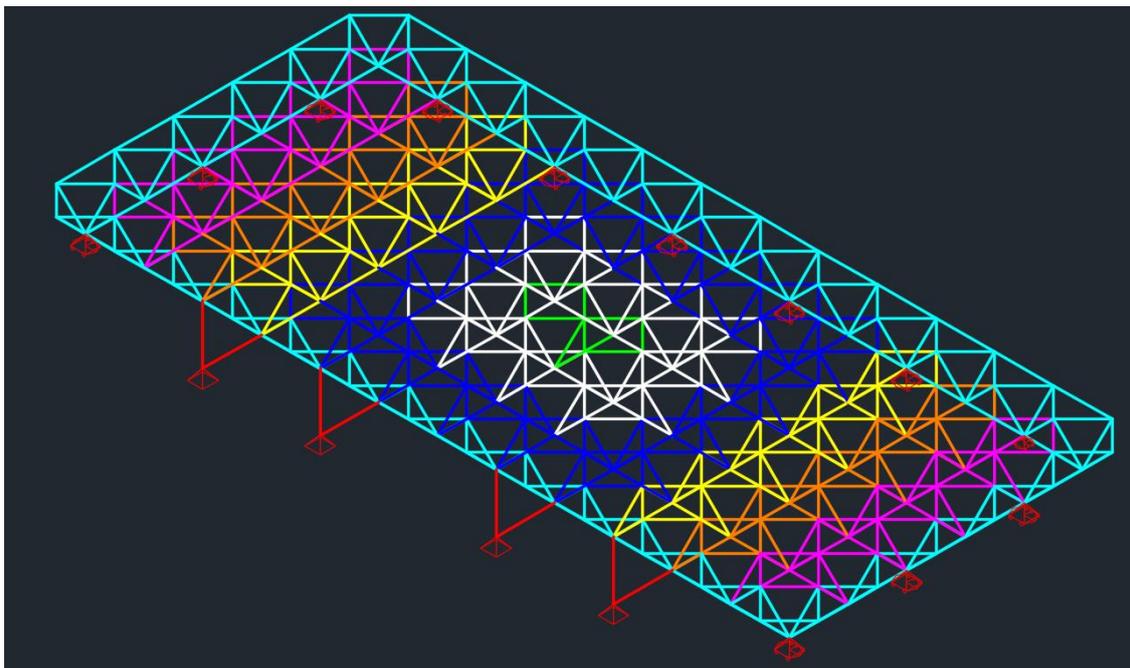


Figura 35. Representación de la celosía ORG_8G con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Como podemos observar fijándonos en los pesos totales de la estructura, la **celosía_ORG_8G** pesa 350 kg más solamente por modo de agrupar las barras de la celosía.

Después de comparar ambos modos de agrupar las barras, continuaremos el trabajo siguiendo los principios de la **celosía_ORG_5G**.

Celosía_ORG_10G

Seguimos estudiando la estructura original, pero aumentamos el número de grupos siguiendo la distribución de la **celosía_ORG_5G**, diferenciando según el tipo de barras que representan dentro de la celosía. Cada uno de los grupos de la **celosía_ORG_5G** se ha dividido en dos, dejando un grupo para la parte central de la celosía y el otro grupo en la parte exterior (refiriéndonos a “parte central” y a “exterior” tomando como referencia la dimensión más grande de la celosía).

Nombre	Celosía_ORG_10G		
Número de grupos de barras	10	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE Ic 70 3.2	4
	Apoyos 2	PHC UNE Ic 80 4.0	4
	Superiores 1	PHC UNE Ic 50 4.0	120
	Superiores 2	PHC UNE Ic 50 4.0	192
	Inclinadas 1	PHC UNE Ic 50 2.6	120
	Inclinadas 2	PHC UNE Ic 50 4.0	192
	Inferiores 1	PHC UNE Ic 50 4.0	49
	Inferiores 2	PHC UNE Ic 50 4.0	88
	Laterales 1	PHC UNE Ic 70 8.0	22
	Laterales 2	PHC UNE Ic 40 3.2	12
	Acero	S275	
Peso total	12266,24 kg		

Tabla 5. Características y asignación de barras de la celosía ORG_10G.

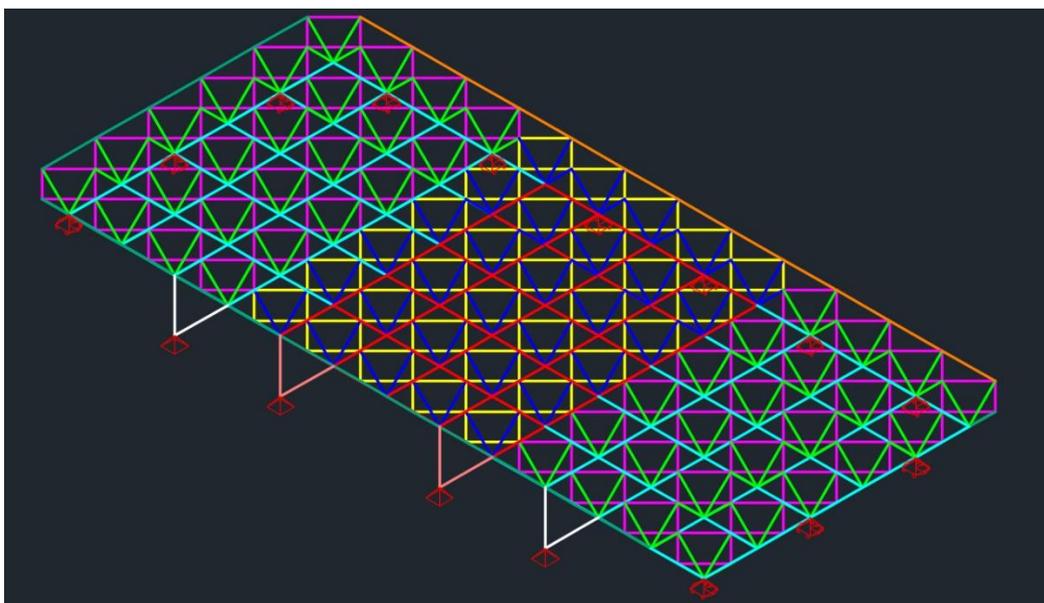


Figura 36. Representación de la celosía ORG_10G con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

7.4.1.2 Estructura con los semioctaedros de la mitad de dimensión.

A partir de aquí se estudiará la estructura partiendo de una reducción de la mitad de las dimensiones de los semioctaedros: primero se dividirá la estructura en 6 grupos diferentes de la misma forma que en la **Celosía_ORG_5G**, pero subdividiendo el grupo "Apoyos" en dos subgrupos diferentes e intercambiando el cordón superior por el cordón inferior.

Teniendo en cuenta que las dimensiones de los semioctaedros se han reducido a la mitad, así también lo ha hecho el canto de la celosía, por lo que se han calculado tanto con el nuevo canto (0,868m) como con el canto original de la estructura (1,735m)

Dado que ahora las dimensiones se han reducido a la mitad, las cargas puntuales sobre los nudos se han dividido entre un poco más de 4; esto se debe a que por razones constructivas no hay exactamente 4 veces más semioctaedros que en la estructura original, de ahí a que la división no sea exactamente entre 4. Las nuevas cargas puntuales son:

Nudos interiores: 1,49 kN (negro)

Nudos perimetrales de la dimensión mayor: 1,98 kN (rojo)

Nudos perimetrales de la dimensión menor: 3,51 kN (azul)

Nudos de la esquina de la dimensión mayor: 2,24kN (naranja)

Nudos de la esquina de la dimensión menor: 4,39 kN (verde)

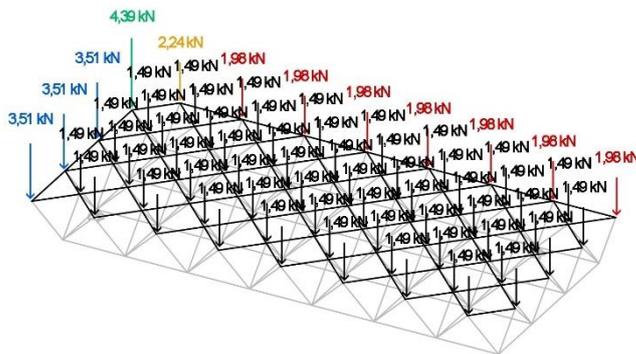


Figura 37. Reparto de cargas puntuales.

Celosía_/2_6G

La división en grupos es la misma que en la **celosía_ORG_5G**, pero subdividiendo el grupo de “Apoyos” en dos subgrupos diferentes.

Nombre	Celosía_/2_6G		
Número de grupos de barras	6	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE Ic 80 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE Ic 70 3.2	4
	Diagonales interiores	PHC UNE Ic 40 2.6	1200
	Cordón inferior	PHC UNE Ic 40 2.6	563
	Cordón superior	PHC UNE Ic 50 6.3	1200
	Perimetrales exteriores	PHC UNE Ic 50 6.3	70
Acero	S275		
Peso total	17240,13 kg		

Tabla 6. Características y asignación de barras de la celosía_/2_6G.

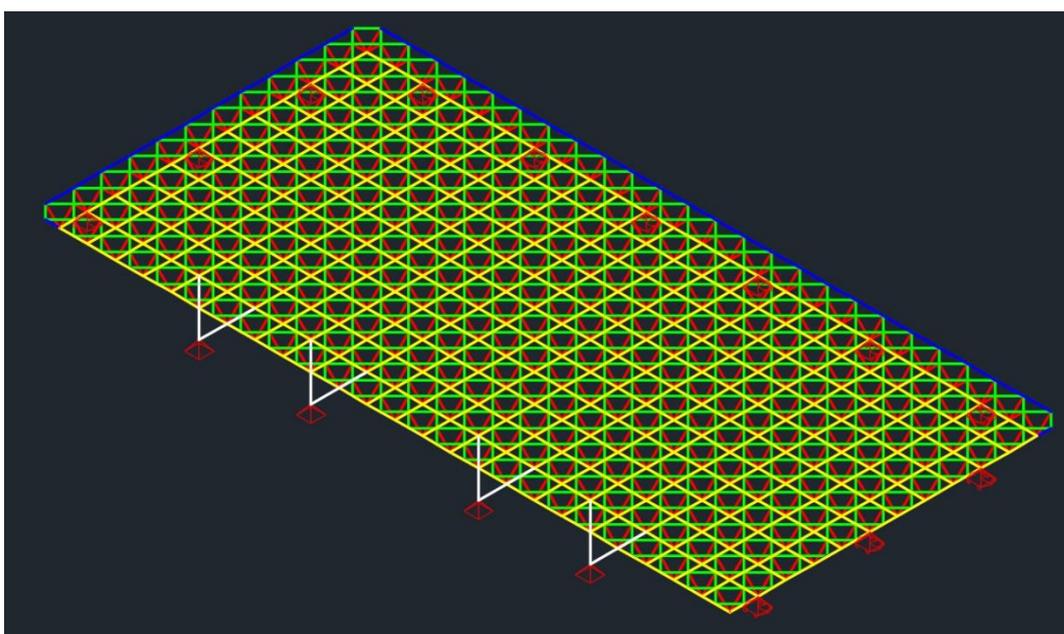


Figura 38. Representación de la celosía_/2_6G con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Celosía_/2_6G_C+86cm

La división de los grupos es la misma que en la **celosía_/6G**.

Nombre	Celosía_/2_6G_C+86cm		
Número de grupos de barras	6	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE Ic 70 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE Ic 70 3.2	4
	Diagonales interiores	PHC UNE Ic 50 2.6	1200
	Cordón inferior	PHC UNE Ic 40 2.6	563
	Cordón superior	PHC UNE Ic 40 5.0	1200
	Perimetrales exteriores	PHC UNE Ic 40 3.2	70
Acero	S275		
Peso total	20345,68 kg		

Tabla 7. Características y asignación de barras de la celosía_/2_6G_C+86cm.

Celosía /2_10G

La división de los grupos es la misma que en la celosía_ORG_10G.

Nombre	Celosía /2_10G		
Número de grupos de barras	10	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE Ic 90 4.2	4
	Apoyos 2	PHC UNE Ic 70 6.3	4
	Diagonales 1	PHC UNE Ic 40 2.6	864
	Diagonales 2	PHC UNE Ic 40 2.6	336
	Superiores 1	PHC UNE Ic 40 2.6	768
	Superiores 2	PHC UNE Ic 40 3.2	432
	Inferiores 1	PHC UNE Ic 40 5.0	390
	Inferiores 2	PHC UNE Ic 60 3.2	173
	Laterales 1	PHC UNE Ic 50 5.0	24
Laterales 2	PHC UNE Ic 40 2.6	46	
Acero	S275		
Peso total	15769,22 kg		

Tabla 8. Características y asignación de barras de la celosía /2_10G.

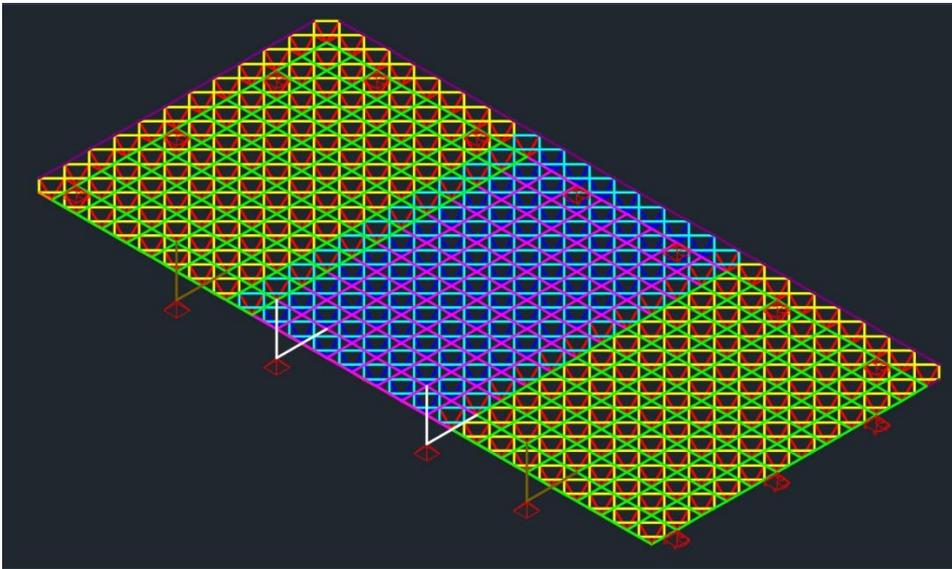


Figura 39. Representación de la celosía /2_10G con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Celosía /2_10G_C+86cm

Nombre	Celosía /2/10G_C+86cm		
Número de grupos de barras	10	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE Ic 70 3.2	4
	Apoyos 2	PHC UNE Ic 80 6.3	4
	Diagonales 1	PHC UNE Ic 50 2.6	864
	Diagonales 2	PHC UNE Ic 40 3.2	336
	Superiores 1	PHC UNE Ic 40 2.6	768
	Superiores 2	PHC UNE Ic 40 2.6	432
	Inferiores 1	PHC UNE Ic 40 3.2	390
	Inferiores 2	PHC UNE Ic 40 3.2	173
	Laterales 1	PHC UNE Ic 70 3.2	24
Laterales 2	PHC UNE Ic 40 2.6	46	
Acero	S275		
Peso total	19223,09 kg		

Tabla 9. Características y asignación de barras de la celosía /2_10G_C+86cm.

Nombre	Peso total (kg)
Celosía_ORG_10G	12266,24
Celosía /2_6G	17240,13
Celosía /2_6G_C+86cm	20345,68
Celosía /2_10G	15769,22
Celosía /2_10G_C+86cm	19233,09

Tabla 10. Peso total de todas las celosías /2.

A partir de la *Tabla 10* podemos observar que todos los pesos obtenidos de este tipo de celosías donde las dimensiones de los semioctaedros eran reducidas a la mitad son bastante superiores a los pesos obtenidos por las celosías donde las dimensiones son las originales, por lo que se entiende que este no es un buen camino para la optimización de la estructura. Se decide que, salvo por una ronda próxima donde solo se aumentarán o disminuirán los cantos, no se va a trabajar más con este tipo de estructuras.

7.4.1.3 Estructura orientada inversamente.

Esta nueva celosía se compone como la celosía original pero girada 180° sobre su eje X, comúnmente diríamos que está “dada la vuelta”. Lo que antes era el cordón inferior ahora pasa a ser el cordón superior y viceversa, las barras diagonales que antes “caían” para encontrarse en grupos de 4 en el cordón inferior, ahora “ascienden” para encontrarse en el cordón superior.

En principio estas configuraciones deberían ser menos eficientes que las anteriores, ya que las barras de mayor longitud están colocadas en la parte superior, donde la mayoría de ellas estarán comprimidas. Esto repercute en el fallo a pandeo de las barras, por lo que, a priori, se necesitarán secciones más grandes para estas barras y por tanto un aumento de peso global de la estructura.

Dado que esta nueva modelización ofrece diferentes posibilidades a la hora de colocar las barras de apoyo, a partir de aquí se estudiará la celosía inversa de la siguiente forma: primero se dividirá la estructura en 5 grupos diferentes de la misma forma que en la **Celosía_ORG_5G** y de 4 formas diferentes dependiendo de la ubicación y la orientación de los apoyos y de las barras de apoyo; segundo se dividirá la estructura en 9 grupos diferentes de la misma forma que en la **Celosía_ORG_8G** pero con 2 grupos para las barras de apoyos en vez de 1, y de 4 formas diferentes dependiendo de la ubicación y la orientación de los apoyos y de las barras de apoyo.

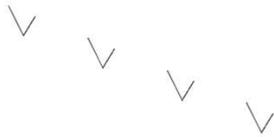


Figura 40. Modelización de la estructura, barras de apoyo.

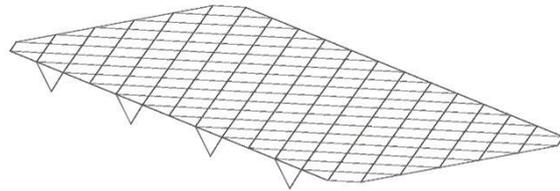


Figura 41. Modelización de la estructura, cordón inferior.

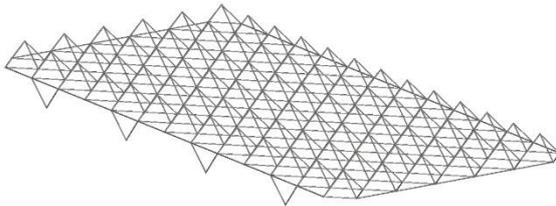


Figura 42. Modelización de la estructura, barras inclinadas.

