



**Universidad**  
Zaragoza

# TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y cálculo de una cubierta de barras y membranas tensadas para un estadio.

Design and calculation of a bars canopy and tensioned membranes for a stadium.

Autor:

Eloy Torrecilla Gómez

Directora:

Dra. Icíar Alfaro Ruiz

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2021/2022

## RESUMEN

El objetivo del proyecto va a consistir en el diseño y el cálculo de una cubierta formada por barras y membranas tensadas localizada en un nuevo estadio que se va a construir en Madrid.

Para ello se va a utilizar un software de análisis estructural mediante elementos finitos llamado RFEM de *Dlubal*. Mediante este programa se va realizar un modelado en 3D para posteriormente obtener la forma óptima de la membrana pretensada, y se va a llevar a cabo un estudio de la estructura con las diferentes hipótesis de carga que van a afectar a la cubierta.

Finalmente se extraerán las conclusiones y se realizará una optimización de la estructura a partir de los resultados obtenidos en la simulación.

Todo el análisis se hará de acuerdo al Código Técnico de la edificación (CTE) y al Eurocódigo 3 (EC3).

## ABSTRACT

The objective of the project will consist of the design and calculation of a bars canopy and tensioned membranes located in a new stadium to be built in Madrid.

To do this, a structural analysis software using finite elements called Dubal's RFEM will be used. Through this program, a 3D modeling will be carried out to subsequently obtain the optimal shape of the prestressed membrane, and a study of the structure will be carried out with the different load hypotheses that will affect the canopy.

Finally, the conclusions will be drawn and an optimization of the structure will be carried out based on the results obtained in the simulation.

All the analysis will be done in accordance with the Technical Building Code and Eurocode 3 (EC3).

## ÍNDICE

1	OBJETO Y ALCANCE .....	3
2	INTRODUCCIÓN .....	4
2.1	CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS LIGERAS .....	6
3	DISEÑO .....	8
3.1	ORIGEN Y ADAPTACIÓN .....	8
3.2	NORMATIVA USADA PARA EL DISEÑO.....	9
3.3	ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.....	10
4	MODELO DE CÁLCULO EN RFEM .....	13
4.1	MODELADO DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS .....	13
4.2	CONDICIONES DE APOYO.....	14
4.3	MALLADO.....	15
5	BÚSQUEDA DE FORMA.....	16
6	APLICACIÓN DE LAS CARGAS.....	18
6.1	PESO PROPIO .....	18
6.2	NIEVE.....	18
6.3	VIENTO.....	20
7	COMBINACIONES DE CARGA .....	25
8	SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN .....	28
8.1	PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DE LOS PERFILES.....	31
9	RESULTADOS.....	36
10	CONCLUSIONES .....	45
11	BIBLIOGRAFÍA.....	46
	ANEXO I. DIMENSIONES PRINCIPALES DE LA CUBIERTA.....	47
	ANEXO II. CÁLCULO DE LA CARGA DE VIENTO.....	49
	ANEXO III. COMPROBACIONES DE ESTABILIDAD ARCOS LATERALES.....	61
	ANEXO IV. PROPIEDADES MEMBRANAS PVC.....	64

## 1 OBJETO Y ALCANCE

---

El objeto del proyecto es el diseño y el cálculo de una cubierta de barras y membranas tensadas para un estadio de fútbol que se va a ubicar en Madrid (España). En el presente trabajo se va a diseñar el conjunto de la cubierta y se van a calcular todas las barras que componen la estructura, así como la membrana tensada que se encargará de proteger a los espectadores.

El proyecto va a explicar detalladamente mediante esta memoria como se ha conseguido realizar el diseño y el posterior cálculo de una estructura con cierta complejidad como es la cubierta de un estadio mediante una herramienta como es el programa de elementos finitos de RFEM.

En el proyecto se va a incluir la explicación de los elementos constructivos que componen la cubierta, el cálculo de todas las cargas que afectan a la estructura y finalmente el cálculo de las barras más adecuadas para esta estructura. Debido a la geometría de la estructura el cálculo de la carga de viento no es sencillo, siendo necesario utilizar un programa de simulación de túneles de viento para estimar la presión que el viento ejerce sobre la membrana.

Como se trata de una estructura de membranas tensadas, se buscará y se explicará la búsqueda de forma que debe tener la membrana y se definirán material, pretensión aplicada y espesor de la membrana. Finalmente se incluirán los resultados obtenidos más significativos de la cubierta.

Este proyecto no incluye memoria constructiva, planos, presupuesto, pliego de condiciones o estudio de seguridad y salud. Únicamente trata el cálculo y el diseño de la estructura.

## 2 INTRODUCCIÓN

---

Una cubierta es un elemento constructivo cuya función es proteger un elemento en su parte superior de los diferentes fenómenos meteorológicos. En nuestro caso la función específica de la cubierta va a ser proteger a los espectadores de un futuro estadio de fútbol en Madrid.

Las cubiertas se encuentran formadas principalmente por un elemento portante (estructura) y el material que se encarga de proteger el elemento que se encuentra debajo.

Existen diferentes tipos de cubiertas, clasificándolas según su forma podemos diferenciar a groso modo: cubiertas planas, a un agua, a dos aguas y cubiertas a 4 aguas.

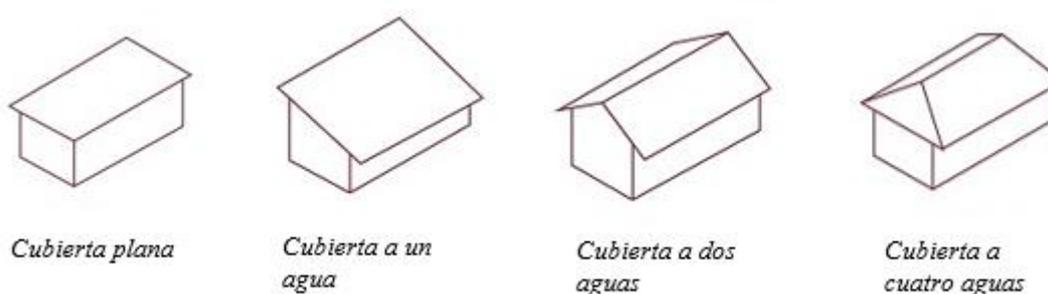


Figura 1. Tipos de cubierta [1]

Estos tipos de cubiertas son adoptados en edificios convencionales. Cuando se busca cubrir otro tipo de elemento o hacer de la cubierta algo estético aparte de funcional aparecen diferentes formas y métodos para conseguirlas, permitiendo desarrollar soluciones creativas para resolver espacios de cualidades no convencionales.

Uno de esos métodos es el usado para cubrir las gradas del estadio de fútbol presentado en este trabajo. En este caso, se va a usar una cubierta formada por una estructura de barras y membranas pretensadas.

Se va a desarrollar y exponer este tipo de estructuras ligeras que suelen estar formadas por elementos textiles vinculadas a estructuras ligeras que actúan de soporte de las anteriores. El principal objetivo de implantar este tipo de cubierta es la búsqueda de cubrir un espacio amplio con una luz grande y optimizar la cantidad de material usado, así como la ligereza de los mismos.

Las cubiertas de membranas pretensadas son cada día más usadas y su uso está orientado a lo que demanda las estructuras de hoy en día: adaptabilidad, ligereza, fácil movilidad, menor gasto energético...etc.

Las principales características que presentan las membranas tensadas son las siguientes:

- **Ligereza:** Se buscan sistemas simples ya que la función principal de este tipo de cubiertas es la protección contra la lluvia y la incidencia directa del sol, de este modo, se buscan sistemas ligeros, flexibles y simples capaces de adaptarse a la geometría planteada.

- **Síntesis de Elementos:** Este tipo de cubiertas son estructuras que trabajan principalmente a tracción, es por eso que se busca que la estructura tenga una mínima relación entre la masa y el volumen. Esto se traduce en un ahorro económico ya que la relación peso propio - luz a cubrir disminuye.
- **Captación de Energía:** La gran mayoría de membranas usadas en ese tipo de cubiertas permiten el paso de la radiación solar, esto permite una captación de energía que nos permite absorber y almacenar el calor en los elementos del interior. Del mismo modo, la luz que dejan pasar varía entre el 5% y el 20% según el material, aprovechando esto también.
- **Distinción Formal:** el abanico de soluciones creativas que nos ofrecen las membranas tensadas dan una imagen distintiva y una identidad formal que el resto de cubiertas convencionales no pueden ofertar.
- **Sección Espacial:** La tipología natural de estas cubiertas permite el movimiento de masas de aire, por eso es necesario realizar un adecuado diseño para proporcionar una adecuada ventilación y renovación en el interior a través de aberturas entre las membranas.

El sistema de membranas tensadas tiene un amplio rango donde aplicarse ya que son capaces de adaptarse a diferentes funciones y geometrías debido a su flexibilidad. Del mismo modo, su fácil montaje y desmontaje hace que sean los tipos de estructuras elegidas para las cubiertas temporales, cada día en más uso para eventos deportivos o centros comerciales temporales como ferias de muestras, carpas para diferentes usos, etc.

Como se ha comentado en las principales ventajas de estas cubiertas, el aprovechamiento de la luz que proporcionan, así como el aprovechamiento energético, hace que se encuentre en esta tecnología una respuesta acorde a espacios como shoppings, patios de comidas, cubiertas de aeropuertos y hoteles, anfiteatros, etc.

Puesto que son estructuras más económicas teniendo en cuenta la relación peso propio - luz a cubrir que presentan, son la solución ideal para cubrir grandes luces; ejemplo de ello son las instalaciones deportivas, como es el caso de la cubierta presentada en este proyecto.



Figura 2. Ejemplo de instalaciones con membranas [2]

## 2.1 CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS LIGERAS

La membrana se basa en una lámina tendida sujeta en apoyos rígidos que son, al mismo tiempo, parte de la estructura constructiva y material de cubierta. La mayor parte de las estructuras tensadas derivan de tres formas básicas: que son el paraboloides hiperbólico, el arco y el conoide.

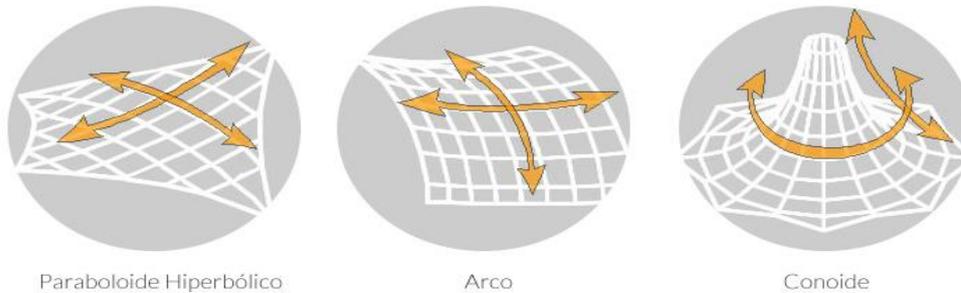


Figura 3. Formas básicas [3]

- **Paraboloides Hiperbólico:** se trata de una estructura de doble curvatura donde la membrana se genera a partir del desplazamiento de una parábola sobre una hipérbola. De este modo, las tensiones que se generan en su pretensado se ejercen sobre dos sentidos. El paraboloides hiperbólico simple se obtiene elevando uno de sus extremos.

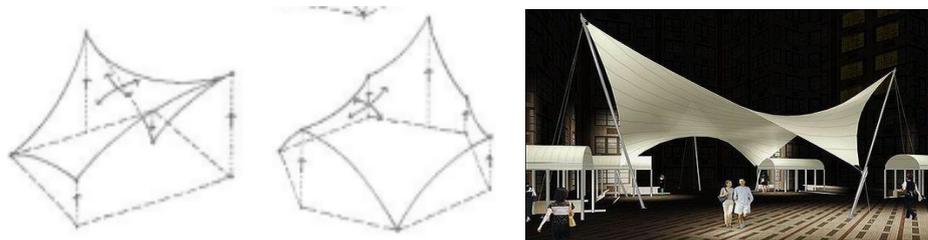


Figura 4. Ejemplos de Paraboloides Hiperbólico [4]

- **Conoide:** la membrana de estas estructuras es generada mediante dos aros paralelos, uno fuera del plano y otro generado por el soporte del perímetro de la membrana. De esta manera se genera una doble curvatura, generándose fuerza en el plano vertical debida al punto interno fuera del plano y otra fuerza en el plano horizontal debido al perímetro exterior. Los aros horizontales soportan las cargas de este tipo de estructuras desde dentro hacia fuera, mientras que las líneas radiales de los arcos soportan la carga de fuera hacia dentro.



Figura 5. Ejemplo de conoides [5]

- Arco: se trata de una estructura donde la membrana se sostiene y se apoya en uno o varios arcos, que ejercen de estructura portante. La membrana se conecta al arco mediante cables que soportan la tensión. Este tipo de estructuras se pueden realizar colocando arcos en paralelo o de forma diagonal, pero siempre generando la tensión mediante cables. Este tipo de estructura es en la que se basa la cubierta planteada en el proyecto.

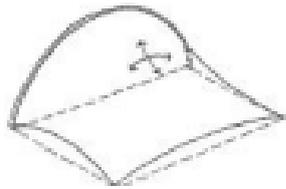


Figura 6. Ejemplo de arco [6].

- Formas compuestas: las tres formas básicas explicadas anteriormente se pueden combinar para formar todo tipo de estructuras más complejas, debido a la infinidad de formas que estas combinaciones ofrecen. Aunque es necesario agruparlas en tres grupos para poder explicarlas. La unión entre diferentes formas puede ser de dos tipos, por arista viva, o por banda de unión, cualquiera de ellas manteniendo la estabilidad tensional.

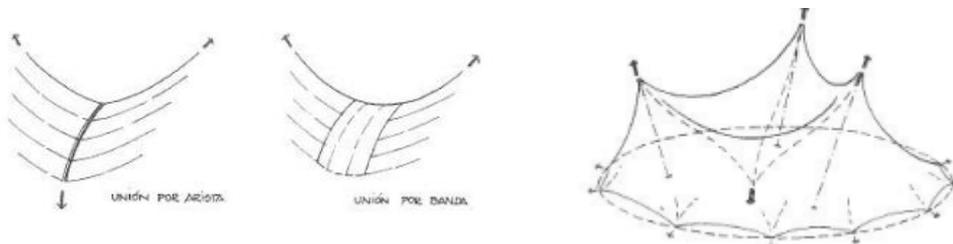


Figura 7. Ejemplos de formas compuestas [7].

Las estructuras de membranas tensadas tienen la cualidad de mantener al sistema en equilibrio estático debido a la pretensión interna aplicada, haciendo que cuando se aplique una carga externa  $Q$ , la carga será resistida por una de las direcciones principales mientras que la dirección opuesta mantendrá la estabilidad del sistema. La membrana actúa biaxialmente. Del mismo modo, resisten eficientemente las cargas debido a la resistencia formal, dada por la curvatura del sistema, sumada a la pretensión aplicada.

### 3 DISEÑO

En este apartado se van a describir los principales elementos de diseño que tiene el proyecto, todas las consideraciones que constituyen la cubierta, su origen y adaptación, así como todos los elementos constructivos que la componen.

#### 3.1 ORIGEN Y ADAPTACIÓN

La geometría del presente proyecto está basada en la forma de una cubierta de nueva implantación en San Bernardo, una ciudad de Santiago de Chile, para el estadio de La Montura. Espacio Cubierto SA es el grupo de arquitectos encargado de llevar a cabo la forma de esta cubierta, que no se ha llegado a construir.

A partir de la forma de esta cubierta se ha extrapolado y se ha adaptado a las condiciones tanto meteorológicas como de dimensiones dentro de su nueva ubicación en Madrid para la cubierta llevada a cabo en este proyecto.

Las principales modificaciones que se han realizado son geométricas, haciendo una estructura algo más simple, eficaz y adaptada a la nueva capacidad del estadio. Las principales modificaciones se aprecian en las siguientes figuras:

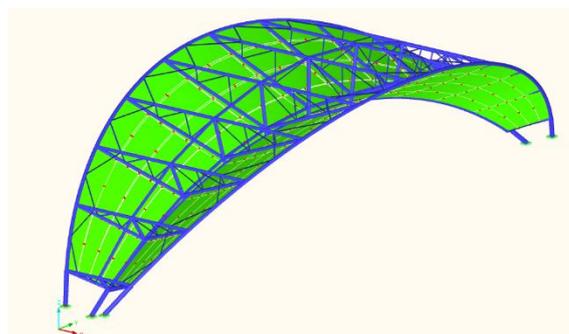


Figura 9. Nuevo diseño.

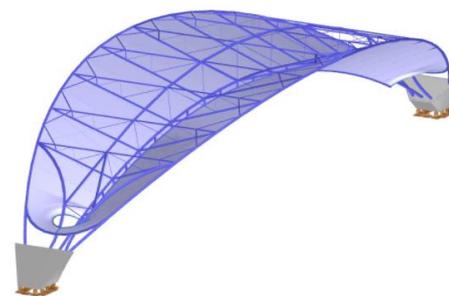


Figura 8. Diseño original.

Las principales dimensiones geométricas se encuentran en el ANEXO I. DIMENSIONES PRINCIPALES DE LA CUBIERTA.

En principio la cubierta se va a diseñar para uno de los fondos de un estadio, aunque podría implantarse para diferentes usos en diferentes estadios. A continuación, se muestra una figura de cómo se vería con las gradas colocadas:

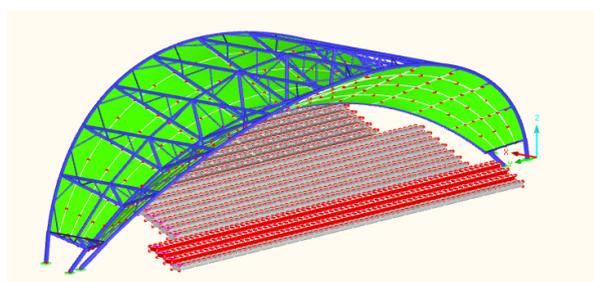


Figura 10. Ejemplo 3D.

### 3.2 NORMATIVA USADA PARA EL DISEÑO.

A lo largo del proyecto ha sido necesario seguir una normativa para realizar un cálculo y un diseño correcto.

Las normativas en las que se basa el proyecto de acuerdo a la ubicación del mismo, las acciones que afectan a la estructura y los materiales usados en ella, son las siguientes:

- CTE- DB-SE:

Este documento básico establece los requisitos y principios que se deben tener en cuenta en lo que, a resistencia mecánica, estabilidad del edificio, límites de servicio y durabilidad de la estructura se refiere.

Del mismo modo, describe todas las bases que deben seguirse en cuanto al cálculo de las aptitudes ya nombradas, así como los tipos de acciones y su tratamiento.

- CTE- DB-SE-AE:

Este documento básico describe y determina las acciones que actúan sobre las diferentes estructuras, para verificar los requisitos de seguridad estructural y límites de servicio que se establecen en el documento anterior. En este documento no se incluyen las fuerzas externas como pueden ser ascensores, puentes grúa...

- CTE – DB- SE – A:

Este documento básico se encarga de verificar la seguridad de los elementos de acero usados en la estructura. Trata aspectos de seguridad en condiciones adecuadas de utilización e incluye también aspectos de durabilidad de acuerdo con el DB-SE.

En él se describen las bases de los parámetros de cálculo necesarios para el cumplimiento del DB-SE.

- EUROCÓDIGO 3:

Este documento ha sido seguido por el programa de cálculo para realizar las comprobaciones de estabilidad y resistencia, aunque son muy similares a las que exige el CTE.

### 3.3 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.

En este apartado se van a explicar las partes que forman la cubierta que se va a calcular y los materiales de los cuales está hecha.

Para comenzar se va a definir un sistema de ejes globales (XYZ) al cual se va a hacer referencia durante la memoria:

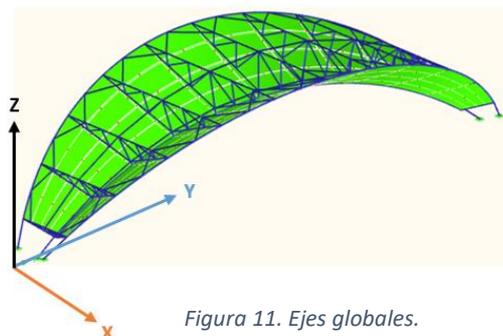


Figura 11. Ejes globales.

En segundo lugar, se van a definir los materiales que componen la estructura. Como la cubierta está formada de barras y membranas tensadas, las barras van a ser de acero estructural S 275 JR y la membrana va ser de PVC.

- El acero tiene las siguientes propiedades mecánicas principales:

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				ACERO S 275 JR	
	Tensión de límite elástico $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )			Tensión de rotura $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )		
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100		
S235JR					Módulo de elasticidad	210 GPa
S235J0	235	225	215	360	Módulo de cortante	81 GPa
S235J2					Coefficiente de Poisson	0,296
S275JR					Peso específico	78,5KN/m3
S275J0	275	265	255	410	Coefficiente de dilatación térmica	1,2 e-5
S275J2						

Tabla 1. Propiedades mecánicas acero

- La membrana de PVC tiene las siguientes propiedades:

PVC	
Módulo de elasticidad	3250 MPa
Módulo de cortante	1121 MPa
Coefficiente de Poisson	0,45
Peso específico	13,9 KN/m3
Coefficiente de dilatación térmica	7,5 e-5
Tensión de rotura	80 MPa

Tabla 2. Propiedades PVC.

A continuación, se van a mostrar las diferentes partes que componen la cubierta, y que posteriormente serán modelados en RFEM para realizar el cálculo.

- **ARCOS**

Son los elementos principales de la cubierta. Como se ha visto en la introducción, actúan como estructura portante y en ellos se sostiene y se apoya la membrana tensada. La cubierta se compone de tres arcos principales, que se encargan de transmitir todos los esfuerzos al terreno, y de dos arcos más encargados de dar rigidez a la estructura y de punto de apoyo para la membrana.

En los arcos 1 y 2, se sostiene la membrana, mientras que el arco 3, sirve de sujeción para el arco 4, que sirve de último punto de la membrana. El arco 5 sirve para rigidez a la estructura frente a esfuerzos en el eje Y.

El material usado para los cinco arcos que componen la cubierta va a ser un acero estructural *S 275 JR*.

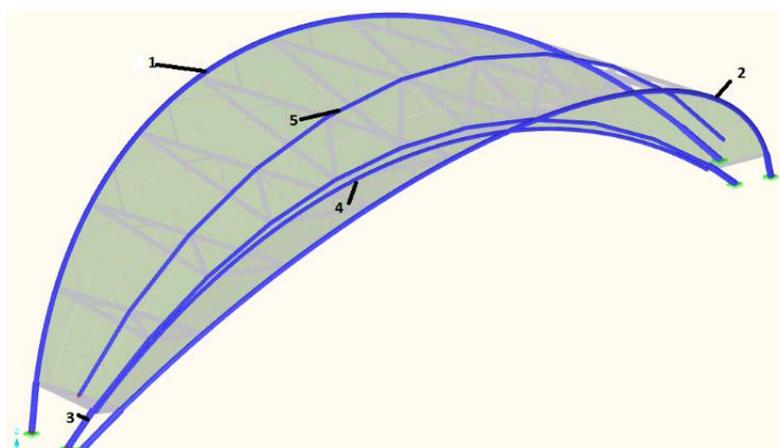


Figura 12. Arcos

- **MEMBRANA**

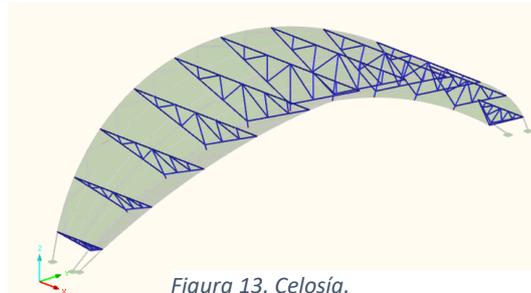
Es el elemento principal de la cubierta. Se encarga de proteger a los espectadores situados en las gradas. De acuerdo a la clasificación descrita en la introducción, se trata de una membrana que tiene como elemento básico un arco. Se encuentra anclada a los arcos laterales (1, 2 y 4) mediante una unión rígida.

El material elegido para la membrana ha sido PVC, debido a sus buenas propiedades, tanto de resistencia como de protección contra agentes externos, impermeabilidad, resistencia al fuego, durabilidad, confort acústico y térmico, transparencia lumínica y facilidad de limpieza. Satisfaciendo las exigencias de estabilidad, estanqueidad y aislamiento que las cubiertas o cerramientos tradicionales.