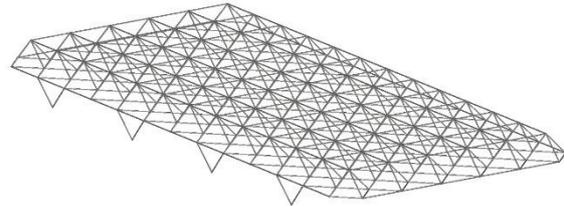


Figura 43. Modelización de la estructura, cordón superior.

Nuevamente, dado que el número y posición de las cargas puntuales han cambiado, se han recalculado para el nuevo tipo de estructura. Las nuevas cargas puntuales son:

Nudos interiores: 10,23 kN

Nudos perimetrales de la dimensión mayor: 12,79 kN

Nudos perimetrales de la dimensión menor: 15,77 kN

Nudos de esquina: 19,72 kN

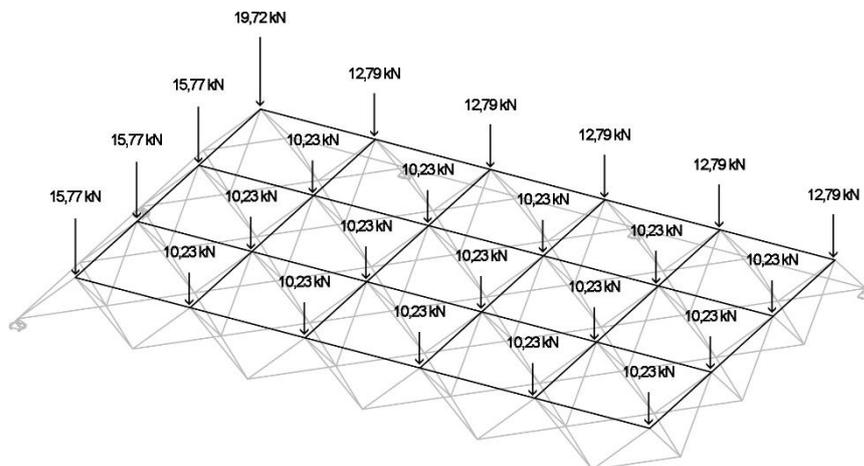


Figura 44. Reparto de cargas puntuales.

Celosía_INV_5G_1

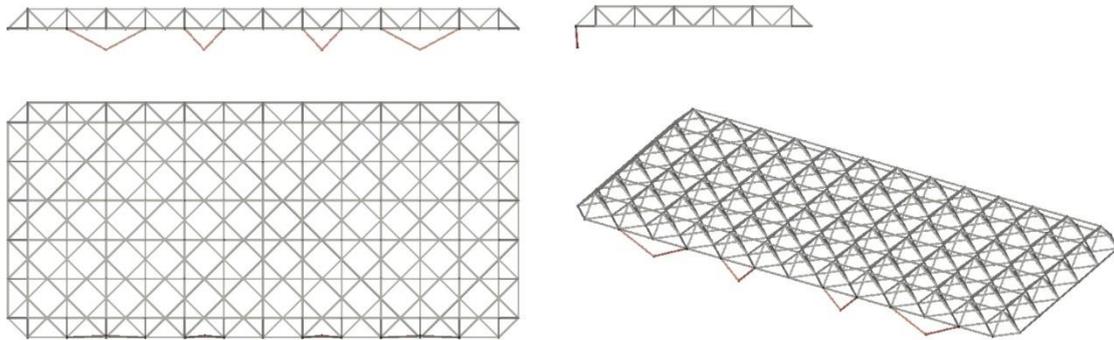


Figura 45. Modelización de la celosía_INV_5G, primera variante.

En esta primera modelización de la **celosía_INV_5G**, los 4 apoyos se unen a la estructura mediante 8 barras que está conectadas con los nudos perimetrales del nivel inferior de la estructura, similar a la estructura original.

Nombre	Celosía_INV_5G_1		
Número de grupos de barras	5	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos	PHC UNE Ic 70 6.3	8
	Diagonales interiores	PHC UNE Ic 50 6.3	312
	Cordón superior	PHC UNE Ic 70 6.3	137
	Cordón inferior	PHC UNE Ic 40 3.2	312
	Perimetrales exteriores	PHC UNE Ic 40 3.2	34
Acero	S275		
Peso total	12701,62 kg		

Tabla 11. Características y asignación de barras de la celosía_INV_5G_1.

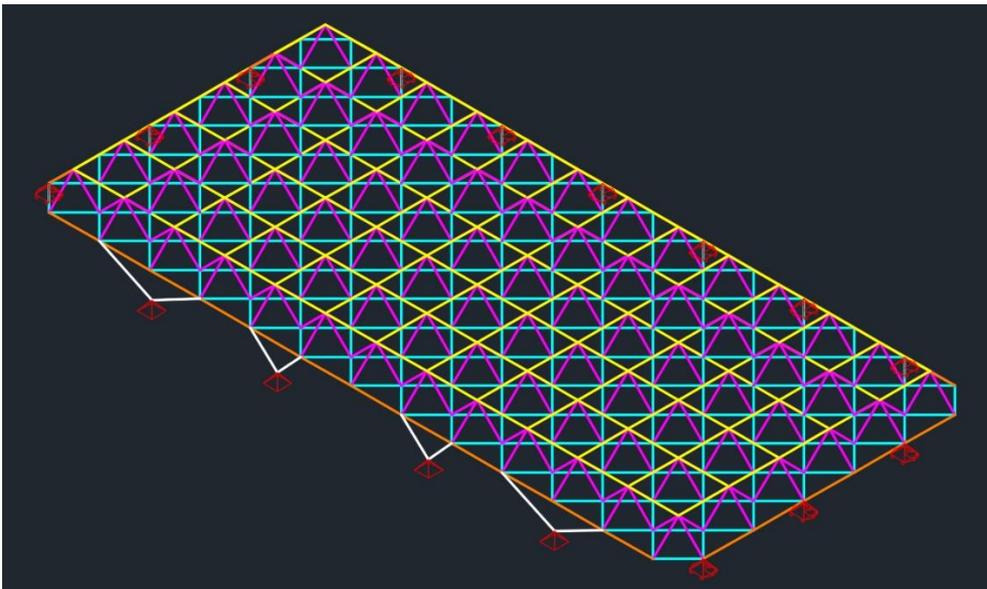


Figura 46. Representación de la celosía_INV_5G_1 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Celosía_INV_5G_2

En esta segunda modelización de la **celosía_INV_5G**, los 4 apoyos están unidos a la estructura mediante 8 barras conectadas al cordón inferior, pero no en los nudos perimetrales.

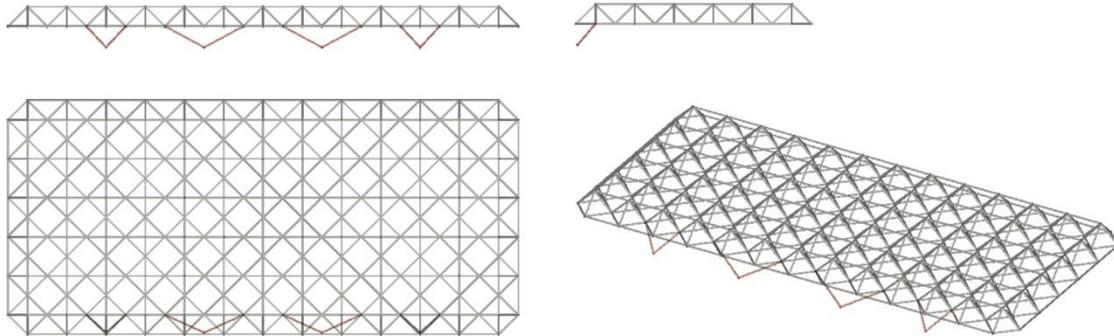


Figura 47. Modelización de la celosía_INV_5G, segunda variante.

Nombre	Celosía_INV_5G_2		
Número de grupos de barras	5	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos	PHC UNE lc 70 6.3	8
	Diagonales interiores	PHC UNE lc 50 6.3	312
	Cordón superior	PHC UNE lc 70 6.3	137
	Cordón inferior	PHC UNE lc 40 3.2	312
	Perimetrales exteriores	PHC UNE lc 40 3.2	34
Acero	S275		
Peso total	14753,46 kg		

Tabla 12. Características y asignación de barras de la celosía_INV_5G_2.

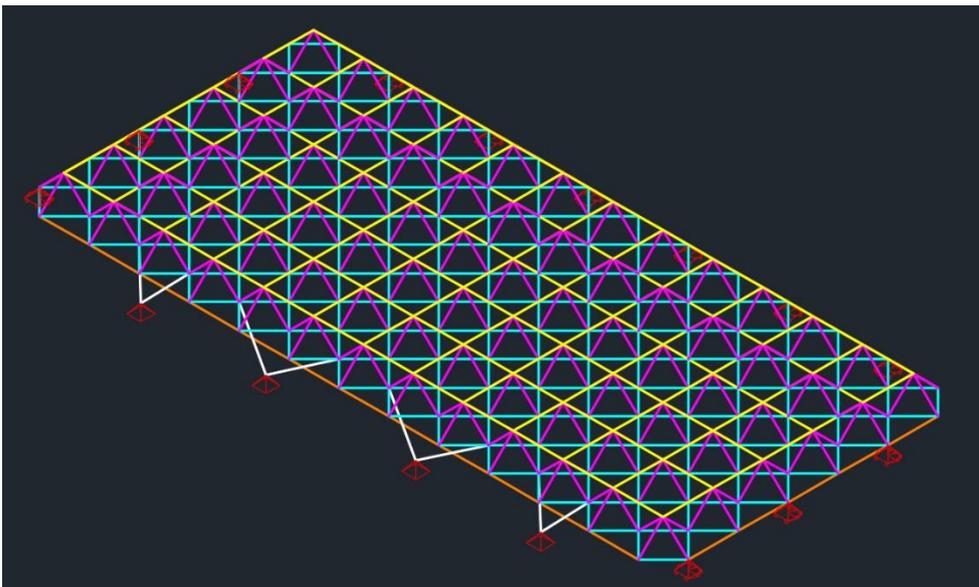


Figura 48. Representación de la celosía_INV_5G_2 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Celosía_INV_5G_3

En esta tercera modelización de la **celosía_INV_5G**, se reduce el número de apoyo a 3 por lo que en este caso son 6 las barras que están conectadas al cordón inferior, pero no en los nudos perimetrales.

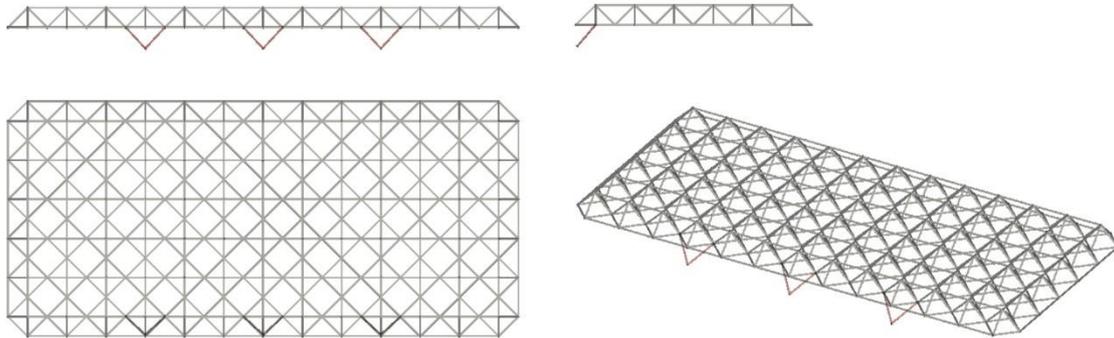


Figura 49. Modelización de la celosía_INV_5G, tercera variante.

Nombre	Celosía_INV_5G_3		
Número de grupos de barras	5	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos	PHC UNE Ic 70 3.2	6
	Diagonales interiores	PHC UNE Ic 50 6.3	312
	Cordón superior	PHC UNE Ic 70 6.3	137
	Cordón inferior	PHC UNE Ic 50 4.0	312
	Perimetrales exteriores	PHC UNE Ic 40 3.2	34
Acero	S275		
Peso total	13881,87 kg		

Tabla 13. Características y asignación de barras de la celosía_INV_5G_3.

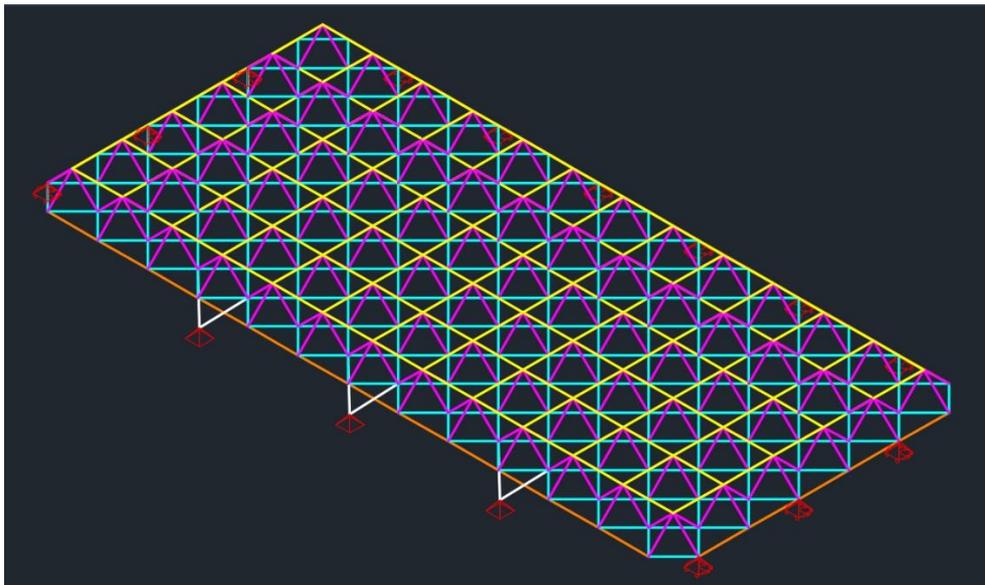


Figura 50. Representación de la celosía_INV_5G_3 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Celosía_INV_5G_4

En esta cuarta modelización de la **celosía_INV_5G**, los 4 apoyos se unen a la estructura mediante 8 barras que está conectadas con los nudos perimetrales del nivel inferior de la estructura, pero de forma diferente a la **celosía_INV_5G_1**.

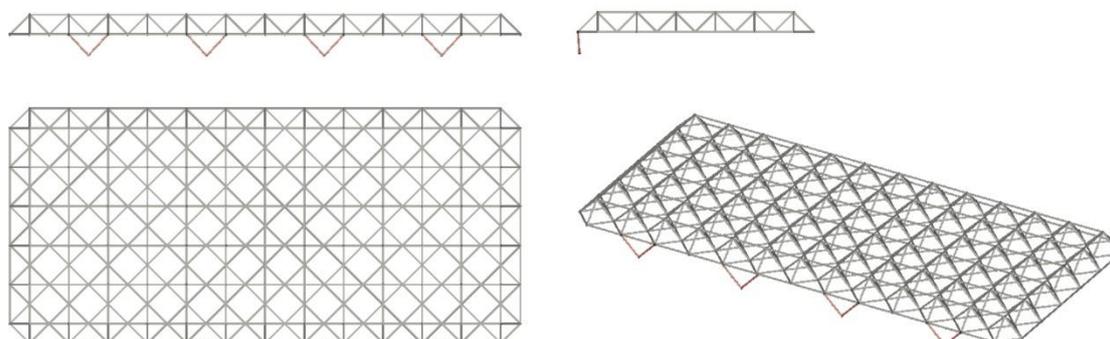


Figura 51. Modelización de la celosía_INV_5G, cuarta variante.

Nombre	Celosía_INV_5G_4		
Número de grupos de barras	5	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos	PHC UNE Ic 50 6.3	8
	Diagonales interiores	PHC UNE Ic 50 6.3	312
	Cordón superior	PHC UNE Ic 70 6.3	137
	Cordón inferior	PHC UNE Ic 40 3.2	312
	Perimetrales exteriores	PHC UNE Ic 40 2.6	34
Acero	S275		
Peso total	12482,11 kg		

Tabla 14. Características y asignación de barras de la celosía_INV_5G_4.

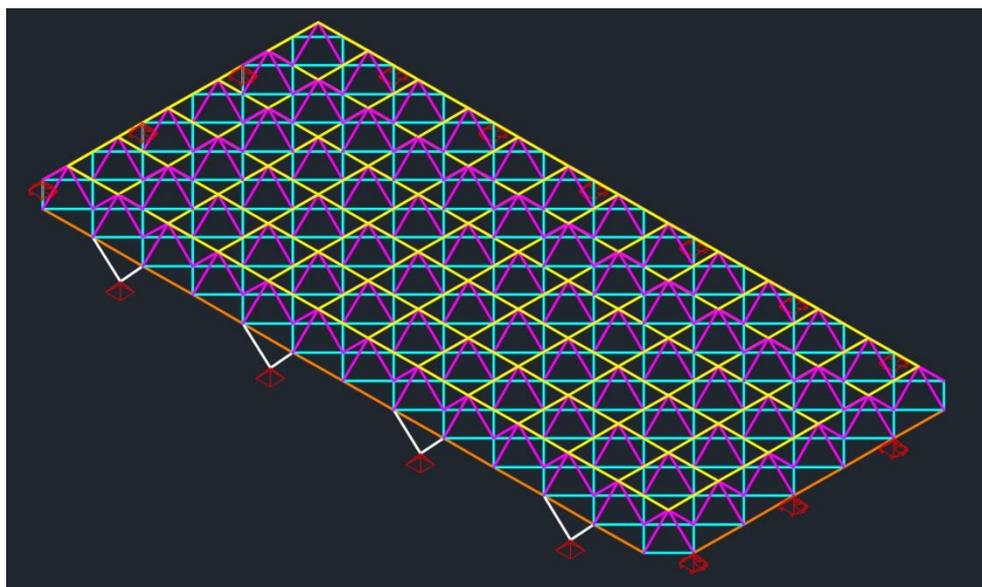


Figura 52. Representación de la celosía_INV_5G_4 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

En un intento de mejora con respecto a las ya trabajadas celosías **INV_5G**, se va a continuar con el proceso de optimización de este tipo de celosías aumentando el número de grupos en cada una de las 4 celosías **INV_5G** a 9 grupos, de igual forma que sucedía

anteriormente con la **celosía_ORG_5G** y la **celosía_ORG_10G**. La forma de agrupar las barras es similar a la **celosía_ORG_10G**: Se divide cada uno de los grupos en dos subgrupos y se trabaja por simetría; es decir, uno de los subgrupos estará asociado a las barras centrales y el otro subgrupo estará asociado a las barras más alejadas del centro de la celosía, tomando como referencia la dimensión mayor de la celosía.