- CELOSÍA

Es la estructura formada por cordones, diagonales y montantes, que en este caso se encarga de soportar los esfuerzos que genera la pretensión de la membrana haciendo que los arcos de la cubierta tiendan a juntarse.

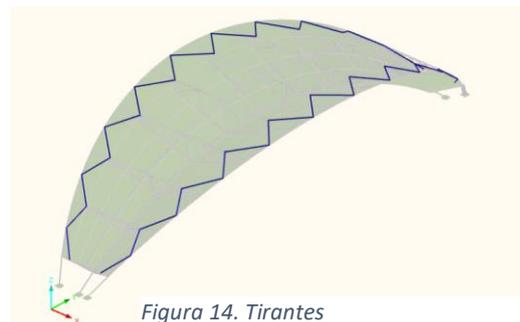
Todas las barras que forman la celosía van a ser de un acero *S 275 JR*.



- TIRANTES

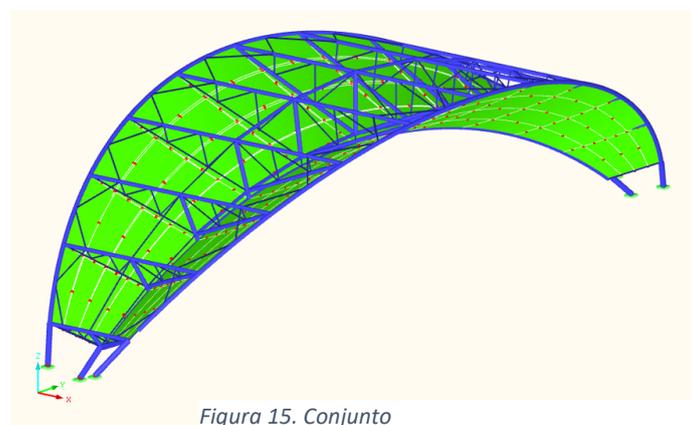
Son los elementos que unen los arcos laterales con las diferentes cerchas dispuestas a lo largo de la cubierta. Su principal función es dar rigidez frente a esfuerzos en dirección longitudinal (eje Y) y reducir la longitud de pandeo de los arcos 1 y 2.

Del mismo modo que los arcos y la celosía, los tirantes también estarán formados de acero *S 275 JR*.



- CONJUNTO

Uniendo los diferentes elementos constructivos anteriormente descritos, obtenemos el conjunto de la cubierta. Posteriormente se darán las diferentes condiciones de contorno para su cálculo en RFEM.



## 4 MODELO DE CÁLCULO EN RFEM

---

Una vez descritas las diferentes partes que forman la cubierta del proyecto, es necesario modelar todos estos elementos constructivos en el programa de elementos finitos que se va utilizar para el análisis, que como ya se ha comentado, va a ser RFEM.

### 4.1 MODELADO DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

El primer paso va a ser modelar la estructura portante formada por barras. Todas las barras que componen la cubierta van a tener una sección circular hueca, esto es debido a que este tipo de secciones aguantan los esfuerzos flectores mejor que las secciones macizas y nos permiten un ahorro de material notable. Además, al tener simetría, no tienen un eje más débil a pandeo, lo cual es positivo ya que se prevé que el pandeo sea fundamental en el cálculo.

Para comenzar, se van a introducir con unas secciones aleatorias y una vez se realicen las primeras simulaciones con la estructura cargada, se buscará aquellas secciones de las barras que soporten las cargas, es decir, que cumplan las comprobaciones de resistencia y estabilidad, y que nos permitan optimizar el material. Todas las barras que componen la estructura van a estar unidas mediante nudos rígidos y el material del que están formadas es el descrito en el apartado anterior, *S 275 JR*.

Un aspecto importante a la hora de modelar la estructura va a ser como van a definirse los arcos laterales y el arco número 4. Estos van a ser modelados en el programa como arcos, y no como barras rectas, aunque en su futura construcción estarían formados por barras rectas. Esto es una simplificación geométrica a la hora de modelar, que nos va a permitir introducir la estructura en RFEM de una manera más sencilla y a su vez generar la superficie de la membrana de manera correcta. Se ha optado por esta simplificación ya que no va a traer a penas diferencias en los resultados y nos va a aportar facilidad para generar toda la geometría de la estructura.

Una vez modeladas todas las barras que componen la estructura solo faltaría introducir la membrana encargada de proteger a los espectadores. Para su modelado se va a usar una superficie cuadrangular. Este tipo de superficie de RFEM describe una superficie general trilateral o cuadrilateral. Las líneas de contorno pueden ser líneas rectas, pero también pueden ser arcos, poli líneas o splines.

Estas superficies cuadrangulares usadas para su modelado, serán de tipo membrana, y el material del que estarán formadas será de PVC, con un espesor de 1 mm, como ya se ha explicado anteriormente. Puesto que se trata de una cubierta de membranas tensadas, a la membrana se le va a aplicar una pretensión inicial de 5 KN/m, y puesto que tiene un espesor de 1mm, esta pretensión equivale a 5 MPa.

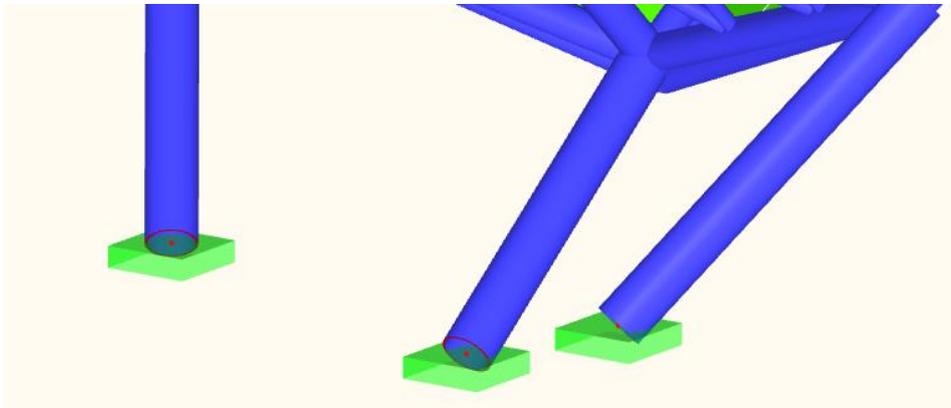
Una vez se cargue la estructura y se realicen las primeras simulaciones, se buscará que todas las barras cumplan las comprobaciones de resistencia y estabilidad, y se buscará una optimización de las mismas, con el fin de que la estructura trabaje de forma óptima con el menor material posible.

## 4.2 CONDICIONES DE APOYO

Una vez establecida la geometría junto con las secciones de los diferentes tipos de barras y la membrana, todo con sus respectivos materiales, queda dar las condiciones de apoyo del modelo.

En este caso, la única condición de contorno del modelo es que la cubierta debe transmitir todos sus esfuerzos al suelo. En este proyecto no se contempla el estudio ni el cálculo de las zapatas y cimentación necesaria para la estructura. Por eso es necesario indicar al programa que puntos se encuentran empotrados en el suelo.

Para ello, se deben dar una serie de condiciones de contorno a los nudos que estarán en contacto con el suelo. Esos nudos, y los nudos del otro lado de la cubierta, son los indicados en la figura:



*Figura 16. Nudos empotrados*

La condición de contorno asignada es la de apoyos en nudos, empotrados. Es decir, se restringe el movimiento y el giro en los tres ejes.

### 4.3 MALLADO

El mallado es una de las partes más importantes a la hora de usar programas de elementos finitos. La malla está formada por un conjunto de elementos finitos conectados entre sí por nodos. Por lo tanto, cuantos más nodos existan y menor sea el tamaño de los elementos, más precisión tendrán los resultados. Pero, por el contrario, más ecuaciones existen y más se tarda en calcular. Por eso hay que buscar un equilibrio entre precisión de los resultados y coste computacional.

Una vez se ha modelado toda la cubierta en RFEM, y configuradas las condiciones de contorno, se debe proceder a su mallado. Como nuestra estructura está compuesta por barras y membranas tensadas, la malla que se va a usar va a estar únicamente formada por elementos 1D, para los elementos barras, y elementos 2D para la superficie que forma la membrana.

Los elementos pueden tener diferentes formas, cuadrangulares o triangulares. En nuestro caso se van a usar elementos finitos triangulares para los elementos 2D, ya que para poder ejecutar el módulo de búsqueda de forma de la membrana tensada que se estudiará y se explicará después, es necesario configurar los elementos finitos triangulares. Pese a modificarlo, para las superficies no se pueden usar elementos cuadrangulares en este software, el generador de malla inserta por defecto elementos triangulares.

Por lo tanto el mallado de la cubierta está formado por 2819 elementos 1D de elementos barras y 15144 elementos 2D de la membrana, todos ellos elementos finitos triangulares.

En las siguientes figuras se puede observar el mallado que se ha realizado en la membrana (elementos triangulares):

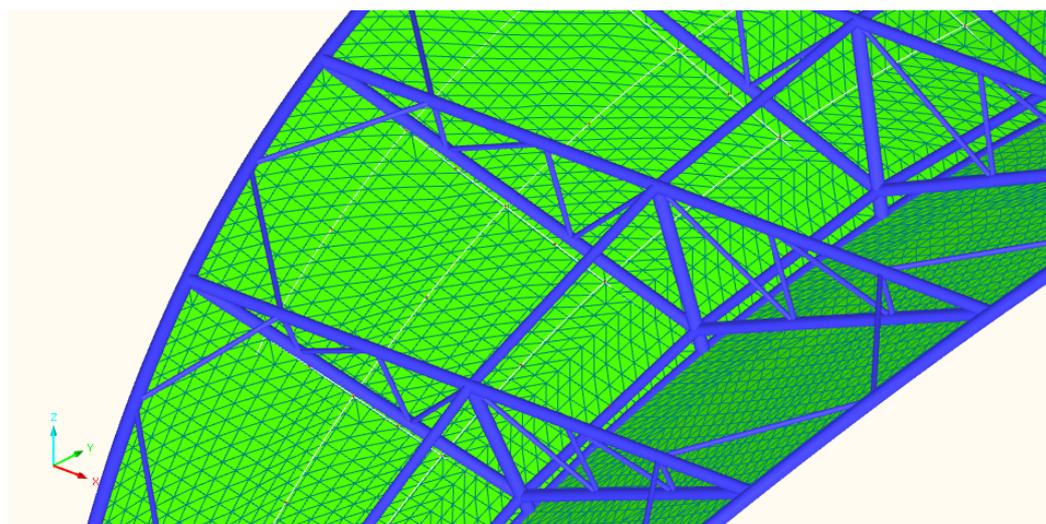


Figura 17. Malla de elementos finitos.

## 5 BÚSQUEDA DE FORMA

Una vez se ha obtenido el modelado de la cubierta en RFEM, el siguiente paso es conseguir tensar la membrana. Para ello, RFEM cuenta con un módulo adicional llamado RF-FORM-FINDING, en el cual busca la forma de estructuras sujetas a tracción o compresión como estructuras de membranas y cables.

A partir de un pretensado específico y una carga adicional como el peso propio, el programa calcula la forma óptima que debe tener la membrana tensada. Esta nueva forma pretensada será la que use el programa como estado inicial para el resto del análisis estructural, donde se incluyen los casos y combinaciones de carga.

Como se ha explicado anteriormente, este módulo adicional trabaja con elementos triangulares, por lo que para que pueda ejecutarse la malla de elementos finitos debe estar configurada con este tipo de elementos

Una vez se ejecuta el programa, este nos muestra resultados habituales como deformaciones, esfuerzos y tensiones. La búsqueda de forma que se ha obtenido para la cubierta, con las secciones ya optimizadas y que se detallarán posteriormente, ha sido la siguiente:

En cuanto a las deformaciones, son mayores en el centro de las membranas, puesto que es donde más afecta el peso propio al estar lejos de los apoyos.

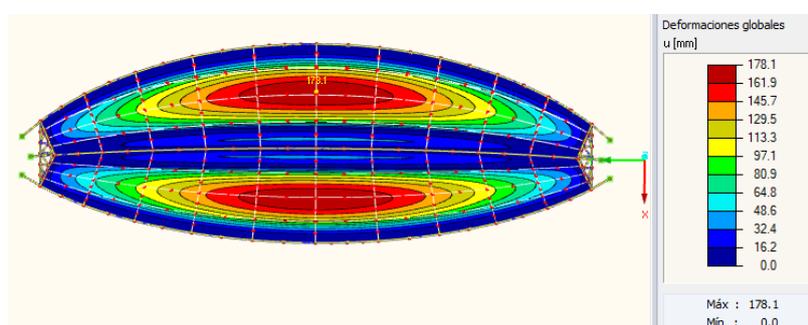


Figura 18. Deformaciones globales en la búsqueda de forma.