Celosía_INV_9G_1

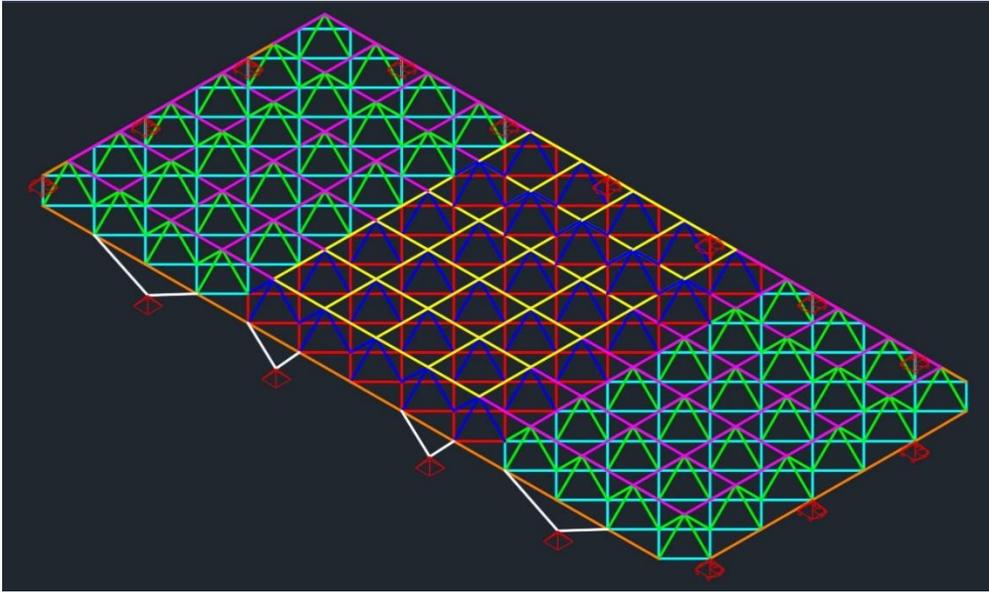


Figura 53. Representación de la celosía_INV_9G_1 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Nombre	Celosía_INV_9G_1		
Número de grupos de barras	9	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE Ic 70 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE Ic 50 4.0	4
	Diagonales 1	PHC UNE Ic 50 6.3	192
	Diagonales 2	PHC UNE Ic 50 6.3	120
	Inferiores 1	PHC UNE Ic 40 3.2	192
	Inferiores 2	PHC UNE Ic 40 2.6	120
	Superiores 1	PHC UNE Ic 70 6.3	88
	Superiores 2	PHC UNE Ic 70 6.3	49
	Laterales	PHC UNE Ic 40 3.2	34
Acero	S275		
Peso total	12600,76 kg		

Tabla 15. Características y asignación de barras de la celosía_INV_9G_1.

Celosía_INV_9G_2

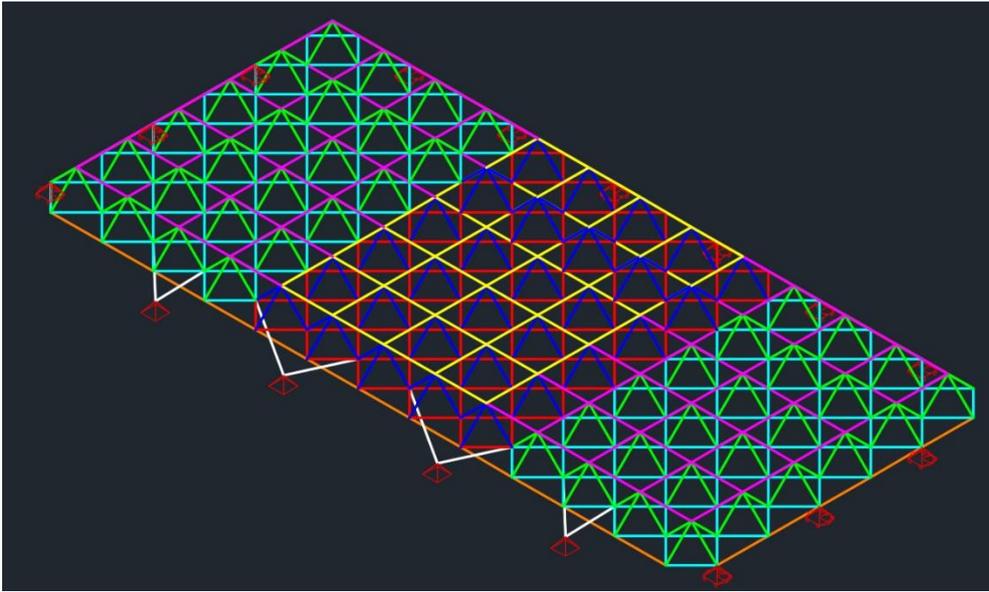


Figura 54. Representación de la celosía_INV_9G_2 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Nombre	Celosía_INV_9G_2		
Número de grupos de barras	9	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE Ic 60 4.0	4
	Apoyos 2	PHC UNE Ic 80 3.2	4
	Diagonales 1	PHC UNE Ic 50 6.3	192
	Diagonales 2	PHC UNE Ic 50 6.3	120
	Inferiores 1	PHC UNE Ic 50 6.3	192
	Inferiores 2	PHC UNE Ic 50 6.3	120
	Superiores 1	PHC UNE Ic 70 6.3	88
	Superiores 2	PHC UNE Ic 70 3.2	49
	Laterales	PHC UNE Ic 40 3.2	34
Acero	S275		
Peso total	14509,03 kg		

Tabla 16. Características y asignación de barras de la celosía_INV_9G_2.

Celosía_INV_9G_3

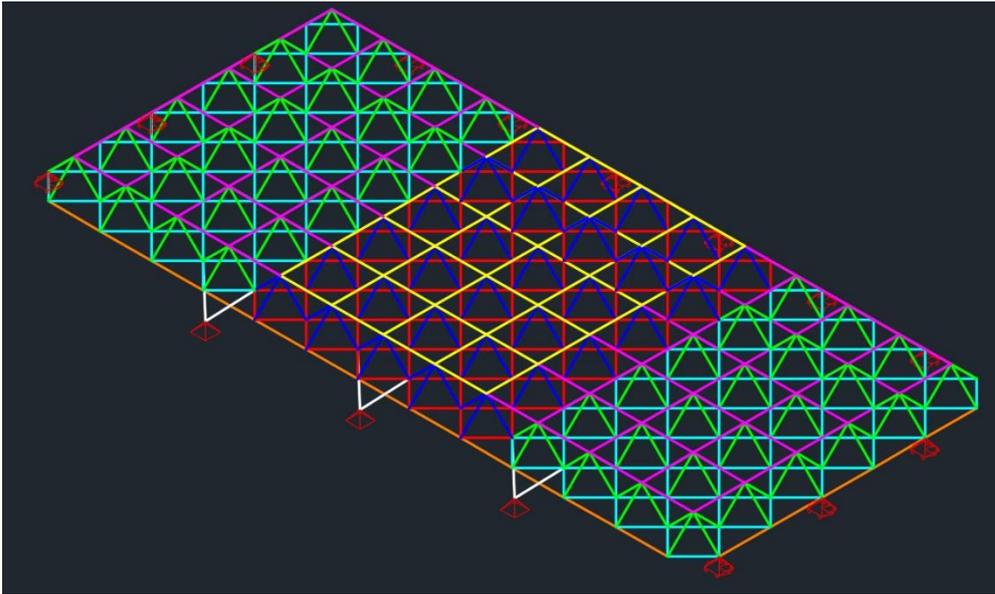


Figura 55. Representación de la celosía_INV_9G_3 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Nombre	Celosía_INV_9G_3		
Número de grupos de barras	9	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE Ic 70 3.2	4
	Apoyos 2	PHC UNE Ic 60 4.0	2
	Diagonales 1	PHC UNE Ic 50 6.3	192
	Diagonales 2	PHC UNE Ic 50 6.3	120
	Inferiores 1	PHC UNE Ic 50 4.0	192
	Inferiores 2	PHC UNE Ic 50 2.6	120
	Superiores 1	PHC UNE Ic 70 3.2	88
	Superiores 2	PHC UNE Ic 70 6.3	49
Laterales	PHC UNE Ic 40 3.2	34	
Acero	S275		
Peso total	13247,96 kg		

Tabla 17. Características y asignación de barras de la celosía_INV_9G_3.

Celosía_INV_9G_4

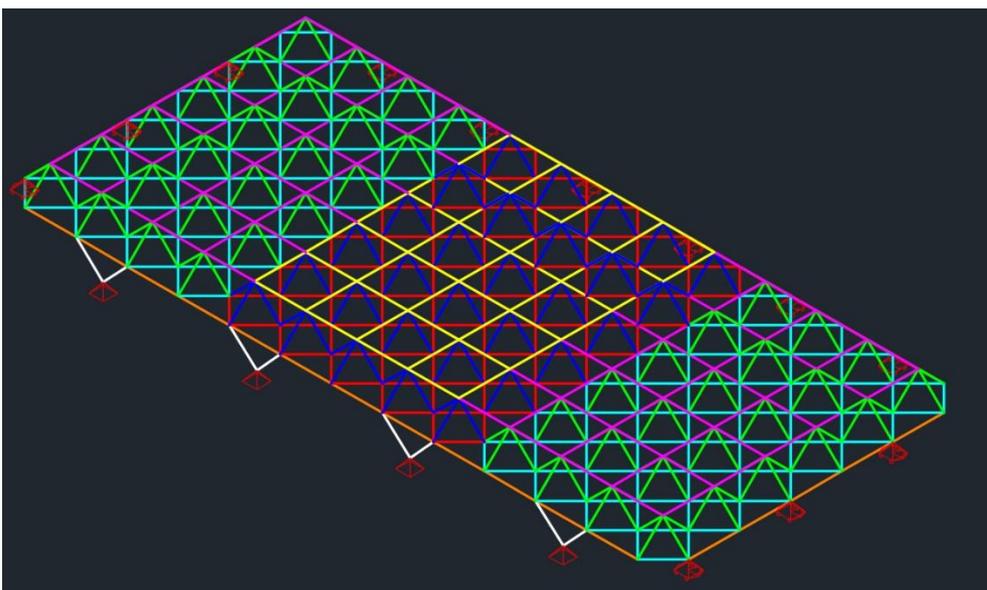


Figura 56. Representación de la celosía_INV_9G_4 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Nombre	Celosía_INV_9G_4		
Número de grupos de barras	9	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE Ic 50 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE Ic 70 3.2	4
	Diagonales 1	PHC UNE Ic 50 6.3	192
	Diagonales 2	PHC UNE Ic 50 6.3	120
	Inferiores 1	PHC UNE Ic 40 3.2	192
	Inferiores 2	PHC UNE Ic 40 2.6	120
	Superiores 1	PHC UNE Ic 70 6.3	88
	Superiores 2	PHC UNE Ic 70 6.3	49
	Laterales	PHC UNE Ic 40 2.6	34
Acero	S275		
Peso total	12455,10 kg		

Tabla 18. Características y asignación de barras de la celosía_INV_9G_4.

Nombre	Peso total (kg)	Diferencia de peso (kg)	Porcentaje de reducción de peso
Celosía_INV_5G_1	12701,62	100,86	0,794%
Celosía_INV_9G_1	12600,76		
Celosía_INV_5G_2	14753,46	244,43	1,657%
Celosía_INV_9G_2	14509,03		
Celosía_INV_5G_3	13881,87	634,84	4,573%
Celosía_INV_9G_3	13247,03		
Celosía_INV_5G_4	12482,11	27,01	0,216%
Celosía_INV_9G_4	12455,10		

Tabla 19. Características y comparación de las celosías INV_5G e INV_9G.

Como podemos observar en la *Tabla 19*, un aumento del número de grupos de barras a casi el doble no ha sido muy significativo respecto a la reducción del peso de las celosías. Es verdad que entre la **celosía_INV_5G** y la **celosía_INV_9G** hay una reducción de más de 600 kg que representan más del 4,5 % del peso, pero no es la celosía que más nos interesaba, ya que sigue pesando casi 800 kg más que la **celosía_INV_9G**.

Aunque no se han mejorado los resultados de la **celosía_ORG_10G** (12266,24 kg) hemos avanzado en el proceso: de las últimas 8 celosías estudiadas, las 4 más ligeras tienen en común que en todas las barras que sirven de apoyo están conectadas a las barras perimetrales del cordón inferior de la estructura, es decir, se encuentran inclinadas solo en uno de los planos verticales que las componen y no en ambos como las otras 4.

Utilizando este dato, vamos a volver a la **celosía_ORG_10G** y a estudiarla cambiando las barras de apoyo y colocándolas directamente unidas al cordón superior, dado que de esa forma conseguiremos que estén inclinadas solamente en uno de los planos verticales y no en ambos.

7.4.1.4 Modificaciones de la celosía_ORG_10G

En este apartado vamos a ir estudiando modificaciones de la **celosía_ORG_10G**, la celosía que mejor resultado ha dado hasta ahora. Después de todas celosías analizadas anteriormente, lo que realmente marca la diferencia entre el peso de una celosía y otra son aquellos tipos de barras más numerosos: las barras del cordón superior, las barras del cordón inferior y las barras inclinadas que unen ambos cordones y le otorgan canto a la celosía. Una de las formas de reducir el tamaño de perfil de las barras es aminorar el esfuerzo al que están sometidas, por lo que se ha optado por introducir barras diagonales tanto en el cordón superior como en el cordón inferior para absorber parte de los esfuerzos.

Las celosías estudiadas a continuación son variaciones de la **celosía_ORG_10G** donde vamos a modificar las barras de apoyo y vamos a ir añadiendo y suprimiendo barras diagonales en el cordón superior e inferior alternativamente de modo que tendremos 8 nuevas celosías para trabajar.

En este apartado solo se va a mostrar un esquema con colores diferenciando los grupos de barras, el esquema de la **celosía_ORG_10G_2**. Todas las demás representaciones son iguales exceptuando uno o dos grupos adicionales de barras diagonales en el cordón inferior, superior o inferior y superior.

Celosía_ORG_10G_2

La única diferencia que existe con la **celosía_ORG_10G** es el cambio en las barras de apoyo mencionado antes, pasan a unirse a la celosía directamente en el cordón superior.

La forma de agrupar las barras de esta celosía es exactamente igual que la **celosía_10G_2**, se divide cada uno de los grupos en dos subgrupos y se trabaja por simetría; es decir, uno de los subgrupos estará asociado a las barras centrales y el otro subgrupo estará asociado a las barras más alejadas del centro de la celosía, tomando como referencia la dimensión mayor de la celosía.

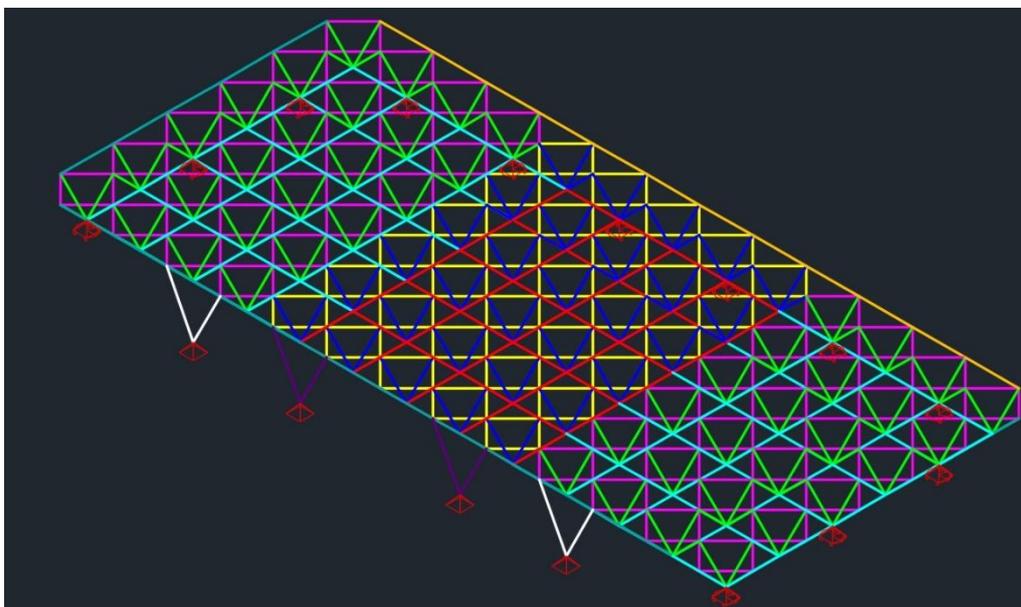


Figura 57. Representación de la celosía_ORG_10G_2 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Nombre	Celosía_ORG_10G_2		
Número de grupos de barras	10	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 60 4.0	4
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 6.3	120
	Superiores 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 2.6	120
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inferiores 1	PHC UNE lc 40 4.0	49
	Inferiores 2	PHC UNE lc 50 2.6	88
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 2.6	22
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 2.6	12
Acero	S275		
Peso total	10134,46 kg		

Tabla 20. Características y comparación de la celosía_ORG_10G_2.

A simple vista y comparándola con la **celosía_ORG_10G** (12266,24 kg), aquella que había obtenido el mejor resultado hasta ahora, podemos observar que se ha reducido

más de 2100 kg el peso tan solo cambiando el tipo de apoyo de la celosía. Esta diferencia supone una reducción del 17,38% del peso, una mejora muy significativa.

Celosía_ORG_12G_+DiagSs

Esta celosía es igual que la **celosía_ORG_10G_2** pero con barras diagonales tanto en el cordón superior como en el cordón inferior. Tanto las barras diagonales del cordón inferior como las del cordón superior forman un grupo diferente.

Nombre	Celosía_ORG_12G_+DiagSs		
Número de grupos de barras	12	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 60 4.0	4
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 6.3	120
	Superiores 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 2.6	120
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 50 4.0	192
	Inferiores 1	PHC UNE lc 40 5.0	49
	Inferiores 2	PHC UNE lc 40 2.6	88
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 3.2	22
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 2.6	12
	Diagonales sup 1	PHC UNE lc 40 2.6	20
	Diagonales inf 1	PHC UNE lc 70 6.3	40
Acero	S275		
Peso total	12725,04 kg		

Tabla 21. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_12G_+DiagSs.

Celosía_ORG_11G_+Diags

Ahora se suprimen las diagonales del cordón superior superiores y se mantienen solamente las diagonales del cordón inferior.