Por otra parte, las tensiones que se generan en el tensado de la membrana se transmiten a los arcos que la sostienen. Estas tensiones se aprecian en la siguiente figura:

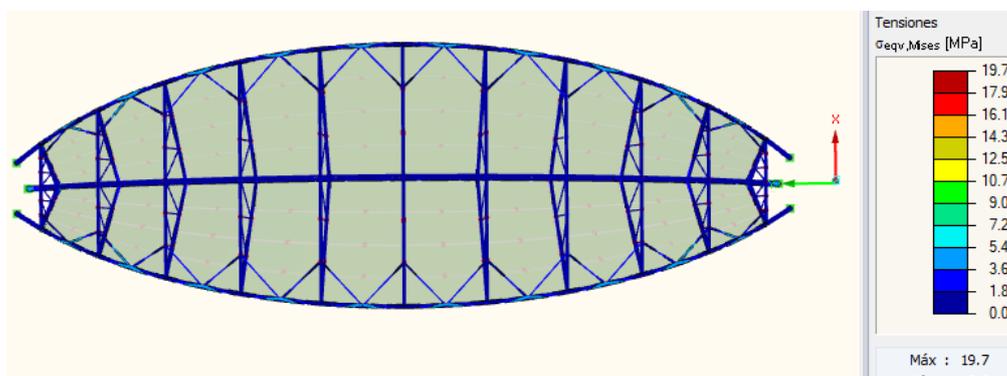


Figura 19. Tensión de Von Mises en las barras.

Las tensiones máximas están en los tres arcos que sujetan la membrana, sobre todo en el inferior.

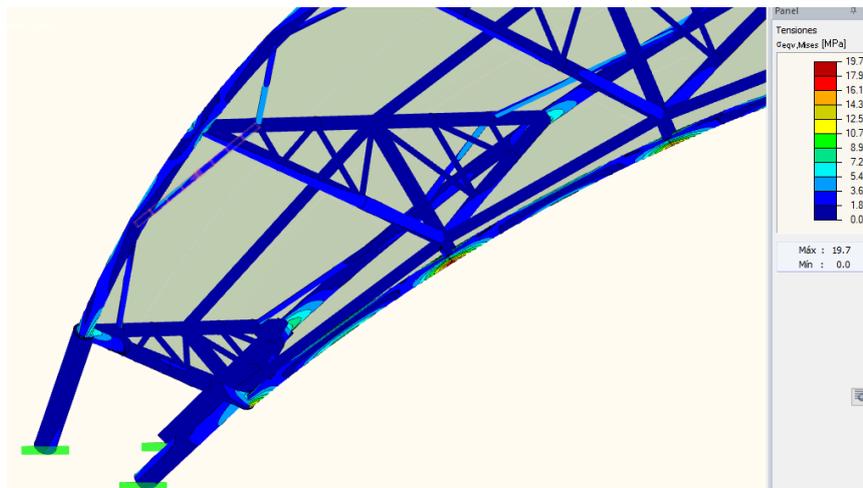


Figura 20. Detalle de las tensiones.

Por otro lado, las tensiones que se generan en la membrana son iguales a la pretensión aplicada previamente de 5 MPa:

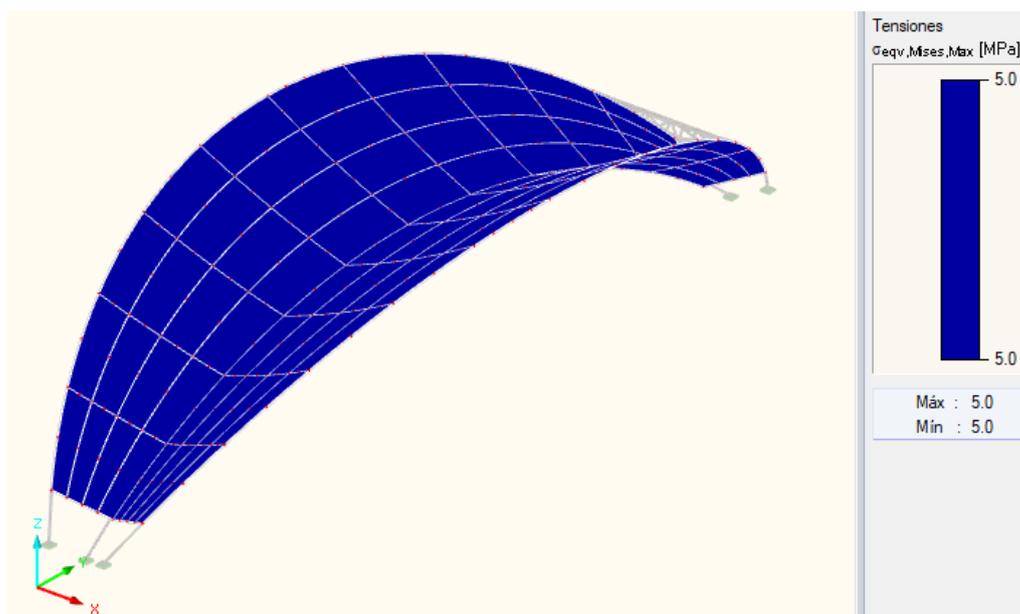


Figura 21. Tensiones (Google imagenes, 2021)de la membrana en la búsqueda forma.

## 6 APLICACIÓN DE LAS CARGAS

---

Una vez se ha tensado la membrana ya se pueden aplicar las diferentes cargas que actúan en la estructura. Las cargas que van a actuar sobre la cubierta son las de peso propio, nieve y viento. De acuerdo a la normativa del DB-SE-AE, diferenciamos acciones permanentes y variables. Dentro de las primeras encontramos el peso propio, y dentro de las segundas la nieve y el viento. La sobrecarga de uso no se ha considerado por ser su valor inferior al del resto de cargas variables y no ser concomitante con éstas.

### 6.1 PESO PROPIO

En este grupo de carga permanente se tiene en cuenta el peso propio de todas las barras que componen la estructura, así como el peso de la membrana. Para introducir este caso de carga y para que el programa tenga en cuenta el peso de todas las barras y la membrana en las diferentes hipótesis y anteriormente en la búsqueda de forma, basta con activar el peso propio al incluir el caso de carga en la dirección – Z.

Una vez activado e incluido, el programa calcula automáticamente el peso que tienen las barras y la membrana tensada. Se podría calcular con el peso específico de ambos materiales, el del acero y el del PVC (Peso específico acero = 78,5 KN/m<sup>2</sup> y peso específico PVC = 13,9 KN/m<sup>2</sup>), y en función del volumen que ocupan las diferentes barras y el total de la membrana obtendríamos el peso propio de toda la estructura.

### 6.2 NIEVE

La nieve es un caso de carga de acciones variables y depende de la situación geográfica del edificio (relieve, clima, tipo de precipitación, parámetros térmicos...). Esta carga se ha calculado de acuerdo al artículo 3.5 del DB-SE-AE. Como valor de carga de nieve por unidad de superficie en proyección horizontal,  $q_n$ , puede tomarse:

$q_n = \mu \cdot S_k$ ; donde  $\mu$  es coeficiente de forma de la cubierta (según 3.5.3) y  $S_k$  el valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal según (3.5.2)

El proyecto se va a ubicar en Madrid, España, que tiene una altitud de 660m, por lo tanto, en el apartado 3.5.2 de la normativa y de acuerdo a la *Tabla 3.8 Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas*, podemos tomar  $S_k$  igual a 0,6 KN/m<sup>2</sup>. Por otro lado, el coeficiente de forma lo obtenemos del artículo 3.5.3, y tomará el valor de  $\mu = 1$ . De este modo, ya se puede calcular la sobrecarga de nieve:

$$q_n = \mu \cdot S_k = 1 \cdot 0,6 \text{ KN/m}^2 = \underline{0,6 \text{ KN/m}^2}$$

Esta sobrecarga de nieve, se va incluir únicamente en la membrana. La carga de nieve en las barras de la cubierta, tanto en los arcos como en los cordones superiores de las celosías, se considera despreciable frente a la carga de nieve que recibe la membrana, que es la gran parte de la superficie de la cubierta. Se considera despreciable por la diferencia de superficie entre barras y membrana, y por la facilidad de que la nieve resbale por las barras a la membrana.

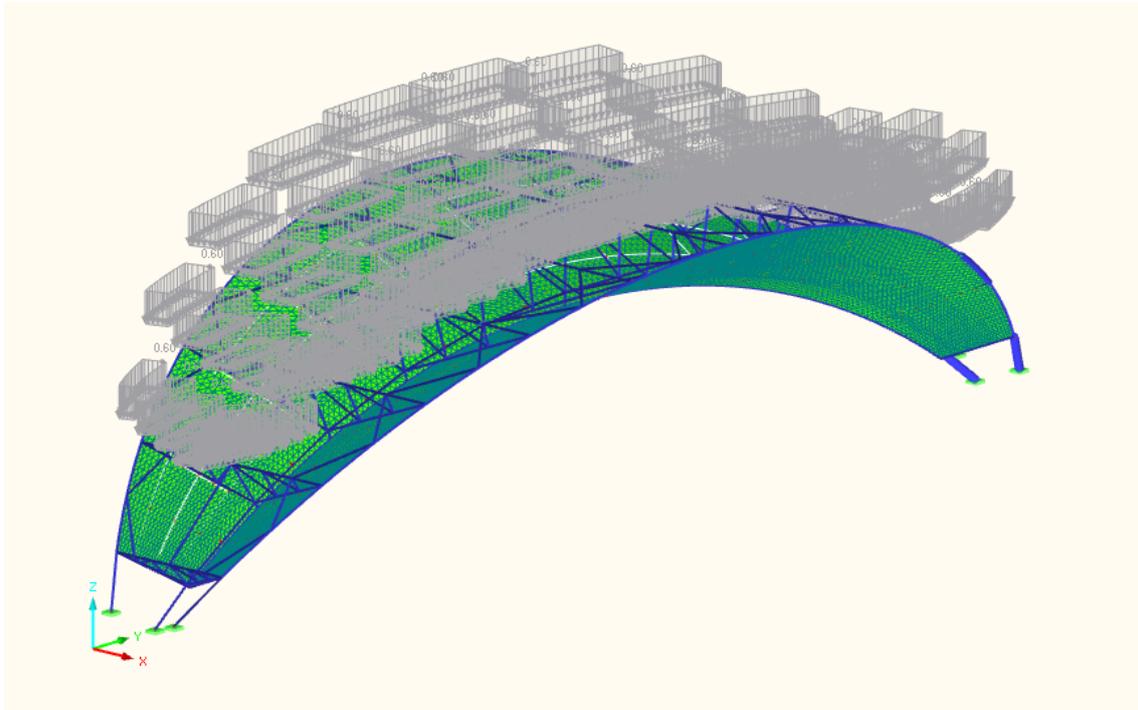


Figura 22. Carga de nieve.

### 6.3 VIENTO

El viento es la otra carga variable que afecta a la estructura, de acuerdo al DB-SE-AE, se trata de una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto. En este caso el cálculo de esta carga no es trivial, puesto no se trata de una estructura normalizada en el CTE como pueden ser las naves o edificios convencionales.

Para llevar a cabo el cálculo de esta carga se va a hacer uso de otro módulo externo de *Dubal* llamado RWIND, que nos va a permitir estimar siempre desde el lado de la seguridad la carga de viento que afecta a la cubierta.

RWIND es un programa que realiza simulaciones numéricas de flujos de viento, lo que viene siendo un túnel de viento, pero digital. Genera un flujo sobre edificios, objetos o la geometría que se incluya en el modelo y genera una carga de viento, es decir unas fuerzas, sobre ellos.

Para llevar a cabo la simulación, RWIND usa una malla sólida con elementos 3D. El programa realiza un mallado automático donde es posible establecer la densidad de malla y donde podemos configurar un refinamiento local, como en la mayoría de programas de elementos finitos. También, RWIND usa un solucionador numérico para flujos turbulentos incompresibles con el objetivo de calcular los flujos de viento y las presiones superficiales en el modelo.

Una vez se lleva a cabo la simulación en RWIND, el programa nos muestra un gran abanico de soluciones, desde el coeficiente de presión  $C_p$ , presiones, líneas de viento, campo de velocidades, vectores velocidad...etc.