Nombre	Celosía_ORG_11G_+Diags		
Número de grupos de barras	11	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 60 4.0	4
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 6.3	120
	Superiores 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 2.6	120
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 50 4.0	192
	Inferiores 1	PHC UNE lc 40 4.0	49
	Inferiores 2	PHC UNE lc 40 2.6	88
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 3.2	22
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 2.6	12
	Diagonales inf 1	PHC UNE lc 70 6.3	40
	Acero	S275	
Peso total	12477,80 kg		

Tabla 22. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_11G_+Diags.

Celosía_ORG_11G_+Diags_2

Dado que el peso de la **celosía_ORG_11G+Diags** (12477,80 kg) sigue siendo bastante elevado, vamos a reducir el número de diagonales del cordón inferior y se van a mantener solo las diagonales más alejadas del centro de la celosía, tomando como referencia la dimensión más grande de la estructura.

Nombre	Celosía_ORG_11G_+Diags_2		
Número de grupos de barras	11	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 60 4.0	4
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 6.3	120
	Superiores 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 2.6	120
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inferiores 1	PHC UNE lc 40 4.0	49
	Inferiores 2	PHC UNE lc 40 3.2	88
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 3.2	22
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 2.6	12
	Diagonales inf 1	PHC UNE lc 70 6.3	10
	Acero	S275	
Peso total	10690,76 kg		

Tabla 23. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_11G_+Diags_2.

Celosía_ORG_11G_+Diags_3

Vamos a tomar como referencia la **celosía_ORG_11G_+Diags_2** y vamos a volver a cambiar las barras de apoyo a la forma original, unidas al cordón inferior de la celosía.

Nombre	Celosía_ORG_11G_+Diags_3		
Número de grupos de barras	11	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 60 4.0	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 70 3.2	4
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 4.0	120
	Superiores 2	PHC UNE lc 50 4.0	192
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 2.6	120
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inferiores 1	PHC UNE lc 50 2.6	49
	Inferiores 2	PHC UNE lc 50 2.6	88
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 2.6	22
	Laterales 2	PHC UNE lc 50 6.3	12
	Diagonales inf 1	PHC UNE lc 70 6.3	10
	Acero	S275	
Peso total	11442,76 kg		

Tabla 24. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_11G_+Diags_3.

Celosía_ORG_11G_+Diags_4

Dado que la **celosía_ORG_11G_+Diags_3** (11442,76 kg) es más pesada que la **celosía_ORG_11G_+Diags_2** (10690,76 kg), vamos a seguir estudiando esta segunda a la que le vamos a añadir 4 barras más de apoyo, unidas al cordón superior de la celosía. Estas nuevas 4 barras van a formar un grupo independiente por sí mismo, teniendo ahora 3 grupos diferentes para las barras de apoyo.

Nombre	Celosía_ORG_11G_+Diags_4		
Número de grupos de barras	12	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 4.0	120
	Superiores 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 2.6	120
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inferiores 1	PHC UNE lc 40 4.0	49
	Inferiores 2	PHC UNE lc 40 2.6	88
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 3.2	22
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 2.6	12
	Diagonales inf 1	PHC UNE lc 70 6.3	10
	Apoyos 3	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Acero	S275	
Peso total	10233,51 kg		

Tabla 25. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_11G_+Diags_4.

Con un aumento de las barras de apoyo hemos vuelto a tener un peso similar a la **celosía_ORG_11G_+Diags_2** (10690,76 kg) y la **celosía_ORG_10G_2** (10134,46 kg), las dos mejores estructuras hasta ahora.

Celosía_ORG_13G_+DiagSs

Utilizando como base el buen resultado de la última celosía calculada, ahora vamos a añadir un grupo con barras diagonales superiores paralelas a la mayor dimensión de la estructura.

Nombre	Celosía_ORG_13G_+DiagSs		
Número de grupos de barras	13	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 4.0	120
	Superiores 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 2.6	120
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inferiores 1	PHC UNE lc 40 5.0	49
	Inferiores 2	PHC UNE lc 40 2.6	88
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 2.6	22
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 2.6	12
	Diagonales inf 1	PHC UNE lc 70 6.3	10
	Apoyos 3	PHC UNE lc 50 6.3	4
		Diagonal sup 1	PHC UNE lc 50 2.6
Acero	S275		
Peso total	10425,53 kg		

Tabla 26. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_13G_+DiagSs.

Celosía_ORG_13G_+DiagSs_2

Para seguir abriendo el abanico de posibilidades, esta celosía es igual que la anterior, **celosía_ORG_13G_+DiagSs**, pero esta vez cambiaremos las barras diagonales superiores de orientación, siendo en este caso paralelas a menor dimensión de la estructura.

Nombre	Celosía_ORG_13G_+DiagSs_2		
Número de grupos de barras	13	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 4.0	120
	Superiores 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 2.6	120
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 50 2.6	192
	Inferiores 1	PHC UNE lc 40 3.2	49
	Inferiores 2	PHC UNE lc 40 5.0	88
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 3.2	22
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 2.6	12
	Diagonales inf 1	PHC UNE lc 70 3.2	10
	Apoyos 3	PHC UNE lc 50 6.3	4
		Diagonales sup 1	PHC UNE lc 70 6.3
Acero	S275		
Peso total	10939,49 kg		

Tabla 27. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_13G_+DiagSs_2.

7.4.1.5 Estructura a partir de tetraedros regulares.

Como último tipo de estructura a estudiar en esta fase inicial vamos a trabajar con estructuras creadas a partir de tetraedros regulares colocados de una forma similar a los semioctaedros de la estructura original. La disposición de la estructura sigue estando formada por un cordón superior (triángulos equiláteros), un cordón inferior (hexágonos regulares), una serie de barras que unen ambos cordones y otorgan el canto a la estructura (triángulos equiláteros), unas barras de apoyo que conecten la estructura con el terreno y una serie de barras perimetrales.

Cada una de las celosías van a estar formadas por filas de tetraedros que comparten uno de sus lados. Estas filas van a tener siempre un número impar de triángulos equiláteros para que puedan ser simétricas. Las dos primeras estructuras van a estar formadas por 6 filas y la última por 7 filas, dado que, al reducir las dimensiones de los tetraedros, llega un momento que es necesario aumentar el número de filas para poder apoyar bien la cubierta en la estructura y la estructura en el terreno.

Se van a crear 3 estructuras con un número diferente de tetraedros que la conforman, estructuras con 126, 138 y 175. Geométricamente, un tetraedro es un poliedro formado por 4 caras, todas ellas triángulos; en el caso de que todas ellas sean triángulos equiláteros, el tetraedro pasaría a llamarse tetraedro regular y formaría parte del grupo de sólidos platónicos. Todas las configuraciones que podemos crear con un número razonable de tetraedros tienen una diferencia significativa con el resto de las celosías estudiadas: el canto de la estructura, de una dimensión mucho mayor a la celosía original. Por eso, después de calcular y estudiar cada una de las configuraciones formadas a partir de tetraedros, se van a ajustar los cantos de las celosías para que coincidan con el canto de la estructura original (1,735 m).



Figura 58. Modelización de la estructura, barras de apoyo.

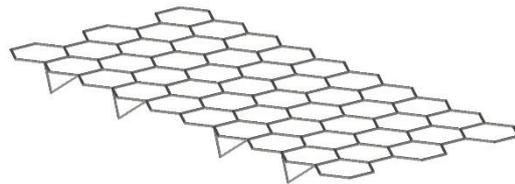


Figura 59. Modelización de la estructura, cordón inferior.

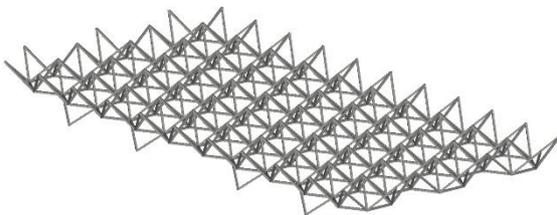


Figura 60. Modelización de la estructura, barras inclinadas.

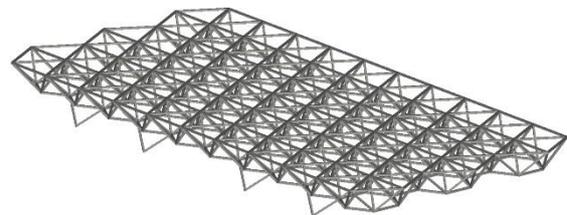


Figura 61. Modelización de la estructura, cordón superior.

Celosía_TR1_11G

Esta es la primera estructura formada a partir de tetraedros, 126. Estos tetraedros están formados por triángulos equiláteros de 4,16 m de lado y 3,60 m de altura, los tetraedros tienen 3,39 m de altura. Aunque ésta es la celosía formada por los tetraedros más grandes y por ello los que otorgan a la celosía un canto mayor, ya podemos comprobar que existe una diferencia de 1,66 m de altura del canto entre esta celosía y la original, casi el doble que el canto original (1,735 m).

Todas las cargas puntuales de la estructura se han reordenado para este tipo de celosías y ahora tenemos 5 tipos de nudos:

Nudos interiores: 14,97 kN

Nudos perimetrales de la dimensión mayor: 8,7 kN

Nudos perimetrales de la dimensión menor 1: 9,14 kN

Nudos perimetrales de la dimensión menor 2: 15,7 kN

Nudos de esquina: 9,17 kN

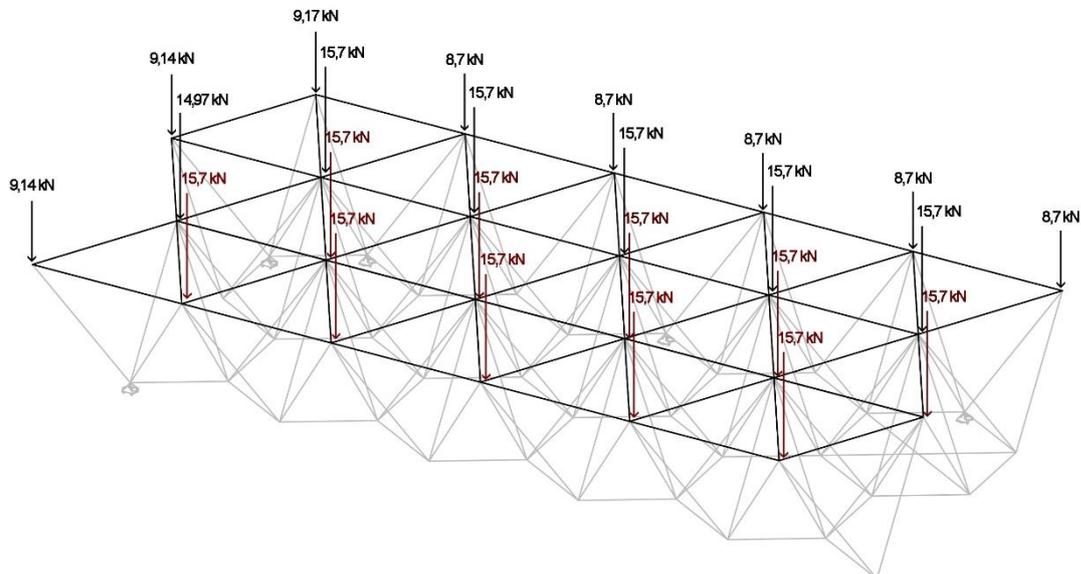


Figura 62. Reparto de cargas puntuales.

Para todas las celosías formadas a partir de tetraedros la agrupación de barras se va a realizar acorde a la **celosía_ORG_10G**, agrupando las barras según el tipo de barra y la posición que ocupa en la celosía, desde el centro de la estructura hacia el exterior tomando como referencia la dimensión mayor de la estructura, se ha convenido crear un grupo extra de barras laterales.

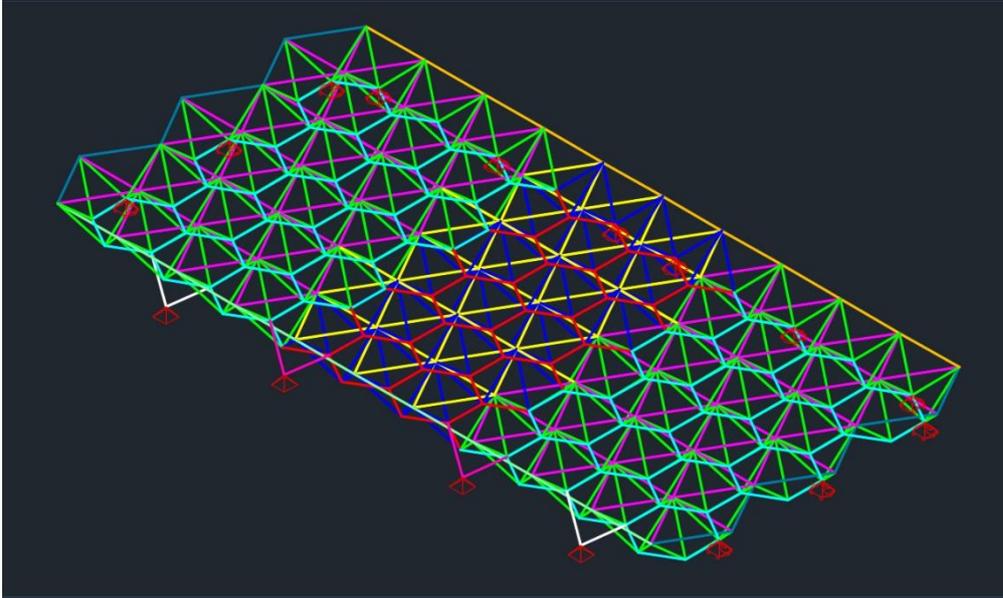


Figura 63. Representación de la celosía_TR1_11G_ con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Ya que todas las estructuras formadas a partir de tetraedros son muy similares y la única diferencia entre ellas es el número de barras de cada grupo y/o el canto de la estructura, la representación gráfica de los distintos grupos de barras que se muestra en la *Figura 63* solo se mostrará esta vez. De todos modos, se irá informando y detallando cada una de las diferencias en la agrupación de las barras, si las hubiera, en cada celosía.

Nombre	Celosía_TR1_11G		
Número de grupos de barras	11	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 90 4.0	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 70 6.3	4
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 60 4.0	276
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 70 6.3	102
	Inferiores 1	PHC UNE lc 40 3.2	124
	Inferiores 2	PHC UNE lc 40 3.2	49
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 6.3	126
	Superiores 2	PHC UNE lc 50 6.3	57
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 3.2	12
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 3.2	10
Laterales 3	PHC UNE lc 70 4.0	10	
Acero	S275		
Peso total	20681,66 kg		

Tabla 28. Características y asignación de barras de la celosía_TR1_11G.

Celosía_TR1_11G_C-166cm

Aquí nos encontramos con la primera celosía formada a partir de tetraedros a la que se le ha ajustado la dimensión del canto para que coincida con la original (1,735 m). Como la agrupación de barras y la geometría básica no ha cambiado con respecto a la celosía_TR1_11G, no es necesario volver a mostrar las *Figura 62* y *Figura 63*.

Nombre	Celosía_TR1_11G_C-166cm		
Número de grupos de barras	11	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 60 5.0	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 70 6.3	4
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 6.3	276
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 60 6.4	102
	Inferiores 1	PHC UNE lc 50 2.6	124
	Inferiores 2	PHC UNE lc 40 3.2	49
	Superiores 1	PHC UNE lc 60 4.0	126
	Superiores 2	PHC UNE lc 60 4.0	57
	Laterales 1	PHC UNE lc 50 2.6	12
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 3.2	10
	Laterales 3	PHC UNE lc 40 3.2	10
Acero	S275		
Peso total	15799,21 kg		

Tabla 29. Características y asignación de barras de la celosía_TR1_11G_C-166cm.

Aquí podemos observar algo muy interesante y que en la próxima fase estudiaremos con más detalle: un simple cambio de canto reduce en casi 5000 kg el peso de la estructura, simplemente “achatando” los tetraedros.

Celosía_TR2_11G

Esta es la segunda estructura formada a partir de tetraedros, 138. Estos tetraedros están formados por triángulos equiláteros de 3,78 m de lado y 3,27 m de altura, los tetraedros tienen 3,09 m de altura. En este caso, la diferencia entre la altura del canto de esta celosía y la original (1,735 m) es de 1,36 m.

Todas las cargas puntuales de la estructura se han reordenado para este tipo de celosías y ahora tenemos 5 tipos de nudos:

Nudos interiores: 12,38 kN

Nudos perimetrales de la dimensión mayor: 11 kN

Nudos perimetrales de la dimensión menor 1: 9,34 kN

Nudos perimetrales de la dimensión menor 2: 13,57 kN

Nudos de esquina: 12,45 kN

Celosía_TR2_11G_C-136cm

Como ya ha ocurrido anteriormente, esta celosía es exactamente igual que la anterior, pero reduciendo su canto hasta la dimensión del canto de la celosía original (1,735 m).

Nombre	Celosía_TR2_11G_C-136cm		
Número de grupos de barras	11	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE Ic 60 4.0	4
	Apoyos 2	PHC UNE Ic 70 3.2	4
	Inclinadas 1	PHC UNE Ic 50 6.3	276
	Inclinadas 2	PHC UNE Ic 50 5.3	138
	Inferiores 1	PHC UNE Ic 50 2.6	124
	Inferiores 2	PHC UNE Ic 50 2.6	66
	Superiores 1	PHC UNE Ic 60 4.0	126
	Superiores 2	PHC UNE Ic 60 4.0	75
	Laterales 1	PHC UNE Ic 40 3.2	12
	Laterales 2	PHC UNE Ic 40 3.2	11
	Laterales 3	PHC UNE Ic 50 6.3	11
	Acero	S275	
Peso total	15841,32 kg		

Tabla 31. Características y asignación de barras de la celosía_TR2_11G_C-136cm.

Celosía_TR3_12G_1

Esta es la tercera estructura formada a partir de tetraedros, 175. Estos tetraedros están formados por triángulos equiláteros de 3,46 m de lado y 3,00 m de altura, los tetraedros tienen 2,83 m de altura. En este caso, la diferencia entre la altura del canto de esta celosía y la original (1,735 m) es de 1,095 m.