La forma de calcular la carga de viento a través de RWIND consta de dos partes. En la primera parte, se ha realizado un cálculo donde se ha llevado a cabo un análisis del modelo en el túnel de viento digital, obteniendo todos tipos de resultados. La segunda parte del cálculo, consiste en extrapolar los resultados a RFEM, esto consiste en realizar una analogía a lo que plantea el CTE para edificios convencionales. Se basa en dividir la membrana en diferentes secciones, y con los resultados obtenidos en la simulación de túnel de viento asignar a cada área una carga en función de los resultados obtenidos, siempre del lado de la seguridad.

Dentro del gran abanico de resultados que nos da el programa, se va a utilizar la presión que genera el viento sobre la membrana para extrapolar los resultados. La presión que se genere en cada trozo de membrana, será la que se incluirá en el modelo de RFEM.

Para la carga de viento se van a realizar tres casos de carga en diferentes direcciones, un caso con viento a  $0^\circ$ , otro a  $45^\circ$  y finalmente otro a  $90^\circ$ , el sentido será indiferente puesto que la cubierta es simétrica tanto en el eje X como en el eje Y. Por lo tanto, es necesario simular estos tres casos en RWIND. Para ello se introducirá el modelo y se colocará en las tres direcciones y posteriormente se simulará, teniendo así tres simulaciones diferentes.

Simulando en las tres direcciones indicadas, se obtienen los siguientes resultados:

- Simulación VIENTO 0°:

En esta simulación el viento incide en dirección +X (resultados idénticos para la dirección -X por simetría), pasando el aire a través de los apoyos de la cubierta y generando una presión hacia arriba (dirección +Z) en la primera membrana, tendiendo a arrancar la membrana de los cimientos.

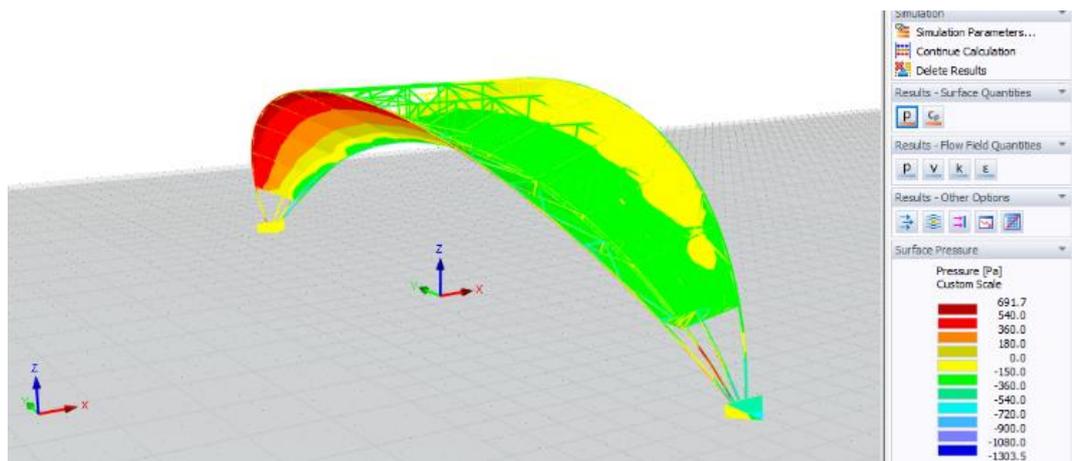


Figura 23. Simulación viento 0° en RWIND.

A partir de los resultados mostrados en la figura anterior, se va extrapolar siempre del lado de la seguridad a RFEM. Para ello es necesario tener en cuenta cómo actúa el viento, ya que este puede generar presión y succión a ambos lados de la membrana. Cuando, por ejemplo, por encima existe succión y por debajo presión, se deben sumar las presiones. Si por el contrario existe succión por encima de la membrana y succión por debajo, las presiones se deberán restar.

Todo el cálculo que se ha llevado a cabo se encuentra detallado en el ANEXO II. CÁLCULO CARGA DE VIENTO.

Finalmente, la carga de viento en dirección X a 0° es la mostrada en la siguiente figura, donde las cargas positivas se toman en dirección +Z y las negativas en dirección -Z:

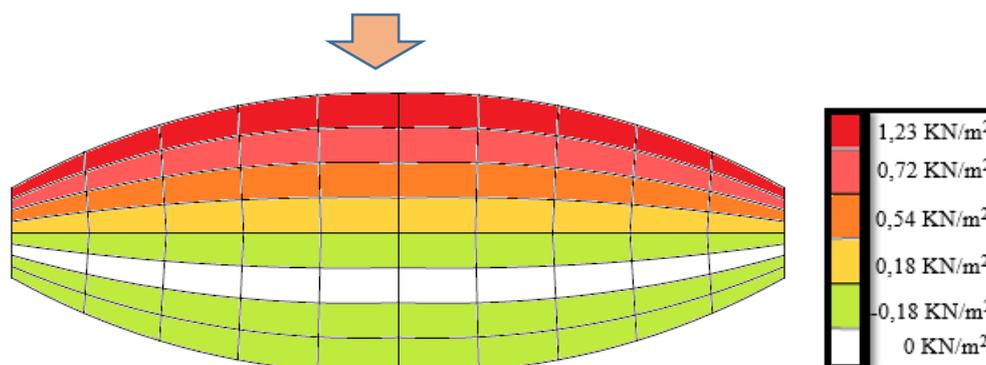


Ilustración 1. Esquema carga de viento 0°.

Incorporando todos estos datos en RFEM, obtenemos el caso de carga de viento a 0°:

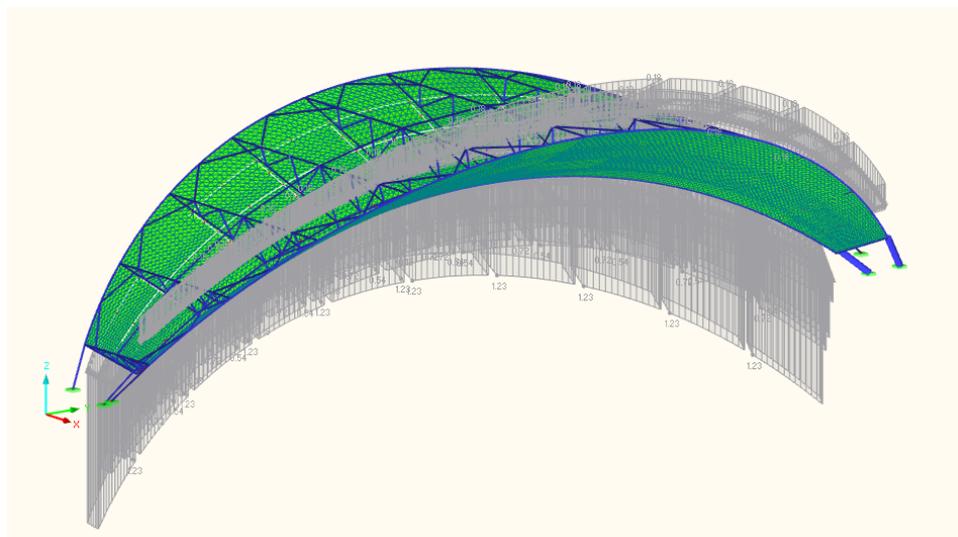


Figura 24. Carga de viento 0°

- Simulación VIENTO 45°:

En esta simulación el viento incide con un ángulo de 45° sobre la cubierta, (resultados idénticos para dirección -45° por simetría), es decir, se va a colocar la cubierta en el túnel de viento girada 45° respecto a la anterior simulación.

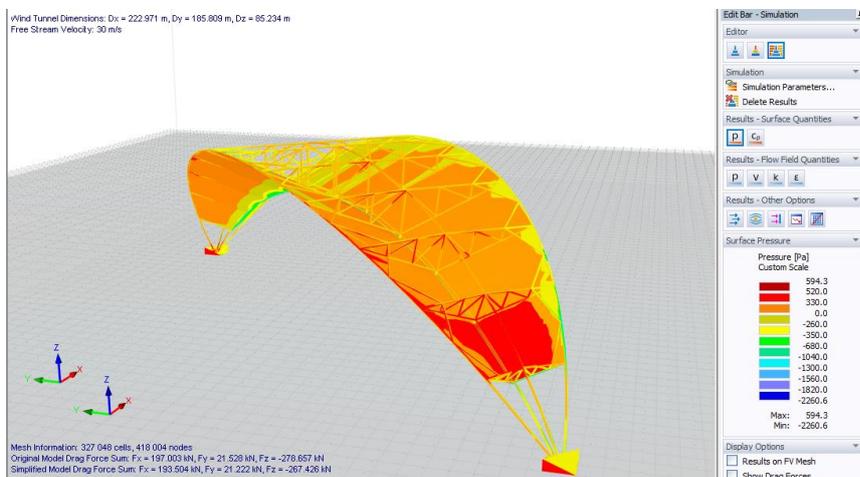


Figura 25.. Simulación viento 45° en RWIND.

A partir de los resultados mostrados en la figura anterior, se va extrapolar siempre del lado de la seguridad a RFEM, como se explica en el ANEXO II. CÁLCULO CARGA DE VIENTO.



- Simulación VIENTO 90°:

En esta simulación el viento incide en dirección +Y (resultados idénticos para la dirección -Y por simetría), pasando el aire a través de la celosía. Colocando en esa dirección la estructura en RWIND, obtenemos los siguientes resultados:

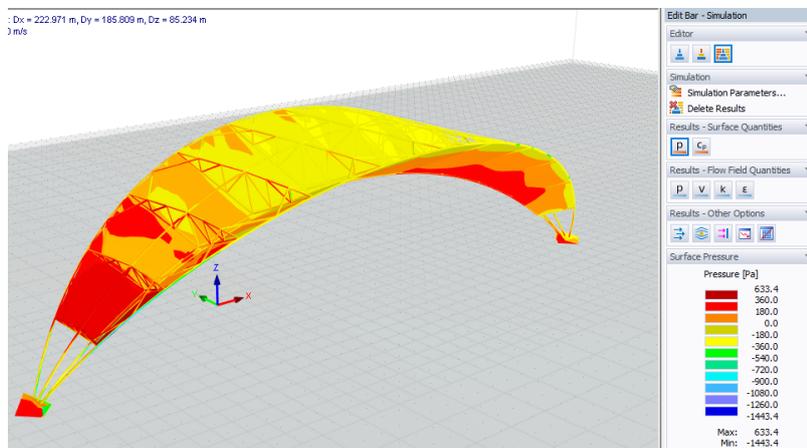


Figura 27.. Simulación viento 90° en RWIND.

A partir de los resultados mostrados en la figura anterior, y como se ha hecho en los dos casos anteriores, se va extrapolar siempre del lado de la seguridad a RFEM. El proceso de extrapolación se encuentra detallado en el ANEXO II. CÁLCULO CARGA DE VIENTO.

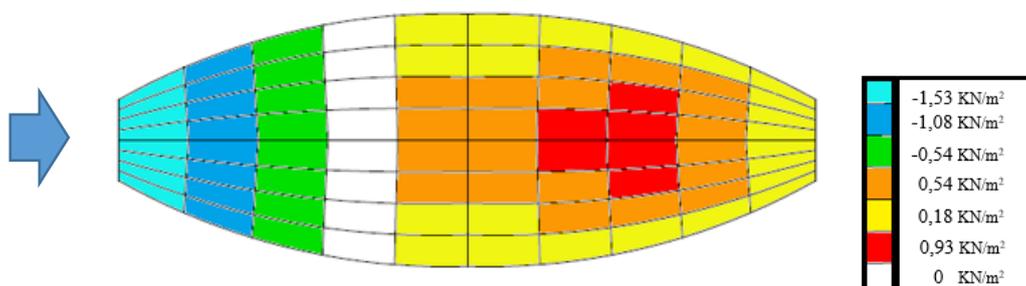


Ilustración 3. Esquema carga de viento 90°.