Todas las cargas puntuales de la estructura se han reordenado para este tipo de celosías y ahora tenemos 6 tipos de nudos:

Nudos interiores: 10,41 kN

Nudos perimetrales de la dimensión mayor: 7,26 kN

Nudos perimetrales de la dimensión menor 1: 8,29 kN

Nudos perimetrales de la dimensión menor 2: 11,53 kN

Nudos de esquina 1: 8,24 kN

Nudos de esquina 2: 5,3 kN

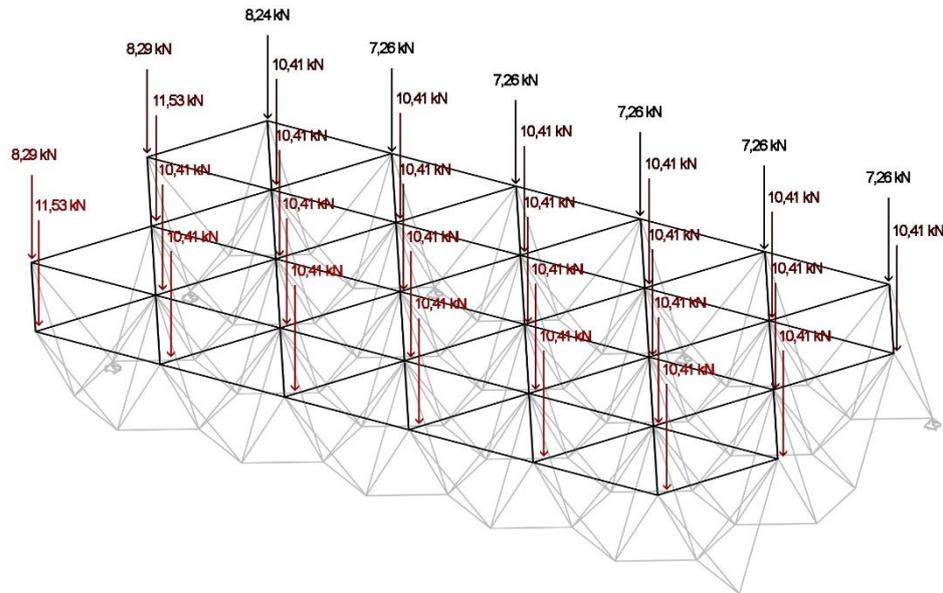


Figura 65. Reparto de cargas puntuales.

Dada la geometría de esta celosía, las barras de apoyo tienen dos posibilidades: la primera, unirlas con los nudos perimetrales del cordón inferior; la segunda, unirlas a los nudos interiores inmediatamente siguientes a los nudos perimetrales. Teniendo en cuenta esta cuestión, esta celosía tiene dos posibilidades y ambas se van a estudiar; primero ésta (**celosía_TR3_12G_1**, y su consiguiente reducción y ajuste del canto, y la **celosía_TR3_12G_2**, y su consiguiente reducción y ajuste del canto). Además, se ha añadido un apoyo en rótula más en la parte central de la estructura que cuenta con dos barras que se unen a la celosía; estas dos nuevas barras forman un grupo diferente "Apoyos 3". En esta celosía los apoyos están unidos en la segunda fila de tetraedros.

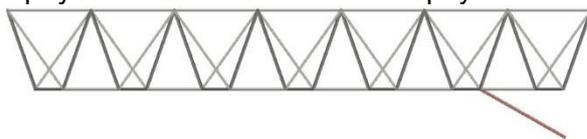


Figura 66. Apoyos (rojo) de la celosía_TR3_12G_1.

Nombre	Celosía_TR3_12G_1		
Número de grupos de barras	12	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1 10,68	PHC UNE Ic 100 4.0	4
	Apoyos 2 10,68	PHC UNE Ic 80 3.2	4
	Inclinadas 1 1816,5	PHC UNE Ic 70 6.3	322
	Inclinadas 2	PHC UNE Ic 60 4.0	203
	Inferiores 1	PHC UNE Ic 60 4.0	146
	Inferiores 2	PHC UNE Ic 50 2.6	97
	Superiores 1 840,78	PHC UNE Ic 50 2.6	141
	Superiores 2	PHC UNE Ic 50 4.0	102
	Laterales 1 117,64	PHC UNE Ic 50 3.2	12
	Laterales 2	PHC UNE Ic 40 2.6	11
	Laterales 3	PHC UNE Ic 100 10.0	11
	Apoyos 3 5,34	PHC UNE Ic 90 6.3	2
Acero	S275		
Peso total	26493,86 kg		

Tabla 32. Características y asignación de barras de la celosía_TR3_11G_1.

Celosía_TR3_12G_C-110cm_1

Ésta es la celosía que reduce y ajusta el canto de la **celosía_TR3_11G_1** al canto de la celosía original (1,735 m).

Nombre	Celosía_TR3_12G_C-110cm_1		
Número de grupos de barras	12	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 70 6.3	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 90 4.0	4
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 6.3	322
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 50 6.3	203
	Inferiores 1	PHC UNE lc 50 4.0	146
	Inferiores 2	PHC UNE lc 50 4.0	97
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 6.3	141
	Superiores 2	PHC UNE lc 50 6.3	102
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 3.2	12
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 2.6	11
	Laterales 3	PHC UNE lc 80 3.2	11
	Apoyos 3	PHC UNE lc 80 3.2	2
Acero	S275		
Peso total	18843,10 kg		

Tabla 33. Características y asignación de barras de la celosía_TR3_11G_C-110cm_1.

Celosía_TR3_12G_2

Dentro de la familia de las celosías **TR3**, ésta es en la que los apoyos están unidos en la primera fila de tetraedros.

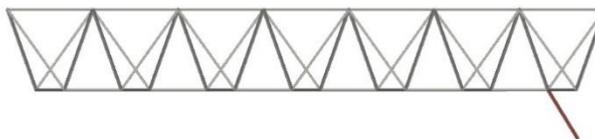


Figura 67. Apoyos (rojo) de la celosía_TR3_12G_2.

Nombre	Celosía_TR3_12G_2		
Número de grupos de barras	12	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 70 3.2	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 50 6.3	4
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 6.3	322
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 60 4.0	203
	Inferiores 1	PHC UNE lc 40 3.2	146
	Inferiores 2	PHC UNE lc 40 5.0	97
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 4.0	141
	Superiores 2	PHC UNE lc 60 3.2	102
	Laterales 1	PHC UNE lc 40 2.6	12
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 2.6	11
	Laterales 3	PHC UNE lc 60 4.0	11
	Apoyos 3	PHC UNE lc 80 4.0	2
Acero	S275		
Peso total	20779,15 kg		

Tabla 34. Características y asignación de barras de la celosía_TR3_11G_2.

Celosía_TR3_12G_C-110cm_2

Ésta es la celosía que reduce y ajusta el canto de la **celosía_TR3_11G_2** al canto de la celosía original (1,735 m).

Nombre	Celosía_TR3_12G_C-110cm_2		
Número de grupos de barras	12	Tipo de sección	Número de barras
	Apoyos 1	PHC UNE lc 60 5.0	4
	Apoyos 2	PHC UNE lc 80 6.3	4
	Inclinadas 1	PHC UNE lc 50 6.3	322
	Inclinadas 2	PHC UNE lc 50 4.0	203
	Inferiores 1	PHC UNE lc 40 3.2	146
	Inferiores 2	PHC UNE lc 40 3.2	97
	Superiores 1	PHC UNE lc 50 6.3	141
	Superiores 2	PHC UNE lc 60 6.3	102
	Laterales 1	PGC UNE lc 40 3.2	12
	Laterales 2	PHC UNE lc 40 2.6	11
	Laterales 3	PHC UNE lc 40 4.2	11
	Apoyos 3	PHC UNE lc 60 4.0	2
Acero	S275		
Peso total	16799,33 kg		

Tabla 35. Características y asignación de barras de la celosía_TR3_11G_C-110cm_2.

Nombre	Peso total (kg)	Diferencia de peso (kg)	Porcentaje de reducción de peso
Celosía_TR1_11G	20682	4882,39	-23,61%
Celosía_TR1_11G_C-166cm	15799		
Celosía_TR2_11G	19754	3913,12	-19,81%
Celosía_TR2_11G_C-136cm	15841		
Celosía_TR3_12G_1	26494	7650,76	-28,88%
Celosía_TR3_12G_C-110cm_1	18843		
Celosía_TR3_12G_2	20779	3979,82	-19,15%
Celosía_TR3_12G_C-110cm_2	16799		

Tabla 36. Pesos y comparación de las celosías formada a partir de tetraedros.

A simple vista la reducción de peso que se ha producido disminuyendo el canto de las celosías al canto original (1,735 m) es muy significativo en todas las celosías, llegando a casi un 30% en la familia TR2.

El porcentaje de reducción de peso relaciona la diferencia de peso (kg) con el peso de las celosías donde no se ha modificado el canto, propios de los tetraedros regulares.

Nombre	Longitud total de barras (m)	Diferencia de longitud (m)	Porcentaje de reducción de longitud
Celosía_TR1_11G	2905,28	453,6	-15,61%
Celosía_TR1_11G_C-166cm	2451,68		
Celosía_TR2_11G	2891,58	414	-13,89%
Celosía_TR2_11G_C-136cm	2477,58		
Celosía_TR3_12G_1	2801,62	430,5	-15,37%
Celosía_TR3_12G_C-110cm_1	2371,12		
Celosía_TR3_12G_2	2762,42	430,5	-15,58%
Celosía_TR3_12G_C-110cm_2	2331,92		

Tabla 37. Longitud y comparación de las celosías formada a partir de tetraedros.

El porcentaje de reducción de longitud relaciona la diferencia de longitud (m) con la longitud de las celosías donde no se ha modificado el canto, propios de los tetraedros regulares.

Es muy interesante observar la reducción de la longitud total de las barras de la estructura que se ha llevado a cabo. Todas las reducciones oscilan entre el 13,9% y 15,6%, valores bastante similares. También podemos observar que a medida que hay un número mayor de tetraedros la longitud total va disminuyendo. Hay que apuntar que realmente las únicas barras que reducen su longitud son aquellas que otorgan canto a la celosías, es decir, las barras inclinadas.

Nombre	Porcentaje de reducción de peso	Porcentaje de reducción de longitud	Diferencia de porcentajes
Celosía_TR1_11G	-23,61%	-15,61%	8%
Celosía_TR1_11G_C-166cm			
Celosía_TR2_11G	-19,81%	-13,89%	5,92%
Celosía_TR2_11G_C-136cm			
Celosía_TR3_12G_1	-28,88%	-15,37%	13,51%
Celosía_TR3_12G_C-110cm_1			
Celosía_TR3_12G_2	-19,15%	-15,58%	3,57%
Celosía_TR3_12G_C-110cm_2			

Tabla 38. Comparación entre la reducción de longitud y la reducción de peso de las celosías formada a partir de tetraedros.

Con esta última tabla de la familia de las celosías formadas a partir de tetraedros vemos una comparación entre el porcentaje de reducción de peso y el porcentaje de reducción de longitud. Dado que todas las diferencias de porcentajes son positivas, podemos sacar la siguiente conclusión:

-Dado que, aunque con un porcentaje menor al 4%, las diferencias de porcentajes se acercan o son mayores que el 10%, la reducción del canto ha mejorado los resultados no solo reduciendo el peso que se pierde disminuyendo la longitud de las barras, si no que también la geometría de las nuevas celosías es más acertada y está más optimizada que las celosías donde el canto se lo otorga el tetraedro regular. La

reducción del canto de la celosía ha sido exitosa, y por tanto, un buen procedimiento en esta parte del estudio aunque no se haya conseguido una celosía con un peso similar a los coseguidos anteriormente.

7.4.1.6 Resumen de la fase inicial.

Como resumen de la fase inicial se va a mostrar una tabla con todos los pesos de cada una de las celosías agrupadas por “familias”; se marcarán en negrita las mejores celosías de cada familia y en rojo la mejor celosía hasta ahora.

Familia y celosía		Peso (kg)
Celosía Original		
	Celosía_ORG_5G	12960
	Celosía_ORG_8G	13306
	Celosía_ORG_10G	12266
Celosía con los semioctaedros de la mitad de dimensión		
	Celosía_/2_6G	17240
	Celosía_/2_10G	15759
	Celosía_/2_10G_C+86cm	19223
Celosía orientada inversamente		
	Celosía_INV_5G_1	12702
	Celosía_INV_5G_2	14753
	Celosía_INV_5G_3	13882
	Celosía_INV_5G_4	12482
	Celosía_INV_9G_1	12601
	Celosía_INV_9G_2	14509
	Celosía_INV_9G_3	13248
	Celosía_INV_9G_4	12455
Modificaciones de la celosía_ORG_10G		
	Celosía_ORG_10G_2	10134
	Celosía_ORG_12G_+DiagSs	12725
	Celosía_ORG_11G_+Diags	12478
	Celosía_ORG_11G_+Diags_2	10691
	Celosía_ORG_11G_+Diags_3	11443
	Celosía_ORG_11G_+Diags_4	10234
	Celosía_ORG_13G_+DiagSs	10426
	Celosía_ORG_13G_+DiagSs_2	10939
Celosía a partir de tetraedros regulares		
	Celosía_TR1_11G	20682
	Celosía_TR1_11G_C-166cm	15799
	Celosía_TR2_11G	19754
	Celosía_TR2_11G_C-136cm	15841
	Celosía_TR3_12G_1	26494
	Celosía_TR3_12G_C-110cm_1	18843
	Celosía_TR3_12G_2	20779
	Celosía_TR3_12G_C-110cm_2	16799

Tabla 39. Resumen de la Fase Inicial.

Prácticamente en todas las familias, a medida que se aumenta el número de grupos, el resultado mejora; esto se debe a que la aplicación VTAM puede aplicar tipos de secciones a grupos de barras más reducidos, permitiendo diferenciar mejor las barras más solicitadas de las menos solicitadas.

Las geometrías que han obtenido mejores resultados son aquellas que más se asemejan a la geometría original, formada por semioctaedros orientados con la cima hacia abajo. Tanto las celosías formadas a partir de tetraedros como las formadas a partir de semioctaedros de la mitad de dimensión, aumentan hasta 5500 kg con respecto a la celosía más ligera, un 30% de las celosías y un 50% de aquella más ligera.

Centrándonos en las celosías formadas a partir de tetraedros, todas mejoran una vez se le ha ajustado el canto al canto de la celosía original (1,732m), reduciendo todas el peso entre un 20% y un 30%

Aquella celosía que ha obtenido el mejor resultado (10134 kg; Celosía_ORG_10G_2) solo varía con respecto a la celosía original (12266 kg; Celosía_ORG_10G) en el tipo de soportes reduciendo más de 2000 kg su peso, un 17%.

7.5. Segunda Fase, variación de cantos.

En esta segunda fase de la optimización vamos a seleccionar las mejores celosías de cada una de las familias para refinar aún más el proceso, variando su canto. La variación del canto va a ser exactamente igual que todas las llevadas a cabo antes, donde realmente las únicas barras que se modifican son aquellas que unen el cordón superior con el inferior, las barras inclinadas.

Las diferencias de canto van a seguir una serie de ± 20 cm, hasta ± 40 cm, de esta manera obtendremos 4 celosías más de cada una de las ya “mejores” celosías anteriores. Una vez se hayan calculado, se elegirá la mejor de todas ellas y volveremos a aumentar y disminuir su canto en una serie de ± 10 cm, buscando acercarnos más a la solución final. Si en alguna de esas nuevas variaciones encontramos una mejoría, también las aplicaremos a las otras 3 siguientes mejores celosías, intentando mejorarlas. Una vez hayamos encontrado la mejor, volveremos a aumentar y disminuir el canto de la mejor celosía en una serie de ± 5 cm.

El método de variar los cantos de las celosías es muy interesante porque permite jugar con la dualidad inercia-longitud. Cuando aumentamos el canto de una celosía, por ejemplo, 40 cm, estamos 40 cm más de inercia de la celosía, por lo que *a priori* las barras necesitarán una sección menor para resistir los esfuerzos, necesitarán menos material; por otro lado, al ser las barras más largas esos cm de más también suman material a la estructura. También ocurre lo contrario si disminuimos el canto de la celosía, la inercia que se pierde necesitando barras más gruesas se contrapone a la menor longitud, y menor masa, de las barras.

En este apartado, dado que todas las celosías ya se han presentado y estudiado anteriormente, solo se mostrará el peso final de cada una de ellas. Como anteriormente, se resaltará en negrita el mejor resultado de cada familia y en rojo, el mejor resultado global. Además, dado que en la **celosía_ORG_10G** los resultados obtenidos disminuyendo 20cm el canto y disminuyendo 40cm el canto se van reduciendo, se ha calculado también las celosías reduciendo el canto 50cm y 60cm respectivamente, buscando una mejor solución que quizá escape de la horquilla ± 40 cm propuesta inicialmente.



Figura 68. Celosía tipo reduciendo su canto 40cm.



Figura 69. Celosía tipo reduciendo su canto 20cm



Figura 70. Celosía tipo aumentando su canto 20cm.



Figura 71. Celosía tipo aumentando su canto 40cm.

Nombre	Nº grupos	Diferencias	Peso (kg)
Celosía_ORG_10G	10	+40cm	12966
		+20cm	12926
		0cm	12266
		-20cm	12197
		-40cm	11852
		-50cm	11407
		-60cm	11572
Celosía_/2_10G	10	+40cm	15872
		+20cm	14720
		0cm	15759
		-20cm	22395
		-40cm	55584
Celosía_INV_9G_1	9	+40cm	12415
		+20cm	12361
		0cm	12601
		-20cm	12371
		-40cm	13928
Celosía_INV_9G_4	9	+40cm	12253
		+20cm	12208
		0cm	12455
		-20cm	12970
		-40cm	14031
Celosía_ORG_10G_2	10	+40cm	11248
		+20cm	10354
		+10cm	10243
		0cm	10354
		-20cm	10668
		-40cm	11460
Celosía_ORG_11G_+Diags_2	11	+40cm	11078
		+20cm	10779
		0cm	10691
		-20cm	11151
		-40cm	12107
Celosía_ORG_11G_+Diags_4	12	+40cm	10501
		+20cm	10034
		0cm	10234
		-20cm	10975
		-40cm	11613
Celosía_ORG_13G_+DiagSs	12	+40cm	10277
		+20cm	10160
		0cm	10426
		-20cm	11175
		-40cm	11728
Celosía_TR1_11G_C-166cm	11	+40cm	16473
		+20cm	16091
		0cm	15799
		-20cm	16407
		-40cm	16656

Tabla 40. Resumen de los resultado de la Segunda Fase del proceso de optimización.

Nombre	Canto	Peso (kg)
Celosía_ORG_11G_+Diags_2	+0cm (1,735m)	10691
Celosía_ORG_13G_+DiagSs_C+20cm	+20cm (1,935m)	10160
Celosía_ORG_10G_2	+0cm (1,735m)	10134
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+20cm	+20cm (1,935m)	10034

Tabla 41. Resumen de los mejores 4 resultados.

Como hemos comentado antes primero se va a calcular la serie de +-10 cm en el mejor resultado y a continuación en las demás celosías.

Nombre	Canto	Peso (kg)
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+10cm	+10cm (1,835m)	9920
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+20cm	+20cm (1,935m)	10034
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+30cm	+30cm (2,035m)	10435

Tabla 42. Variación del canto según la serie +-10cm de la Celosía_ORG_11G_+Diags_4.

Una vez hemos visto que la mejor solución es el aumento de 10cm en el canto, se procede a calcularlo también en las otras tres celosías.