Para finalizar, incluimos este último caso de carga En RFEM, de la misma manera que se ha hecho anteriormente:

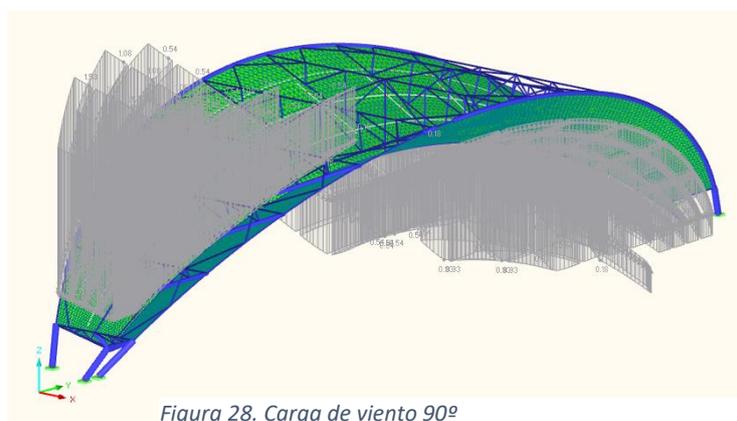


Figura 28. Carga de viento 90°

## 7 COMBINACIONES DE CARGA

En este apartado se combinarán los casos de carga definidos en el apartado anterior, y se realizarán verificaciones de Estado Límite Último (ELU) y de Estado Límite de Servicio (ELS).

En primer lugar, los estados límite últimos son los que, de ser superados, constituyen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta fuera de servicio de la estructura o el colapso total o parcial de la misma. Existen tres situaciones de estudio de acuerdo al CTE: situación persistente o transitoria, situación extraordinaria y una situación donde la acción accidental sea la acción sísmica.

En este caso se han elaborado diferentes combinaciones correspondientes únicamente a una situación persistente o transitoria para comprobaciones de resistencia, y se determinarán mediante combinaciones de acciones a partir de la expresión:

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

Donde cada uno de los parámetros mostrados en la expresión son los siguientes:

- $\gamma_{G,j}$  : Coef. parcial para acciones permanentes
- $G_{k,j}$  : Acciones permanentes
- $\gamma_P$  : Coef. parcial para acciones de pretensado
- $P$  : Acción de pretensado
- $\gamma_{Q,1}$  : Coef. parcial para acción variable predominante
- $Q_{k,1}$  : Acción variable predominante
- $\gamma_{Q,i}$  : Coef. parcial par acciones variables no predominantes
- $\psi_{0,i}$  : Coeficiente para valor de combinación
- $Q_{k,i}$  : Otras acciones variables

Los valores de los coeficientes de seguridad ( $\gamma$ ), se establecen en la tabla 3 para cada tipo de acción, atendiendo para comprobaciones de resistencia a si su efecto es desfavorable o favorable, considerada globalmente.

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

Tabla 3. Coeficientes parciales de seguridad para las acciones

Por su parte, los valores de los coeficientes de simultaneidad, ( $\psi$ ), se establecen en la tabla 4.

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

Tabla 4. Coeficientes de simultaneidad

Por tanto, las combinaciones de ELU se determinan considerando la actuación simultánea de todas las acciones permanentes, donde los coeficientes parciales de seguridad usados serán  $\gamma_G = 1,35$ ; una acción variable cualquiera con un coeficiente  $\gamma_Q = 1,5$ ; y el resto de las acciones variables, en valor de cálculo de combinación, es decir, multiplicando por esas acciones variables por sus coeficientes de seguridad y simultaneidad. Estos últimos serán  $\psi_0 = 0,5$  para la nieve y  $\psi_0 = 0,6$  para el viento.

De tal manera, se han obtenido las siguientes combinaciones de carga, todas ellas recogidas en la siguiente tabla con sus correspondientes coeficientes para ELU, con el fin de encontrar la combinación de acciones más desfavorables y a partir de ella justificar el cumplimiento de cada uno de los elementos constructivos de acuerdo a la norma.

HIPÓTESIS	CASOS DE CARGA				
	ACCIÓN PERMANENTE	ACCIONES VARIABLES			
	PESO PROPIO	VIENTO 0º	VIENTO 45º	VIENTO 90º	NIEVE
CO1	1,35				
CO2	1,35	1,5			
CO3	1,35		1,5		
CO4	1,35			1,5	
CO5	1,35	1,5			0,75
CO6	1,35		1,5		0,75
CO7	1,35			1,5	0,75
CO8	1,35				1,5
CO9	1,35	0,9			1,5
CO10	1,35		0,9		1,5
CO11	1,35			0,9	1,5
CO12	0,8				
CO13	0,8	1,5			
CO14	0,8		1,5		
CO15	0,8			1,5	
CO16	0,8	1,5			0,75
CO17	0,8		1,5		0,75
CO18	0,8			1,5	0,75
CO19	0,8				1,5
CO20	0,8	0,9			1,5
CO21	0,8		0,9		1,5
CO22	0,8			0,9	1,5

Tabla 5. Combinaciones de carga ELU.

Una vez definidas las hipótesis para ELU, es necesario plantear una hipótesis para Estado Limite de Servicio. Esta combinación de carga nos permitirá realizar las comprobaciones de servicio.

Para ELS encontramos tres tipos de combinación: combinación denominada de tipo característica, de tipo denominado frecuente y finalmente, tipo denominado casi permanente. En nuestro caso solo se van a realizar combinaciones del tipo casi permanente que incluyen los efectos debidos a las acciones de larga duración. Se va a calcular esta combinación ya que nos permitirá realizar la comprobación de servicio donde se deberá cumplir que, ante cualquier combinación de acciones casi permanente, la flecha relativa es menor que 1/300.

Esta combinación se calculará a partir de la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

- $G_{k,j}$  : Acciones permanentes
- $P$  : Acción de pretensado
- $\psi_{2,i}$  : Coef. para valor cuasipermanente
- $Q_{k,i}$  : Acciones variables

Con todas las combinaciones de carga ya calculadas, el modelo para llevar a cabo el cálculo estaría completamente definido.

## 8 SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

---

Una vez se tiene el modelo completo implantado en RFEM, así como las diferentes combinaciones de carga, se puede llevar a cabo la simulación y obtener los primeros resultados que nos van a servir de punto de partida para llevar a cabo el análisis de la estructura. Los perfiles con los que se ha iniciado el modelado no tenían en cuenta ninguna carga, únicamente se han planteado para poder introducir el modelo en RFEM y poder trabajar con él, por lo tanto, no tenían ninguna validez. Es ahora cuando se van a buscar los perfiles más adecuados para el diseño y el cálculo de la estructura.

A partir de los primeros resultados se va a buscar mediante un proceso iterativo los perfiles de las barras que cumplan las comprobaciones de resistencia, estabilidad y servicio (ELS), y que optimicen de forma notable el material.

Se trata de una estructura sumamente compleja; donde ver, entender y analizar cómo está trabajando el conjunto de la estructura no es trivial. Por eso necesario la ayuda de un programa de elementos finitos que nos ayude con el cálculo de todo tipo de resultados.

RFEM cuenta con un módulo para proyectos de acero, RF- STEEL EC3, que nos permite realizar el cálculo de barras de acero según el Eurocódigo 3, realizando las comprobaciones de manera similar al CTE. De este modo, y con la ayuda de RFEM, se van a realizar las comprobaciones de resistencia y estabilidad de todas las barras. El único problema viene con los arcos que definen la membrana, que como se ha comentado anteriormente se han definido en el modelo como arcos. Esto hace que el programa calcule todas las comprobaciones de resistencia, pero no la comprobación a pandeo puesto que no considera las barras totalmente rectas.

Por lo tanto, esta comprobación de estabilidad se ha calculado manualmente pero únicamente para los arcos laterales, ya que el arco interior 4 que también ha sido definido como arco no tiene apenas esfuerzos en comparación con los otros dos arcos interiores, y como tendrán la misma sección, las barras que lo forman van a cumplir las comprobaciones de estabilidad.

El cálculo de la comprobación de estabilidad para los arcos laterales se encuentra recogido en el ANEXO III. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD ARCOS LATERALES. De la misma forma, pero más adelante, se realizará la comprobación de servicio de la estructura.

Análogamente, RFEM calculará las comprobaciones de resistencia y estabilidad para todas las barras de la estructura. Todas estas comprobaciones se van a llevar a cabo considerando un caso de carga envolvente, es decir, todas las comprobaciones de las barras se van a realizar con los esfuerzos más desfavorables de la estructura sin importar el caso de carga del que vengan.

Esto nos hace estar del lado de la seguridad, aunque quizás las secciones elegidas para las barras no acaben de ser las óptimas. En este caso, como se trata de una estructura no habitual y en la que se van a albergar debajo de ella cientos de espectadores es preferible estar siempre del lado de la seguridad.

Otro aspecto importante a la hora de proyectar una estructura y sus partes, es que se debe elegir un modelo estructural conveniente. Las clases I y II se refieren al cálculo plástico de estructuras, mientras que la clase III se refiere al cálculo elástico. En nuestro caso, y siguiendo del lado de la seguridad, aunque los perfiles utilizados son de clase 1, se va a dimensionar como si fueran de clase 3, no permitiendo plastificación de las secciones.

Una vez se haya estudiado que las barras cumplen todas las comprobaciones de acuerdo al CTE, hay que ver si la sección elegida está trabajando de una forma óptima, es decir, ver si el cociente entre la tensión existente y la tensión límite es cercano a la unidad o por el contrario está cerca del 0 y no se está aprovechando bien todo el material, y por consecuencia, es preferible usar una sección más pequeña. A esta relación de tensiones la vamos a definir como factor de aprovechamiento del material, y se obtendrán dos relaciones de tensiones, una de resistencia y otra de estabilidad.

En este caso se va a intentar tener un factor de aprovechamiento del material superior al 0,75 pero sin llegar a valores superiores a la unidad, ya que supondría que la barra no estaría cumpliendo las comprobaciones de resistencia y estabilidad. Estos factores de aprovechamiento de la sección, son otro parámetro que RFEM nos muestra para cada barra. Así pues, podemos ver que barras están trabajando de una manera más exhaustiva y que barras apenas están trabajando.

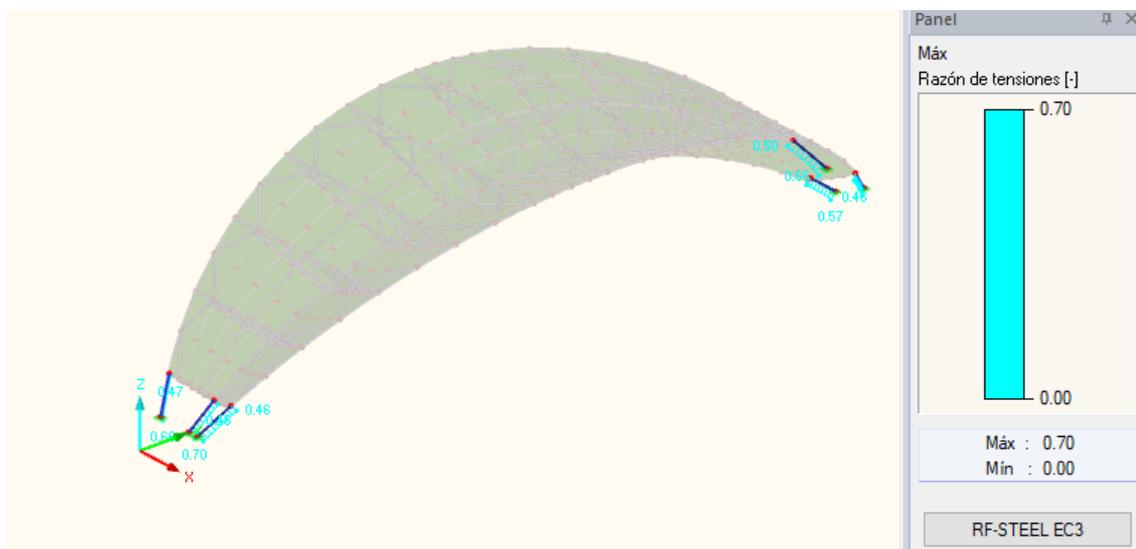


Figura 29. Razón de tensiones mostrada por RFEM.

De esta manera, viendo que las comprobaciones de resistencia y estabilidad cumplen y que las relaciones de tensiones se encuentran en los valores que deseamos, estaríamos diseñando la estructura con el diseño óptimo.

Uno de los problemas que se nos plantea es la presencia de momentos torsores en cálculo. La normativa actual no indica claramente cómo el esfuerzo torsor influye en la resistencia a pandeo. El programa RFEM propone, por defecto, que si la tensión tangencial debida a torsión no supera el 5% de la tensión tangencial máxima que resiste el material, no se tenga en cuenta el torsor en las comprobaciones de pandeo.

Todo esto que se acaba de comentar, quiere decir que RFEM nos advierte de la presencia de tensiones tangenciales debidas al torsor ligeramente altas y que debemos ser nosotros si queremos considerarlos o no.

Para ello se debe elevar esa relación entre la tensión tangencial debida a momento torsor existente y la tensión límite que RFEM fija en el 5% para calcular, a la que nos muestra el programa en la comprobación CS131. De esta manera, RFEM nos realizará todos los cálculos de resistencia y estabilidad correctamente.

Teniendo todo esto en cuenta, se va a trabajar con otro factor de aprovechamiento definido por la relación comentada de tensiones tangenciales debidas al momento torsor. Esto nos ayudará a saber si basta con subir la relación de RFEM para que realice los cálculos o por el contrario es preferible poner otra sección con una tensión tangencial límite mayor.

Finalmente, la última comprobación que nos faltaría por hacer sería la comprobación de pandeo global. Este fenómeno es el pandeo que se produce a escala general sin que los componentes estructurales tengan cada uno su carga de pandeo.

Este estudio se va a llevar a cabo con el módulo de RFEM, RF- STABILITY. En este módulo no se permite realizar la comprobación con la hipótesis de carga evolvente, y en este caso se va a realizar con la hipótesis C06 que es una de las más desfavorables.

## 8.1 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DE LOS PERFILES.

Como ya se ha comentado, este proceso es uno de los más importantes del proyecto, en él se va a buscar tener un aprovechamiento notable del material con el objetivo de reducir gastos a la hora de su fabricación y del montaje.

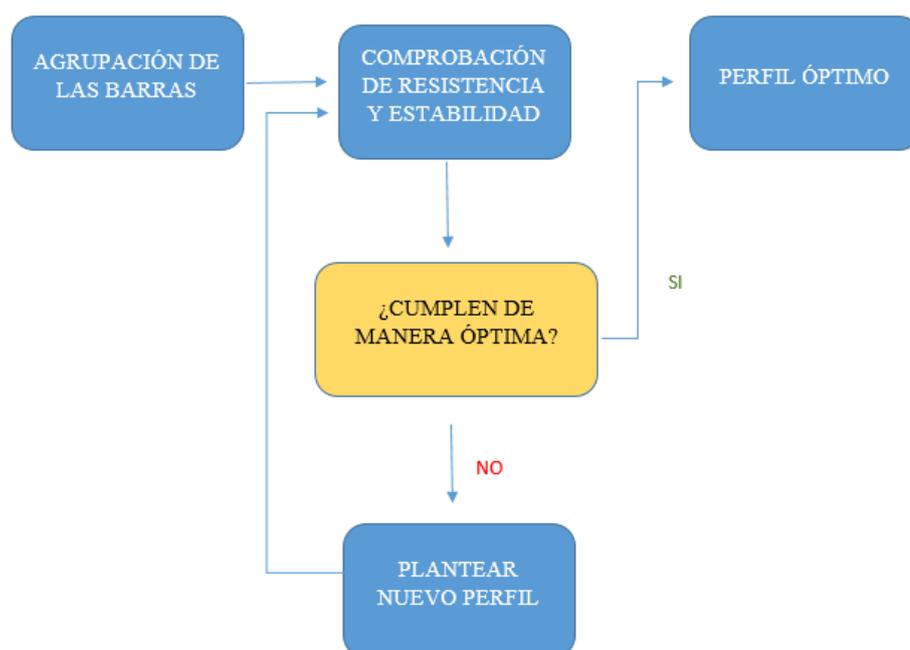
De esta manera, una vez se realice la simulación de todas las hipótesis de carga ya planteadas se va a llevar un proceso para seleccionar los perfiles más adecuados. A partir de la primera simulación, se entenderá como está funcionando la estructura y se podrá llevar a cabo una búsqueda de perfiles óptimos.

El procedimiento que se va a seguir para llevar a cabo esa búsqueda de perfiles óptimos va a consistir en lo siguiente:

- 1- Agrupación de barras que van a tener el mismo perfil y que trabajan de forma similar.
- 2- Comprobación de resistencia y estabilidad de las barras propuestas.
- 3- Planteamiento de nuevas secciones que aprovechen mejor el material
- 4- Perfiles seleccionados.

El proceso de optimización se ha realizado únicamente haciendo las comprobaciones de resistencia y estabilidad, ya que se espera que ELU sea lo más restrictivo. Posteriormente, una vez optimizados los perfiles, se ha comprobado que se cumplen ELS y pandeo global.

En el siguiente esquema se muestra el proceso que se va a llevar a cabo para la selección de los perfiles adecuados.



Esquema 1. Proceso de optimización seguido.

El primer paso para llevar a cabo la selección de todas las barras de la estructura es realizar un agrupamiento de aquellas barras que trabajan de forma similar y que por lo tanto se van a diseñar con el mismo perfil, que como se ha explicado en apartados anteriores va a ser de sección circular hueca y de acero S 275 JR. En un principio, se diferenciaron 3 grupos de barras, los arcos, la celosía y los tirantes. Ahora se van a realizar diferentes divisiones dentro de estos grupos. No es factible realizar muchísimas divisiones dentro de la estructura puesto que el proceso de diseño y cálculo sería aún más laborioso, y a la hora de llevar a cabo su montaje también sería mucho más costoso.

Algo también importante es que se va a buscar que todas las secciones finalmente propuestas tengan unos espesores similares, ya que para realizar su construcción es bueno que tengan espesores similares para soldaduras, anclajes, etc.

Para esta cubierta se han diferenciado 7 grupos de barras que trabajan de forma similar y donde las cargas son similares. Los grupos que se han definido son los siguientes:

- **ARCOS:**

Dentro del primer bloque que se había definido previamente, se han diferenciado tres tipos de barras que trabajan de forma similar.

- 1- **Barras de apoyo:** Son las barras que actúan como “patas” de la estructura. Soportan las mayores cargas y tendrán los perfiles más grandes dentro de la estructura. No están definidos como arcos, sino como barras rectas.

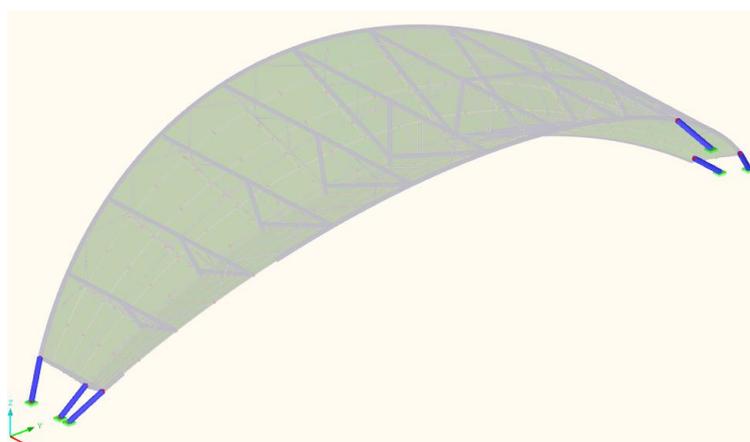


Figura 30. Barras de apoyo.

- 2- Arcos laterales: Son los arcos en los que sostiene la membrana y serán los encargados de transmitir las cargas de esta al resto de la estructura de barras. Están definidos como arcos dentro del programa (aunque en un futuro se construyan como barras rectas, dando la sensación de arco) por lo que posteriormente la comprobación de pandeo se calculará manualmente.

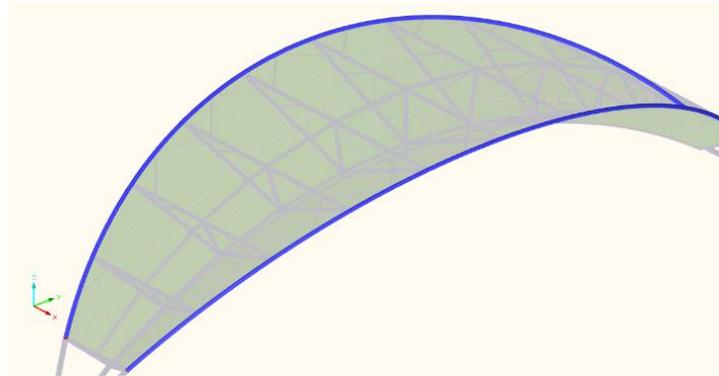


Figura 31. Arcos laterales.

- 3- Arcos Interiores: Son los arcos que dan rigidez a la celosía y donde se juntan las membranas. Se han definido como barras rectas dando sensación de arco.

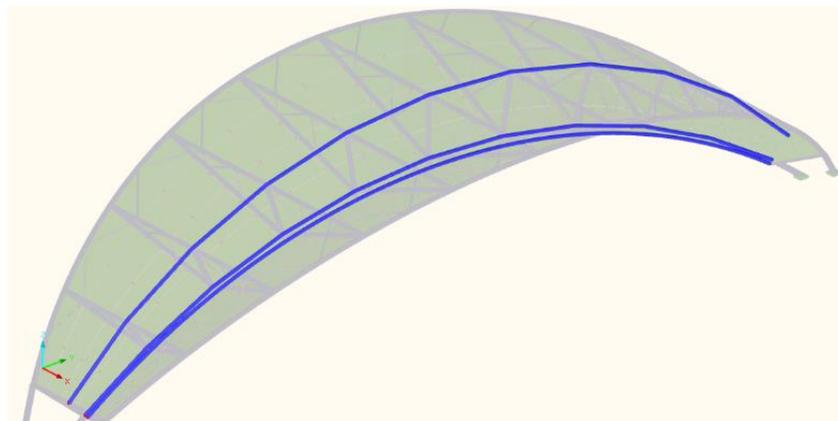


Figura 32. Arcos interiores.

- CELOSIA

Dentro de este bloque previamente definido, siempre se diferencian las tres partes de una celosía; cordones, diagonales y montantes. En este caso y tras ver en las primeras simulaciones como trabaja la celosía, se han diferenciado tres tipos de barras:

- 4- Montantes centrales: trabajan principalmente con esfuerzos más altos que el resto de montantes y en los situados a los laterales de la cubierta existen momentos torsores altos. Por eso es necesario diferenciarlos del resto de montantes.

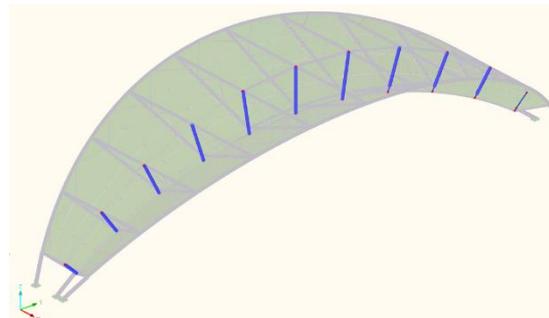


Figura 33. Montantes centrales

- 5- Diagonales y montantes: Son el resto de diagonales y montantes que no están solicitados a esfuerzos tan altos y su sección podrá reducirse respecto a los anteriores.

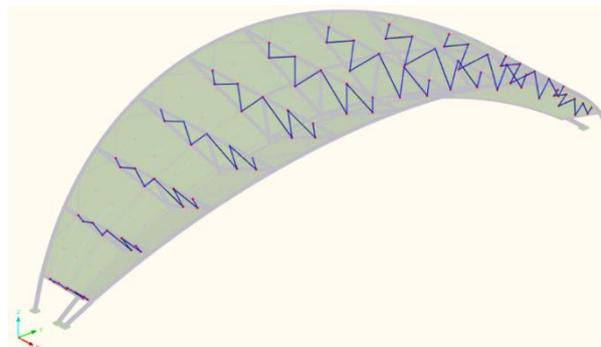


Figura 34. Diagonales y montantes.

- 6- Cordones: Son los cordones de la celosía y trabajan de diferente manera que diagonales y montantes, por lo que deberán tener una sección diferente.

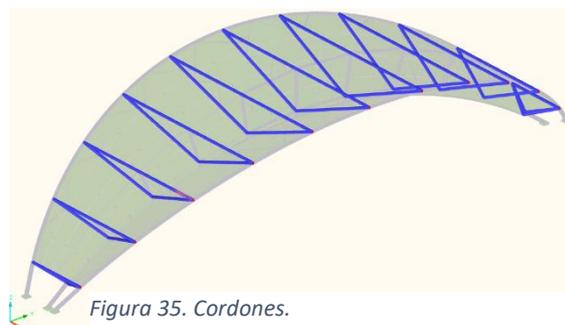


Figura 35. Cordones.

- TIRANTES

Este grupo se definió previamente y en esta ocasión no se van a considerar diferentes subgrupos pese a que los tirantes laterales van a estar solicitados a más carga:

- 7- Tirantes: son los definidos previamente y trabajan principalmente con esfuerzos axiales, siendo estos bastante altos en los laterales de la cubierta.