Nombre	Canto	Peso (kg)
Celosía_ORG_11G_+Diags_2_C+10cm	+10cm (1,835m)	10799
Celosía_ORG_11G_+Diags_2	+0cm (1,735m)	10691
Celosía_ORG_13G_+DiagSs_C+10cm	+10cm (1,835m)	10277
Celosía_ORG_13G_+DiagSs_C+20cm	+20cm (1,935m)	10160
Celosía_ORG_10G_2_C+10cm	+10cm (1,835m)	10243
Celosía_ORG_10G_2	+0cm (1,735m)	10134
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+20cm	+20cm (1,935m)	10034
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+10cm	+10cm (1,835m)	9920

Tabla 43. Variación del canto según la serie +-10cm de las 4 mejores celosías.

Calcurameos también las variaciones de la serie +-5cm de la celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+10cm a continuación y veremos una comparativa con todos los resultado de la celosía_ORG_11G_+Diags_4.

Nombre	Canto	Peso (kg)
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C-40cm	-40cm (1,335m)	11613
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C-20cm	-20cm (1,535m)	10975
Celosía_ORG_11G_+Diags_4	+0cm (1,735m)	10234
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+5cm	+5cm (1,785m)	10158
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+10cm	+10cm (1,835m)	9920
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+15cm	+15cm (1,885m)	9977
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+20cm	+20cm (1,935m)	10034
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+30cm	+30cm (2,035m)	10436
Celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+40cm	+40cm (2,135m)	10500

Tabla 44. Todas las celosías de la serie Celosía_ORG_11G_+Diags_4.

En la primera tabla (Tabla 44) podemos observar que 7/9 celosías han mejorado sus resultados aplicando el método de variación de cantos, por lo que podemos concluir que ha sido exitoso. De estas 7 que han mejorado, 4 de ellas (44% del total) han conseguido su mejor resultado cuando se les ha aumentado en 20cm el canto (1,932m); es decir, el aumento de inercia que se le otorga a celosía aumentando el canto en 20cm, compensa el aumento de peso producido por el alargamiento de las barras.

7.6. Fase Final.

En esta última fase del proceso de optimización vamos a seguir modificando las celosías pero no en su geometría, si no en el tipo de acero y en el tipo de sección. Además de la **celosía_ORG_11G_+Diags_4_C+10cm**, que ha obtenido el mejor resultado, también analizaremos la **celosía_ORG_13G_+DiagSs_C+20cm**, dado que es una celosía similar y ha obtenido un resultado no muy alejado.

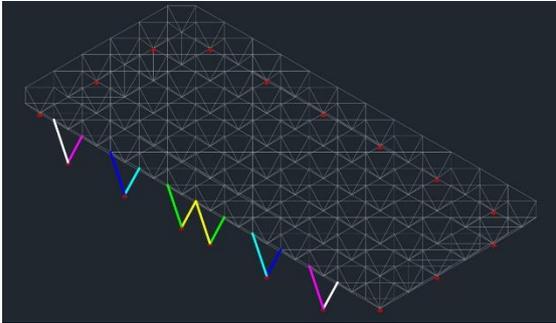


Figura 72. Grupos de barras que contienen las barras de apoyo.

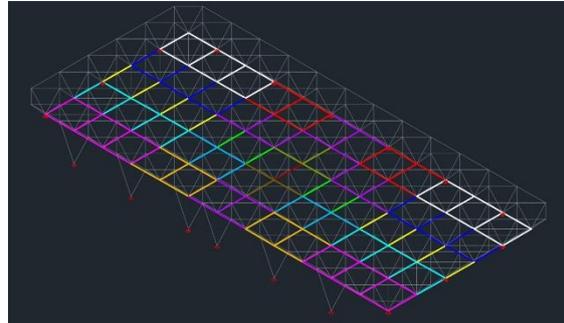


Figura 73. Grupos de barras que contienen las barras inferiores.

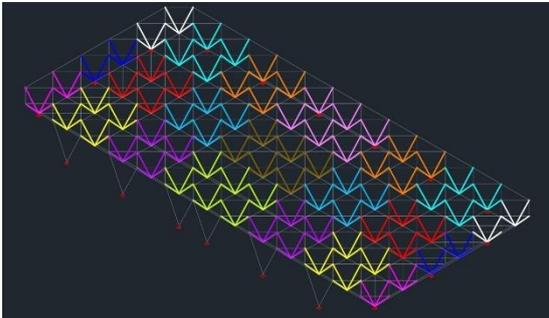


Figura 74. Grupos de barras que contienen las barras inclinadas.

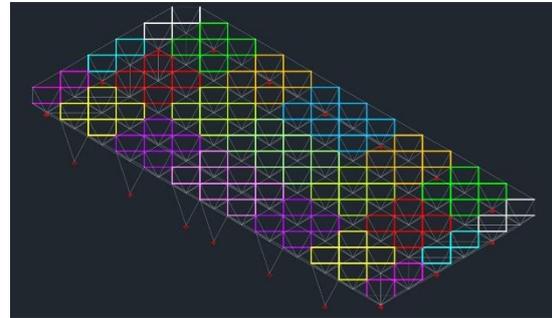


Figura 75. Grupos de barras que contienen las barras superiores.

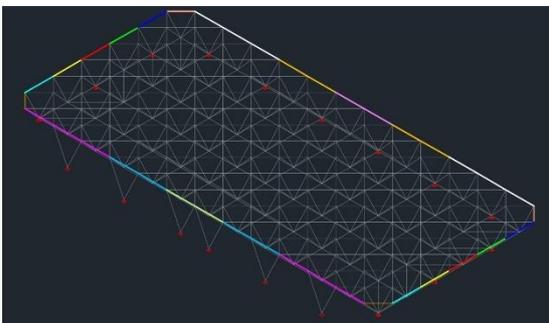


Figura 76. Grupos de barras que contienen las barras laterales.

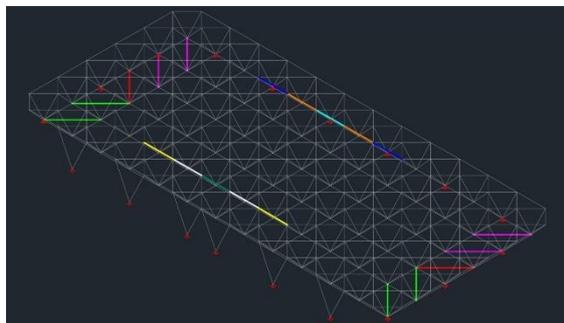


Figura 77. Grupos de barras que contienen las barras diagonales, tanto del cordón superior como del inferior.

Ambas celosías van a aumentar el número de grupos hasta 66 grupos en cada caso.

De esos 66 grupos 6 contienen a las barras de apoyo, 11 contienen a las barras superiores, 11 contienen a las barras inclinadas, 12 contienen a las barras inferiores, 12 contienen a las barras laterales, 6 contienen a las barras diagonales del cordón inferior,

y en el caso de la **celosía_ORG_13G_+DiagSs_C+20cm**, 6 grupos contienen a las barras diagonales del cordón superior.

En esta comparativa también va a entrar el factor económico. Además de calcular ambas celosías con acero S235 y S355 y con perfiles circular tubular PH0 UNE Ic, también calcularemos el precio de cada una ellas eligiendo el de precio más bajo como, indudablemente, la celosía más optimizada de todo el estudio.

Los precios del acero se han obtenido de la web del IVE (Instituto Valenciano de la Edificación) tomados a Septiembre de 2022 en la provincia de Valencia. Dentro de esta web se pueden elegir diferentes opciones pero el precio de las celosías se van a calcular a partir de acero laminado en caliente, galvanizado y montado por soldadura.

EERA.1S\$ | 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 type="radio"/> imprimación	<input checked="" type="radio"/> soldado
b <input type="radio"/> S 275	<input type="radio"/> J0	<input type="radio"/> conformado en frío	<input type="radio"/> serie L, LD, T, red, cua, rect, chapa	<input checked="" type="radio"/> galvanizado	<input type="radio"/> atornillado
c <input type="radio"/> S 355	<input type="radio"/> J2		<input checked="" type="radio"/> huecos: red, cua, rect		
d			<input type="radio"/> serie L, U, C, Z, omega, tb		

FIE BDC

EERA.1aaacba | kg | Suministro y montaje acero S 235 JRH soldado e/celosías, cerchas 5,46 €

Suministro de acero S 235JR, en perfil hueco laminado en caliente serie redondo, cuadrado, rectangular, acabado galvanizado, con montaje soldado 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.1aaacba	kg	Suministro y montaje acero S 235 JRH soldado	4,75 €	1,150	5,46 €

Figura 78. Precio unitario del acero S235 según la web del IVE.

EERA.1S\$ | 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 type="radio"/> JR	<input checked="" type="radio"/> laminado en caliente	<input type="radio"/> serie IPN, IPE, HEB, HEA, HEM, UPN	<input type="radio"/> imprimación	<input checked="" type="radio"/> soldado
b <input checked="" type="radio"/> S 275	<input type="radio"/> J0	<input type="radio"/> conformado en frío	<input type="radio"/> serie L, LD, T, red, cua, rect, chapa	<input checked="" type="radio"/> galvanizado	<input type="radio"/> atornillado
c <input type="radio"/> S 355	<input checked="" type="radio"/> J2		<input checked="" type="radio"/> huecos: red, cua, rect		
d			<input type="radio"/> serie L, U, C, Z, omega, tb		

FIE BDC

EERA.1bcacba | kg | Suministro y montaje acero S 275 J2H soldado e/celosías, cerchas 6,59 €

Suministro de acero S 275J2, en perfil hueco laminado en caliente serie redondo, cuadrado, rectangular, acabado galvanizado, con montaje soldado 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.1bcacba	kg	Suministro y montaje acero S 275 J2H soldado	5,73 €	1,150	6,59 €

Figura 79. Precio unitario del acero S275 según la web del IVE.

EERA.15 | 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 type="radio"/> J0	<input checked="" type="radio"/> laminado en caliente	<input type="radio"/> serie IPN, IPE, HEB, HEA, HEM, UPN	<input type="radio"/> imprimación	<input checked="" type="radio"/> soldado
b <input type="radio"/> S 275	<input type="radio"/> J0	<input type="radio"/> conformado en frío	<input type="radio"/> serie L, LD, T, red, cua, rect, chapa	<input checked="" type="radio"/> galvanizado	<input type="radio"/> atornillado
c <input checked="" type="radio"/> S 355	<input checked="" type="radio"/> J2		<input checked="" type="radio"/> huecos: red, cua, rect		
d			<input type="radio"/> serie L, U, C, Z, omega, tb		

FIE BDC

EERA.1ccacba | kg | Suministro y montaje acero S 355 J2H soldado e/celosías, cerchas

7,37 €

Suministro de acero S 355J2, en perfil hueco laminado en caliente serie redondo, cuadrado, rectangular, acabado galvanizado, con montaje soldado 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.1ccacba	kg	Suministro y montaje acero S 355 J2H soldado	6,41 €	1,150	7,37 €

Figura 80. Precio unitario del acero S355 según la web del IVE.

Celosía	Tipo de perfil hueco	Tipo de Acero	Peso (kg)	Precio unitario (€/kg)	Precio (€)
ORG_60G_+Diags_4_C+10cm	Cuadrado	S235	9288	5,46	50713
		S275	9258	6,59	61010
		S355	9219	7,37	67044
	Circular	S235	10226	5,46	55834
		S275	10706	6,59	70553
		S355	10515	7,37	77496
ORG_66G_+DiagSs_C+20cm	Cuadrado	S235	9525	5,46	52007
		S275	9301	6,59	61294
		S355	9467	7,37	69772
	Circular	S235	11387	5,46	62173
		S275	11656	6,59	76813
		S355	10865	7,37	80075

Tabla 45. Costes totales y finales de cada celosía.

Como podemos observar en la *Tabla 45*, las 3 celosías que han obtenido un peso menor son derivadas de la **celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm**, es decir, son celosías formadas a partir de semioctaedros, están divididas en 60 grupos de barras diferentes, cuentan con diagonales en el cordón inferior, con 6 soportes en V y un canto 10cm superior (1,832m) al canto de la celosía original (1,732m). Aunque el peso es 69 kg mayor que la configuración más ligera, la versión calculada en acero S235 (50713 €) es económicamente mucho más viable que la configuración más ligera, en acero S355 (67044 €); por lo que a partir de ahora, tomaremos la versión de acero S235 como la solución final.

Otros de los comentarios que podemos hacer respecto de estos últimos cálculos es que ambas celosías tienen un canto superior a la celosía original, 10cm y 20cm respectivamente, lo que supone que la longitud total de las barras de la celosía completa es mayor que la original.

Es llamativo que en todos los cálculos realizados con perfiles tubulares, la configuración más pesada sea la realizada con acero S275, seguido de las realizadas con acero S235 y S355. Lo lógico sería pensar que a medida que aumentamos la resistencia del acero, éste contribuye a que la sección de las barras se reduzca. Esto último es lo que sucede en el caso de la **celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm**, donde a medida que el acero es más resistente, el peso de la celosía es menor, aunque cabe decir, que la diferencia es muy pequeña.

Para estudiar de forma más detenida la configuración que hemos escogido como solución final, **celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm** en acero S235, nos vamos a hacer valer de una herramienta de visualización que incorpora Architrave. A partir de una gama de colores podemos observar cual es el coeficiente de agotamiento que afecta a cada barra; siendo 1,00 cuando la barra se agota por resistencia.

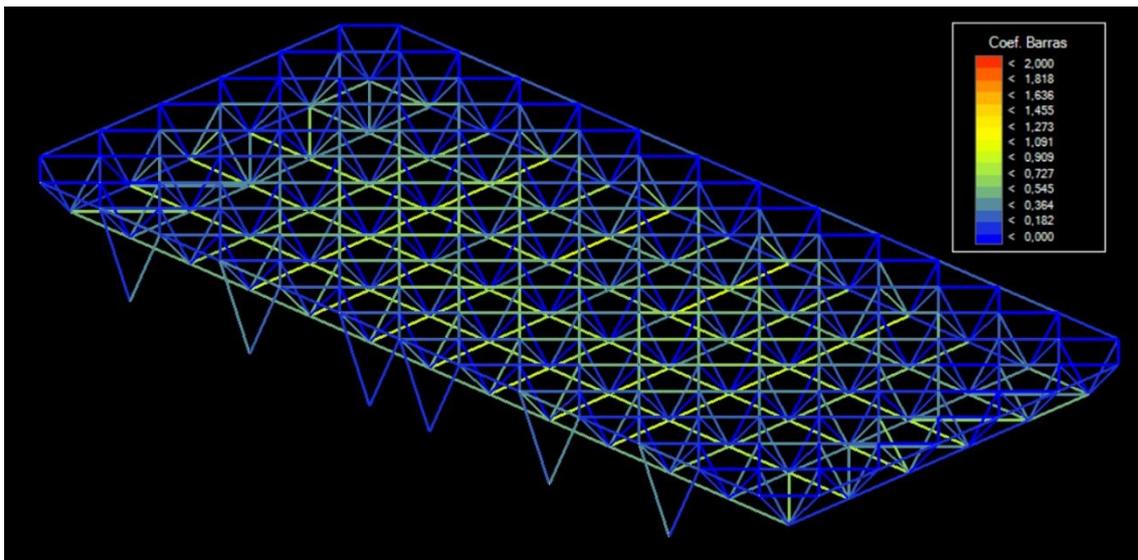


Figura 81. Coeficientes de agotamiento de la celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S235.

Como podemos observar en la *Figura 81*, las barras más cercanas al color verde, color que tiene un coeficiente de agotamiento de 1,00, son aquellas situadas en la capa inferior de la malla, aquellas que están traccionadas. También se pueden observar una gran cantidad de barras con coeficientes cercanos a 0,00; todas estas barras prácticamente no están solicitadas. Cabe apuntar que de todas esas barras dibujadas en color azul, aquellas que se representan en la *Figura 82* tiene una sección PHC UNE Ic 40 2.6, es decir, la mínima sección posible.

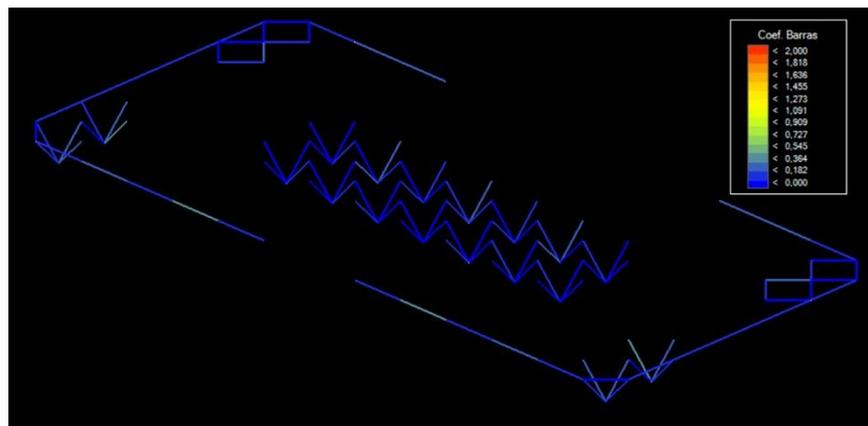


Figura 82. Barras con sección PHC UNE Ic 40 2.6 de la celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S23.

A continuación se muestran en las siguientes 3 figuras los coeficientes de agotamiento diferenciados por tipos de barras, de una forma más clara que en la *Figura 81*.

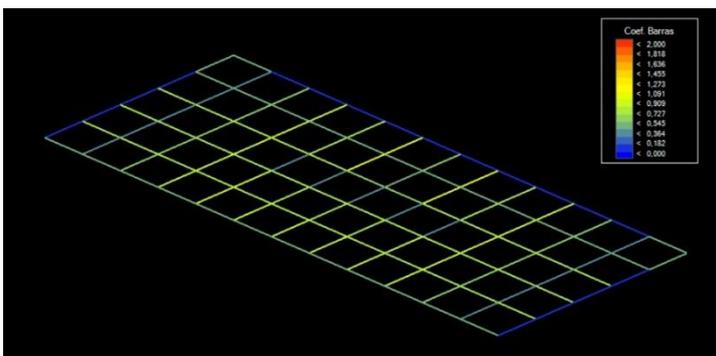


Figura 83. Coeficientes de agotamiento de la celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S23, cordón inferior.

Viendo la *Figura 83*, *Figura 84* y la *Figura 85*, queda claro que las barras más solicitadas son la mayoría de las barras de la capa inferior (sometidas a tracción) y una buena parte de las ubicadas en la zona central de la capa superior (sometidas a compresión).

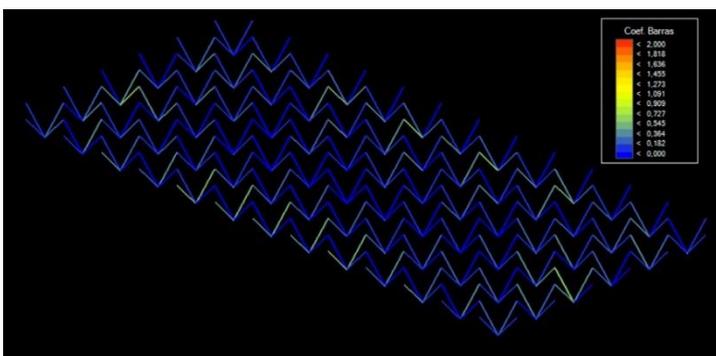


Figura 84. Ilustración 28. Coeficientes de agotamiento de la celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S23, barras inclinadas.

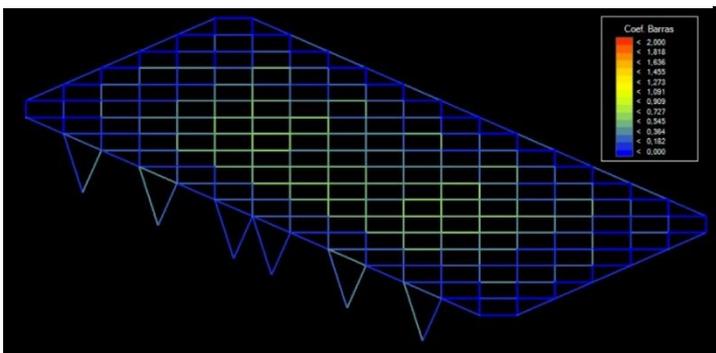


Figura 85. Coeficientes de agotamiento de la celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S23, cordón superior.

8. COMPARACIÓN ESTRUCTURA ORIGINAL CON ESTRUCTURA OPTIMIZADA

En este último apartado del estudio vamos a comparar la estructura original en madera con la solución que hemos aceptado como definitiva: **celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S235**.

Diferencias volumétricas

Se van a exponer 2 vistas tanto de la celosía original como de la definitiva donde se puede observar el cambio volumétrico que se ha conseguido mediante la optimización. Cabe destacar que las barras huecas de madera tienen una sección 12,5 cm x 12,5 cm, y como máximo, las barras de acero tienen una sección 80 4.0 (mm).



Figura 86. Volumetría de la celosía original de madera.

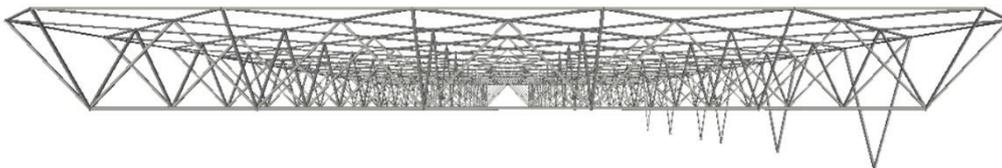


Figura 87. Volumetría de la celosía_ celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S235.

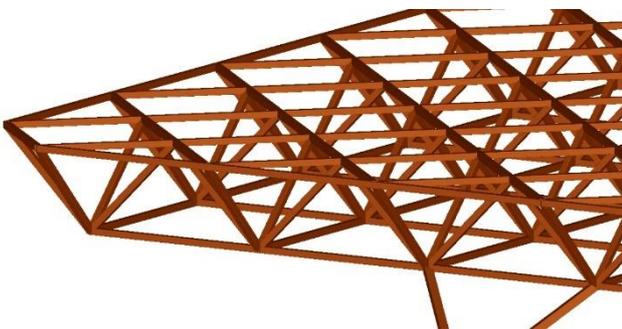


Figura 88. Volumetría de celosía original de madera.

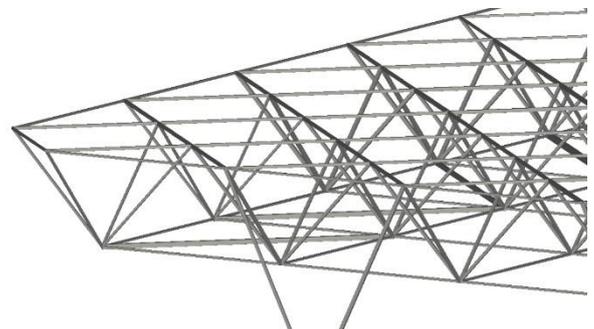


Figura 89. Volumetría de la celosía_ celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S235.

Diferencias económicas

En realidad, no tendría ningún sentido comparar la celosía original de madera con la solución adoptada desde el punto de vista económico. Por otra parte, podríamos pensar en calcular el peso de una celosía con la misma geometría que la original pero con barras de acero de sección tubular cuadrada con unas dimensiones similares, para a

partir del peso calcular su precio. Esta última idea tampoco tendría mucho sentido, ya que obviamente esa solución estaría sobredimensionada de una forma ridícula.

Además de calcular las dos opciones anteriores (meramente informativas), se va a intentar llegar a una comparación sensata, calculando la celosía más ligera de acero S275 (acero más común) utilizando solo 2 secciones diferentes: una sección para las barras de los soportes y otra sección para las demás barras, tal y como se hace en la celosía original. Aunque tampoco es una comparación que aporte información realmente interesante, asignar solo dos tipos de secciones a la celosía es la única manera de obtener una celosía de acero no optimizada que podamos comparar con nuestra solución, y que guarde cierta relación con la celosía original.

Para calcular el precio de las celosías, nos haremos valer de la base de datos del Instituto Valenciano de la Edificación (IVE). Para las celosías haremos caso a la *Figura 78* y la *Figura 79*, ya utilizadas anteriormente; y para la celosía de madera adpotaremos el precio de la *Figura 90*.

EERM.4\$ | m³ | Viga celosía de madera

TIPO MADERA	CLASE RESISTENTE	CLASE DE USO	PREFABRICACIÓN
a <input type="radio"/> aserrada	<input type="radio"/> C18	<input type="radio"/> Clase 1 (int, seco)	<input type="radio"/> corte y montaje en obra
b <input checked="" type="radio"/> laminada	<input type="radio"/> C20	<input type="radio"/> Clase 2 (int, posibl condensación)	<input checked="" type="radio"/> corte y mecanizado en taller
c <input type="radio"/>	<input type="radio"/> C22	<input type="radio"/> Clase 3.1 (ext, humidif breve)	
d <input type="radio"/>	<input type="radio"/> C24	<input checked="" type="radio"/> Clase 3.2 (ext, humidif prolongada)	
e <input type="radio"/>	<input type="radio"/> C30	<input type="radio"/> Clase 4 (contacto con suelo/agua dulce)	
f <input type="radio"/>	<input type="radio"/> C35		
g <input type="radio"/>	<input type="radio"/> C40		
h <input type="radio"/>	<input type="radio"/> GL24		
i <input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/> GL28		
j <input type="radio"/>	<input type="radio"/> GL32		
k <input type="radio"/>	<input type="radio"/> GL36		

FIE BDC

EERM.4bidb | m³ | Celosía madera laminada GL28 CU3.2 NP3 CNC 2.096,22 €

Estructura triangulada o viga en celosía, formada por barras rectas de madera laminada de grado de mecanización medio mediante CNC (corte per control numérico) o ensamblado en taller, de clase resistente GL28 para Clase de uso 3.2 (exterior expuesto a la intemperie, condiciones de humidificación prolongada) según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos correspondiente con el nivel de penetración NP3 (mínimo de 6 mm en la madera de albura y en las caras laterales) según UNE-EN 35-1, y clasificación E1 (bajo contenido en formaldehído) según UNE-EN 14080, con certificación de 'Sistema de diligencia Debida', PEFC o FSC, incluso suministro, ayudas de albañilería en montaje y preparación de uniones, montaje de la pieza, medios de elevación carga y descarga, incluso ensambles y refuerzos de nudos, fijación con herrajes y tornillería de acero galvanizado y limpieza del lugar de trabajo.

Código	Unidad	Resumen	Precio unitario	Rendimiento	Importe
M00C8a	h	Oficial 1* carpintería	21,03 €	7,000	147,21 €
M00C10a	h	Ayudante carpintería	16,49 €	4,000	65,96 €
M00A8a	h	Oficial 1* construcción	22,26 €	1,000	22,26 €
M00A12a	h	Peón ordinario construcción	18,68 €	0,500	9,34 €
PEML2bda	m3	Madera laminada premecanizada CNC GL28 CU3.2 NP3 nacional	1.454,00 €	1,100	1.610,40 €
PBUC6a	kg	Puntas a p/const 17x70 caja 3kg	2,48 €	0,200	0,50 €
PBUT31a	cu	Pequeños elementos fijación madera	38,87 €	1,200	46,64 €
PFTZ21a	u	Herrajes estructura madera	21,83 €	7,000	152,81 €
%	%	Costes directos complementarios	2.055,12 €	0,020	41,10 €

Figura 90. Precio unitario del acero S235 según la web del IVE.

Para el cálculo del precio de la celosía de madera, se ha calculado el volumen de la madera de cada barra, no incluyendo en el cálculo el hueco que hay en cada barra. Como simplificación, se ha aumentado en un 15% el volumen para tener así en cuenta los tacos de madera de alta densidad donde se roscan las varillas de acero.

Barras normales $114 \text{ cm}^2 \times 245 \text{ cm} = 27930 \text{ cm}^3 \times 624 = 17428320 \text{ cm}^3$

Barras largas $114 \text{ cm}^2 \times 346,5 \text{ cm} = 39501 \text{ cm}^3 \times 171 = 6754671 \text{ cm}^3$

Barras soportes $144 \text{ cm}^2 \times 346,5 \text{ cm} = 49896 \text{ cm}^3 \times 8 = 399168 \text{ cm}^3$

$17428320 \text{ cm}^3 + 6754671 \text{ cm}^3 + 399168 \text{ cm}^3 = 24582159 \text{ cm}^3 \times 1,15 = 28269482,82 \text{ cm}^3$

$28269482,82 = \mathbf{28,27 \text{ m}^3}$

Celosía	Tipo de acero	Secciones		Peso acero (kg)	Volumen madera (m ³)	Precio acero (kg/€)	Precio madera (m ³ /€)	Precio final (€)
Original (Madera)	-	Soportes	150mm x 150mm	-	28,27	-	2096,22	59260
		Celosía	125mm x 125mm					
Original (Acero)	S275	Soportes	PHC UNE lc 80 8.0	20290	-	6,59	-	133711
		Celosía	PHC UNE lc 70 6.3					
Solución final	S235	Varias		9288	-	5,46	-	50713

Tabla 46. Comparación final entre la celosía original de madera, la celosía original de acero y la solución final.

Aunque el precio de la celosía de madera no es más barato que la solución más optimizada que hemos conseguido encontrar, muestra de que los proyectistas eligieron una buena solución debido al escaso presupuesto con el que contaban.

Calculando la hipotética celosía no optimizada de acero, la diferencia de precio es de 82998 € con respecto a la solución adoptada, una reducción de 62% del coste.

9. CONCLUSIONES

Este trabajo de final de grado se realiza un proceso de optimización de una cubierta de grandes luces a partir de mallas espacial de acero, en este caso la cubierta de un centro deportivo de la Universidad de A Coruña.

La celosía original estaba formada a partir de un módulo de semioctaedro repetido 78 veces en toda la dimensión de la cubierta. Durante todo el proceso se han ido introduciendo estructuras creadas a partir de sólidos diferentes como tetraedros, semioctaedros de dimensiones reducidas y semioctaedros orientados de forma inversa. Además, se han ido modificando todas esas celosías buscando reducir el peso total de la estructura, por ende, su coste.

Una de las claves de este proceso ha sido la forma de agrupar las barras de cada celosía, donde hemos visto que, a mayor número de grupos, siempre se producía una reducción del peso final. Aumentar el número de grupos forzaba a que las posibilidades de secciones dentro de la misma estructura fueran mayores y por consiguiente que el tiempo de cálculo aumentara. Agrupar de forma correcta y consecuente las barras significa que todas las barras del mismo grupo están solicitadas de una forma similar, ya que de lo contrario alguna barra podría “arrastrar” a las demás, aumentando innecesariamente la sección de las otras.

En cuanto al proceso, ha sido interesante ir probando diferentes configuraciones e ir viendo como con pequeños ajustes se pueden modificar en gran medida los resultados. Es cierto que no todas las configuraciones han servido para avanzar en el trabajo, ya que algunas obtenían resultados muy alejados de lo que buscábamos; pero eso también es parte de los procesos prueba-error. Los procesos como éste, prueba-error, permiten cambiar la perspectiva del problema a medida que avanza la investigación, desechando ideas que al principio parecían fijas y adoptando nuevos puntos de vista que en un principio no se habían considerado a medida que se van obteniendo los resultados de las pruebas. Ha sido también interesante realizar los cálculos con los distintos tipos de acero, viendo que depende del que escojamos, la estructura puede mejorar considerablemente.

También el uso y combinación de los diferentes programas utilizados en el trabajo ha permitido seguir un proceso interno de cada una de las configuraciones (modelado en Autocad, asignación de materiales y secciones, cálculo en Architrave, optimización en VTAM y comprobaciones en Architrave) que ha supuesto para el suscribe un propio proceso de optimización dentro del propio trabajo; a medida que se iba investigando, mi destreza de los propios programas iba en aumento, reduciendo los tiempos de trabajo y sacando más rentabilidad. En el trabajo aparecen más de 100 estructuras optimizadas con sus correspondientes procesos de modelado y optimización, más todas aquellas que se han quedado en el archivo como las primeras pruebas aprendiendo a utilizar los programas o las pruebas fallidas; desde la primera a la última se han visto afectadas por este proceso de optimización interno.

Tanto Architrave y VTAM son dos herramientas superpotentes que agilizan mucho el trabajo, sobre todo comparado con esta misma investigación, pero hechos todos los cálculos a mano, simplemente sería imposible de realizar. Aunque en este trabajo no hayamos explorado todas las posibilidades que ofrece VTAM, esta herramienta permite calcular estructuras y obtener resultados de muchas más variables además del peso de

éstas: emisiones de CO_2 , coste de montaje, superficie que hay que proteger con pintura, etc.

Después de un largo y arduo proceso, aquel que se describe en este trabajo, se ha obtenido una solución lo suficientemente buena como para dar por satisfecha la investigación. Se ha partido de geometrías diferentes, se han refinado los resultados, se han aplicado modificaciones y por último se han optimizado aquellas candidatas a mejor solución.

Por último, todo este trabajo me ha servido para introducirme en un campo nuevo para mí como lo es la optimización de las estructuras. Es un aspecto de las estructuras que no suele mencionarse durante los estudios de Grado, y es algo que considero muy importante, sobre todo en la actualidad, donde los recursos y la energía han de utilizarse de manera comedida y sostenible. Además, adentrarme en herramientas como Architrave y VTAM me abre un gran número de posibilidades de cara a mi futuro profesional, además de que me pueda permitir enfocar el resto de trabajo académicos de una forma diferente.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Desarrollo Sostenible – United Nations Sustainable Development Sites.
”<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/> (accessed Sep. 09, 2022)
- [2] “Grupo de Estructuras Arquitectónicas (GEA)”
<https://investigacion.udc.es/es/Research/Details/G000399>
- [3] CAPELO, A. (31 de mayo de 2013) Pavillón polideportivo na Zapateira.
Arquitectura de Galicia. <https://arquitecturadegalicia.eu/blog/pavillonpolideportivo-na-zapateira/>
- [4] BRUNETTI, G L. (2004). Edificio sportive a la Coruña, Spagna. *Construire in Laterizio*, 102, 48-57.
- [5] ESTÉVEZ, J. (2011). Timber spatial trusses using hollow bars. *Internationales Holzbau-Forum 2011*.
- [6] ESTÉVEZ CIMADEVILA, J., MARTÍN GUITÉRREZ, E., OTERO CHANS, D., & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J. (2006). Experimental test of threaded steel rods glued-in hardwood with epoxy. *WIT Transactions on the Built Environment vol. 85*. 63-72.
- [7] ESTÉVEZ CIMADEVILA, J., MARTÍN GUITÉRREZ, E., OTERO CHANS, D., & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J. (2013). Análisis experimental de las barras de madera laminada con sección tubular utilizadas en la construcción de una malla especial. *Madera. Ciencia y tecnología* 15(2). 153-170.
- [8] ESTÉVEZ CIMADEVILA, J., OTERO CHANS, M.D., & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2007). Experimental behavior of threaded steel rods glued into high-density hardwood. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 27 (2007). 136-144.
- [9] ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2003). Construcción de un espacio Deportivo con paredes de superficie reglada de cerámica armada. *Informes de la Construcción*, 55 (485), mayo-junio 2003.
- [10] ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2004). Spatial truss of hollow bars made of laminated timber supported by walls of reinforced masonry. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structure*, Vol. 45 n. 134, 13-21.
- [11] GHAVAMI, K. & MOREIRA, L.E. (1996). Development of new joint for bamboo space structures. *WIT Transactions on the Built Environment vol. 24*. 201-210.
- [12] GUILBERT-R-RØED, CE. (2017). La place de la charpente de bois lamellé dans les expositions universelles et internationales depuis 1990. *Livraisons d'histoire de l'architecture vol. 34*. 63-70.
- [13] PITA ABAD, C. & QUINTÁNS EIRA, C. (2009). Polideportivo en la Zapateira. *Arquitectura y madera*. Lignum facile.

- [14] PORTALES PONS, A. (2013). Los retos de la construcción de grandes luces y las técnicas para su resolución. En *Analizando la construcción* (pp. 289-300). Barcelona, España: Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC.
- [15] RHUDE, A. J. (1996). Structural glued laminated timber: History of its origins and early development. *Forest Products Journal vol. 46*. Brian Via.
- [16] RUG, W. (2006). 100 Jahre Hetzer-Patent. *Bautechnik 83, Heft 8*. 233-240. Ernst & Sohn.
- [17] SARDIZA ASENSIO, J. (2016). La madera laminada en la arquitectura. *Trabajo Fin de Grado*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [18] VÁZQUEZ RODÍGUEZ, J.A. (2001). Las barras huecas de madera en la construcción de estructuras espaciales. *Tesis de licenciatura*. Universidad de la Coruña.
- [19] PÉREZ-GARCÍA, A., ALONSO DURÁ A., ALONSO ÁBALOS, J. M., GÓMEZ-MARTÍNEZ, F. & LOZANO LLORET, P. (2010). "Architrave 2019," Universitat Politècnica de València, 2019.
- [20] PÉREZ GARCÍA, A. & LOZANO LLORET, P. (2020). VTAM. Vast Territories Aerial Mapping. Web based application intended for Structural Optimization. Benchmark of optimized functions and cases." [Online]. Available: <https://vtam.optimizer.upv.es/Benchmark.aspx>. [Accessed: 18-Sep-2021].
- [21] PÉREZ-GARCÍA, A., ALONSO ÁBALOS, J. M., GUARDIOLA-VÍLLORA, A., LOZANO LLORET, P., & PÉREZ GUARDIOLA, A. (2020). VTAM. Vast Territories Aerial Mapping. Web based application for Structural Optimization. Fundamentals of the Optimization Algorithm. DOI 10.13140/RG.2.2.11870.25921/1;" pp. 1–19, 2020.
- [22] PÉREZ-GARCÍA, A., ALONSO ÁBALOS, J. M., GUARDIOLA-VÍLLORA, A., LOZANO LLORET, P., & PÉREZ GUARDIOLA, A. (2020). VTAM. Vast Territories Aerial Mapping. Web based application for Structural Optimization. Arguments File Contents and Structure. DOI 10.13140/RG.2.2.20656.58888;" pp. 1–12, 2020.
- [23] PÉREZ GARCÍA, A. & LOZANO LLORET, P. (2020). VTAM. Vast Territories Aerial Mapping. Web based application intended for Structural Optimization." [Online]. Available: <https://vtam.optimizer.upv.es/list.aspx>. [Accessed: 10-Jul-2020].
- [24] "IVE". [https://bdc.f-ive.es/BDC21/1/EERA.1\\$](https://bdc.f-ive.es/BDC21/1/EERA.1$)
- [25] "Documento Básico SE ". <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE.pdf>

11. ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 0 (Portada).

<https://arquitecturadegalicia.eu/blog/pavillon-polideportivo-na-zapateira/>

El proyecto

Figura 1. Ubicación del proyecto.

Google Maps y edición propia.

Figura 2. Modelización de una primera propuesta sustentada por cuatro barras tubulares.

Elaboración propia.

Figura 3. Iglesia de Atlántida. Departamento de Canelones. Uruguay, 1960. Eladio Dieste.

ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2003). Construcción de un espacio Deportivo con paredes de superficie reglada de cerámica armada. *Informes de la Construcción*, 55 (485), mayo-junio 2003.

Figura 4. Detalle de las hiladas de fábrica de ladrillo a medida que el muro va ganando altura.

BRUNETTI, G L. (2004). Edificio sportive a la Coruña, Spagna. *Construire in Laterizio*, 102, 48-57

Figura 5. Detalle del replanteo de los muros.

ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2003)

Construcción de un espacio Deportivo con paredes de superficie reglada de cerámica armada. *Informes de la Construcción*, 55 (485), mayo-junio 2003.

Figura 6. Detalle de la construcción del muro de fábrica guiado por los hilos del replanteo.

ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2003)

Construcción de un espacio Deportivo con paredes de superficie reglada de cerámica armada. *Informes de la Construcción*, 55 (485), mayo-junio 2003.

Figura 7. Detalle del proceso constructivo del muro de fábrica.

ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2003)

Construcción de un espacio Deportivo con paredes de superficie reglada de cerámica armada. *Informes de la Construcción*, 55 (485), mayo-junio 2003.

Figura 8. Sala de exhibiciones en Ámsterdam, luz de 30m, 1922. Otto Hetzer.

RUG, W. (2006)

100 Jahre Hetzer-Patent. *Bautechnik* 83, Heft 8. 233-240. Ernst & Sohn.

Figura 9. Pruebas con una malla espacial de bambú. 1993. Ghavam, K y Moreira, L.E.

GHAVAMI, K. & MOREIRA, L.E. (1996)

Development of new joint for bamboo space structures. *WIT Transactions on the Built Environment* vol. 24. 201-210.

Figura 10. Geometrías de las probetas a ensayar.

ESTÉVEZ CIMADEVILA, J., MARTÍN GUITÉRREZ, E., OTERO CHANS, D., & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J. (2013)

Análisis experimental de las barras de madera laminada con sección tubular utilizadas en la construcción de una malla especial. *Madera. Ciencia y tecnología* 15(2). 153-170.

Figura 11. Ejecución de las barras huecas de 3465 mm de longitud.

ESTÉVEZ CIMADEVILA, J., MARTÍN GUITÉRREZ, E., OTERO CHANS, D., & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J. (2013)

Análisis experimental de las barras de madera laminada con sección tubular utilizadas en la construcción de una malla especial. *Madera. Ciencia y tecnología* 15(2). 153-170.

Figura 12. Ejemplo de fallo de las probetas a compresión.
 ESTÉVEZ CIMADEVILA, J., MARTÍN GUITÉRREZ, E., OTERO CHANS, D., & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J. (2013)
 Análisis experimental de las barras de madera laminada con sección tubular utilizadas en la construcción de una malla especial. *Madera. Ciencia y tecnología* 15(2). 153-170.

Figura 13. Ejemplo de fallo de las probetas a tracción.
 ESTÉVEZ CIMADEVILA, J., MARTÍN GUITÉRREZ, E., OTERO CHANS, D., & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J. (2013)
 Análisis experimental de las barras de madera laminada con sección tubular utilizadas en la construcción de una malla especial. *Madera. Ciencia y tecnología* 15(2). 153-170.

Figura 14. Módulos apilados esperando a ser colocados en la estructura.
 ESTÉVEZ CIMADEVILA, J., MARTÍN GUITÉRREZ, E., OTERO CHANS, D., & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J. (2013)
 Análisis experimental de las barras de madera laminada con sección tubular utilizadas en la construcción de una malla especial. *Madera. Ciencia y tecnología* 15(2). 153-170.

Figura 15. Celosía ya colocada.
 ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. Archivo personal.

Figura 16. Esquema en planta del proyecto. Superior, celosía en madera. Inferior, muros de fábrica.
 ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2004)
 Spatial truss of hollow bars made of laminated timber supported by walls of reinforced masonry. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structure, Vol. 45 n. 134, 13-21.*

Figura 17. Tacos de madera en el interior de las barras.
 ESTÉVEZ CIMADEVILA, J., MARTÍN GUITÉRREZ, E., OTERO CHANS, D., & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J. (2006)
 Experimental test of threaded steel rods glued-in hardwood with epoxy. *WIT Transactions on the Built Environment vol. 85. 63-72.*

Figura 18. Detalle de un nudo del cordón superior.
 ESTÉVEZ, J. (2011)
 Timber spatial trusses using hollow bars. *Internationales Holzbau-Forum 2011.*

Figura 19. División de la celosía para su posterior construcción.
 ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2004)
 Spatial truss of hollow bars made of laminated timber supported by walls of reinforced masonry. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structure, Vol. 45 n. 134, 13-21.* Edición propia.

Figura 20. Ensamblaje de todo el primer sector.
 ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2004)
 Spatial truss of hollow bars made of laminated timber supported by walls of reinforced masonry. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structure, Vol. 45 n. 134, 13-21.*

Figura 21. Colocación del primer sector.
 ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2004)
 Spatial truss of hollow bars made of laminated timber supported by walls of reinforced masonry. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structure, Vol. 45 n. 134, 13-21.*

Figura 22. El primer sector ya está colocado, el segundo se está acabando de ensamblar.
 ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2004)
 Spatial truss of hollow bars made of laminated timber supported by walls of reinforced masonry. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structure, Vol. 45 n. 134, 13-21.*

Análisis estructural

Figura 23. Mapa de peligrosidad sísmica (NCSE-02).

https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf

Figura 24. Dimensiones del ámbito de carga de cada nudo.

Elaboración propia.

Figura 25. Reparto de cargas puntuales.

Elaboración propia.

Figura 26. Recorte de un documento de argumentos donde se pueden comprobar los movimientos máximos permitidos.

PÉREZ-GARCÍA, A., ALONSO ÁBALOS, J. M., GUARDIOLA-VÍLLORA, A., LOZANO LLORET, P., & PÉREZ GUARDIOLA, A. (2020).

VTAM. Vast Territories Aerial Mapping. Web based application for Structural Optimization. Arguments File Contents and Structure. DOI 10.13140/RG.2.2.20656.58888 ;” pp. 1–12, 2020.

Figura 27. Representación acotada de un único módulo de semioctaedro.

Elaboración propia.

Figura 28. Representación acotada de la celosía completa.

Elaboración propia.

Figura 29. Modelización de la estructura, barras de apoyo.

Elaboración propia.

Figura 30. Modelización de la estructura, cordón inferior.

Elaboración propia.

Figura 31. Modelización de la estructura, barras inclinadas.

Elaboración propia.

Figura 32. Modelización de la estructura, cordón superior.

Elaboración propia.

Figura 33. Sección de las barras huecas de dimensiones 12,5 cm x 12,5 cm

ESTÉVEZ CIMADEVILA, J. & VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, J.A. (2004)

Spatial truss of hollow bars made of laminated timber supported by walls of reinforced masonry. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structure, Vol. 45 n. 134, 13-21.*

Proceso de optimización

Figura 34. Representación de la celosía ORG_5G con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 35. Representación de la celosía ORG_8G con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 36. Representación de la celosía ORG_10G con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 37. Reparto de cargas puntuales.

Elaboración propia.

Figura 38. Representación de la celosía /2_6G con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 39. Representación de la celosía /2_10G con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 40. Modelización de la estructura, barras de apoyo.

Elaboración propia.

Figura 41. Modelización de la estructura, cordón inferior.

Elaboración propia.

Figura 42. Modelización de la estructura, barras inclinadas.

Elaboración propia.

Figura 43. Modelización de la estructura, cordón superior.

Elaboración propia.

Figura 44. Reparto de cargas puntuales.

Elaboración propia.

Figura 45. Modelización de la celosía_INV_5G, primera variante.

Elaboración propia.

Figura 46. Representación de la celosía_INV_5G_1 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 47. Modelización de la celosía_INV_5G, segunda variante.

Elaboración propia.

Figura 48. Representación de la celosía_INV_5G_2 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 49. Modelización de la celosía_INV_5G, tercera variante.

Elaboración propia.

Figura 50. Representación de la celosía_INV_5G_3 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 51. Modelización de la celosía_INV_5G, cuarta variante.

Elaboración propia.

Figura 52. Representación de la celosía_INV_5G_4 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 53. Representación de la celosía_INV_9G_1 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 54. Representación de la celosía_INV_9G_2 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 55. Representación de la celosía_INV_9G_3 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 56. Representación de la celosía_INV_9G_4 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 57. Representación de la celosía_ORG_10G_2 con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.

Elaboración propia.

Figura 58. Modelización de la estructura, barras de apoyo.

Elaboración propia.

Figura 59. Modelización de la estructura, cordón inferior.

Elaboración propia.

Figura 60. Modelización de la estructura, barras inclinadas.

Elaboración propia.

Figura 61. Modelización de la estructura, cordón superior.

Elaboración propia.

Figura 62. Reparto de cargas puntuales.
Elaboración propia.

Figura 63. Representación de la celosía_TR1_11G_ con los distintos grupos de barras diferenciados por colores.
Elaboración propia.

Figura 64. Reparto de cargas puntuales.
Elaboración propia.

Figura 65. Reparto de cargas puntuales.
Elaboración propia.

Figura 66. Apoyos (rojo) de la celosía_TR3_12G_1.
Elaboración propia.

Figura 67. Apoyos (rojo) de la celosía_TR3_12G_2.
Elaboración propia.

Figura 68. Celosía tipo reduciendo su canto 40cm.
Elaboración propia.

Figura 69. Celosía tipo reduciendo su canto 20cm.
Elaboración propia.

Figura 70. Celosía tipo aumentando su canto 20cm.
Elaboración propia.

Figura 71. Celosía tipo aumentando su canto 40cm.
Elaboración propia.

Figura 72. Grupos de barras que contienen las barras de apoyo.
Elaboración propia.

Figura 73. Grupos de barras que contienen las barras inferiores.
Elaboración propia.

Figura 74. Grupos de barras que contienen las barras inclinadas.
Elaboración propia.

Figura 75. Grupos de barras que contienen las barras superiores.
Elaboración propia.

Figura 76. Grupos de barras que contienen las barras laterales.
Elaboración propia.

Figura 77. Grupos de barras que contienen las barras diagonales, tanto del cordón superior como del inferior.
Elaboración propia.

Figura 78. Precio unitario del acero S235 según la web del IVE.
"IVE," Sep. 2022. [https://bdc.f-ive.es/BDC21/1/EERA.1\\$](https://bdc.f-ive.es/BDC21/1/EERA.1$) (accessed Sep. 12, 2022).

Figura 79. Precio unitario del acero S275 según la web del IVE.
"IVE," Sep. 2022. [https://bdc.f-ive.es/BDC21/1/EERA.1\\$](https://bdc.f-ive.es/BDC21/1/EERA.1$) (accessed Sep. 12, 2022).

Figura 80. Precio unitario del acero S355 según la web del IVE.
"IVE," Sep. 2022. [https://bdc.f-ive.es/BDC21/1/EERA.1\\$](https://bdc.f-ive.es/BDC21/1/EERA.1$) (accessed Sep. 12, 2022).

Figura 81. Coeficientes de agotamiento de la celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S235.
Elaboración propia.

Figura 82. Barras con sección PHC UNE Ic 40 2.6 de la celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S23.
Elaboración propia.

Figura 83. Coeficientes de agotamiento de la celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S23, cordón inferior.
Elaboración propia.

Figura 84. Ilustración 28. Coeficientes de agotamiento de la celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S23, barras inclinadas.

Elaboración propia.

Figura 85. Coeficientes de agotamiento de la celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S23, cordón superior.

Elaboración propia.

Comparación estructura original con estructura optimizada

Figura 86. Volumetría de la celosía original de madera.

Elaboración propia.

Figura 87. Volumetría de la celosía_celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S235.

Elaboración propia.

Figura 88. Volumetría de celosía original de madera.

Elaboración propia.

Figura 89. Volumetría de la celosía_celosía_ORG_60G_+Diags_4_C+10cm_S235.

Elaboración propia.

Figura 90. Precio unitario del acero S235 según la web del IVE.

“IVE,” Sep. 2022. [https://bdc.f-ive.es/BDC22/1/EERM.4\\$/bidb](https://bdc.f-ive.es/BDC22/1/EERM.4$/bidb) (accessed Sep. 12, 2022).

TABLAS

Tabla 1: Valores característicos de las sobrecargas de uso según DBSE-AE.

<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>

Tabla 2: Valores característicos de sk según el DBSE-AE.

Tabla 3. Características y asignación de barras de la celosía ORG_5G.

Elaboración propia.

Tabla 4. Características y asignación de barras de la celosía ORG_8G.

Elaboración propia.

Tabla 5. Características y asignación de barras de la celosía ORG_10G.

Elaboración propia.

Tabla 6. Características y asignación de barras de la celosía /2_6G.

Elaboración propia.

Tabla 7. Características y asignación de barras de la celosía /2_6G_C+86cm.

Elaboración propia.

Tabla 8. Características y asignación de barras de la celosía /2_10G.

Elaboración propia.

Tabla 9. Características y asignación de barras de la celosía /2_10G_C+86cm.

Elaboración propia.

Tabla 10. Peso total de todas las celosías_/2.

Elaboración propia.

Tabla 11. Características y asignación de barras de la celosía_INV_5G_1.

Elaboración propia.

Tabla 12. Características y asignación de barras de la celosía_INV_5G_2.

Elaboración propia.

Tabla 13. Características y asignación de barras de la celosía_INV_5G_3.

Elaboración propia.

Tabla 14. Características y asignación de barras de la celosía_INV_5G_4.

Elaboración propia.

Tabla 15. Características y asignación de barras de la celosía_INV_9G_1.

Elaboración propia.

Tabla 16. Características y asignación de barras de la celosía_INV_9G_2.

Elaboración propia.

Tabla 17. Características y asignación de barras de la celosía_INV_9G_3.

Elaboración propia.

Tabla 18. Características y asignación de barras de la celosía_INV_9G_4.

Elaboración propia.

Tabla 19. Características y comparación de las celosías INV_5G e INV_9G.

Elaboración propia.

Tabla 20. Características y comparación de la celosía_ORG_10G_2.

Elaboración propia.

Tabla 21. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_12G_+DiagSs.

Elaboración propia.

Tabla 22. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_11G_+Diags.

Elaboración propia.

Tabla 23. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_11G_+Diags_2.

Elaboración propia.

Tabla 24. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_11G_+Diags_3.

Elaboración propia.

Tabla 25. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_11G_+Diags_4.

Elaboración propia.

Tabla 26. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_13G_+DiagSs.

Elaboración propia.

Tabla 27. Características y asignación de barras de la celosía_ORG_13G_+DiagSs_2.

Elaboración propia.

Tabla 28. Características y asignación de barras de la celosía_TR1_11G.

Elaboración propia.

Tabla 29. Características y asignación de barras de la celosía_TR1_11G_C-166cm.

Elaboración propia.

Tabla 30. Características y asignación de barras de la celosía_TR2_11G.

Elaboración propia.

Tabla 31. Características y asignación de barras de la celosía_TR2_11G_C-136cm.

Elaboración propia.

Tabla 32. Características y asignación de barras de la celosía_TR3_11G_1.

Elaboración propia.

Tabla 33. Características y asignación de barras de la celosía_TR3_11G_C-110cm_1.

Elaboración propia.

Tabla 34. Características y asignación de barras de la celosía_TR3_11G_2.

Elaboración propia.

Tabla 35. Características y asignación de barras de la celosía_TR3_11G_C-110cm_2.

Elaboración propia.

Tabla 36. Pesos y comparación de las celosías formada a partir de tetraedros.

Elaboración propia.

Tabla 37. Longitud y comparación de las celosías formada a partir de tetraedros.

Elaboración propia.

Tabla 38. Comparación entre la reducción de longitud y la reducción de peso de las celosías formada a partir de tetraedros.

Elaboración propia.

Tabla 39. Resumen de la Fase Inicial.

Elaboración propia.

Tabla 40. Resumen de los resultado de la Segunda Fase del proceso de optimización.

Elaboración propia.

Tabla 41. Resumen de los mejores 4 resultados.

Elaboración propia.

Tabla 42. Variación del canto según la serie +-10cm de la Celosía_ORG_11G_+Diags_4.

Elaboración propia.

Tabla 43. Variación del canto según la serie +-10cm de las 4 mejores celosías.

Elaboración propia.

Tabla 44. Todas las celosías de la serie Celosía_ORG_11G_+Diags_4.

Elaboración propia.

Tabla 45. Costes totales y finales de cada celosía.

Elaboración propia.

Tabla 46. Comparación final entre la celosía original de madera, la celosía original de acero y la solución final.

Elaboración propia.

"Me di cuenta, a pesar de todo, que en medio del invierno había dentro de mí un verano invencible"