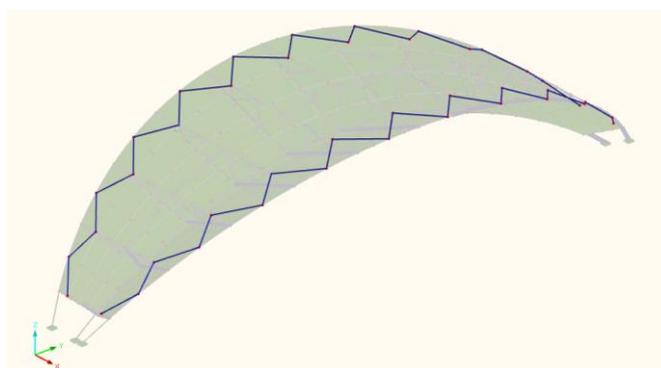


Figura 36. Tirantes

Una vez divididas todas las barras en diferentes subgrupos que trabajan de forma similar, y viendo los esfuerzos a los que están sometidas cada una de ellas podemos diseñar de nuevo todas las barras y realizar las comprobaciones de resistencia y estabilidad.

Por lo tanto, ejecutando el módulo adicional RF- STEEL EC3 para cada grupo de barras, se van a realizar las comprobaciones de resistencia y estabilidad de todas las barras, a excepción de los arcos laterales que como se ha comentado se ha hecho un cálculo manual que se encuentra en el ANEXO III. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD ARCOS LATERALES.

Cuando se verifique que las barras cumplen todas las comprobaciones de acuerdo al CTE, veremos si esa sección elegida está trabajando de una forma óptima, de no ser así se volverán a planear nuevos perfiles.

Una vez se tengan todas las barras diseñadas y con todas las comprobaciones hechas, se ejecutará el módulo de RFEM, *RF- STABILITY*, para realizar la última comprobación de pandeo global.

Finalmente, cuando se consiga todo esto, el proyecto habrá abarcado el cálculo y el diseño de la estructura cumpliendo con toda la normativa presentada.

## 9 RESULTADOS

Con todos los aspectos explicados anteriormente para llevar el diseño final de las barras que componen la estructura, ya podríamos abordar la selección de los perfiles más óptimos.

A continuación, se muestra una tabla resumen donde se incluyen los perfiles seleccionados para cada subgrupo de barra creado, el material que los mismos y los factores de aprovechamiento de resistencia, de estabilidad (pandeo) y torsión.

GRUPO	SECCIÓN	MATERIAL	RESISTENCIA	PANDEO	TORSIÓN
BARRAS DE APOYO	RO 508 x 20	S 275 JR	0,93	0,63	0,07
ARCOS LATERALES	RO 355,6 x 20	S 275 JR	0,74	0,88	0,07
ARCOS	RO 273 x 20	S 275 JR	0,77	0,42	0,07
MONTANTES CENTRALES	RO 323,9 x 20	S 275 JR	0,73	0,42	0,22
DIAGONALES Y MONTANTES	RO 139,7 x 10	S 275 JR	0,8	0,31	0,08
CORDONES	RO 323,9 x 20	S 275 JR	0,77	0,56	0,1
TIRANTES	RO 139,7 x 10	S 275 JR	0,62	0,86	

Tabla 6. Barras seleccionadas y coeficientes de aprovechamiento.

Como se puede observar, la optimización de las barras es correcta ya que al menos uno de los factores se encuentra en el rango deseado (0,75 – 0,95), excepto en el caso de los montantes centrales. Esto se debe a que no existe una sección más pequeña que cumpla todos los requisitos.

### - BARRAS DE APOYO:



Figura 37. Razón de tensiones de resistencia mostrada por RFEM para las barras de apoyo.

- ARCOS LATERALES

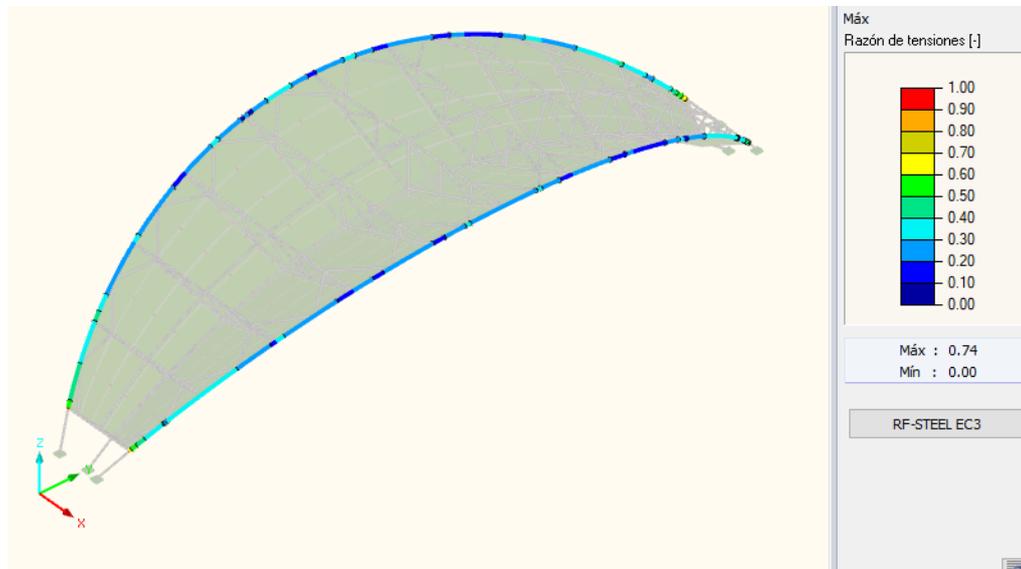


Figura 38. Razón de tensiones de resistencia mostrada por RFEM para los arcos laterales..

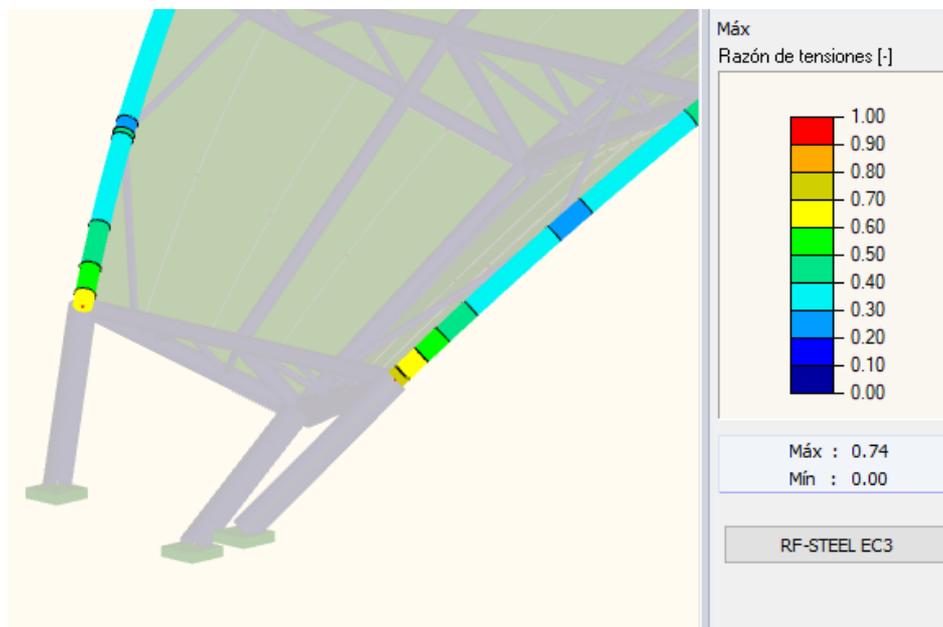


Figura 39. Detalle figura 38

Dentro de los arcos, las barras que más están trabajadas son las que se encuentran en los laterales. Esto se debe a que son las barras más cercanas a las barras de apoyo que son en las que recaen todos los esfuerzos para transmitirlos al suelo. Estas barras son las comprobadas manualmente en el ANEXO III, ya que son las que tienen los esfuerzos más altos.

- ARCOS INTERIORES

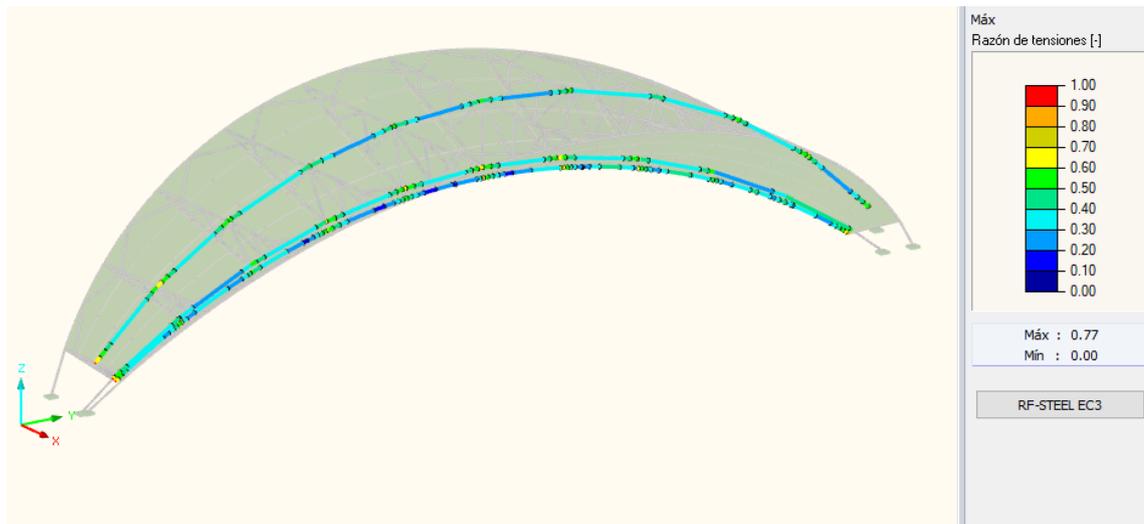


Figura 40. Razón de tensiones de resistencia mostrada por RFEM para los arcos interiores..

- MONTANTES CENTRALES

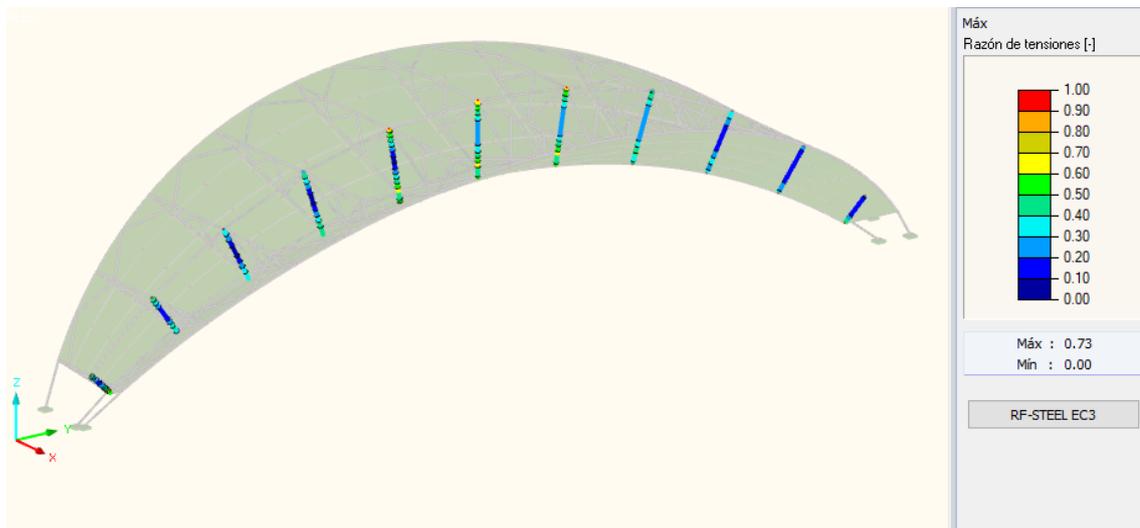


Figura 41. Razón de tensiones de resistencia mostrada por RFEM para los montantes centrales

Los montantes centrales situados en la mitad de la estructura tienen una sollicitación mayor, esto nos indica que se podría realizar una segunda optimización de este grupo, diferenciando entre los montantes centrales situados en la mitad de la estructura y los situados en los laterales.

- DIAGONALES Y MONTANTES

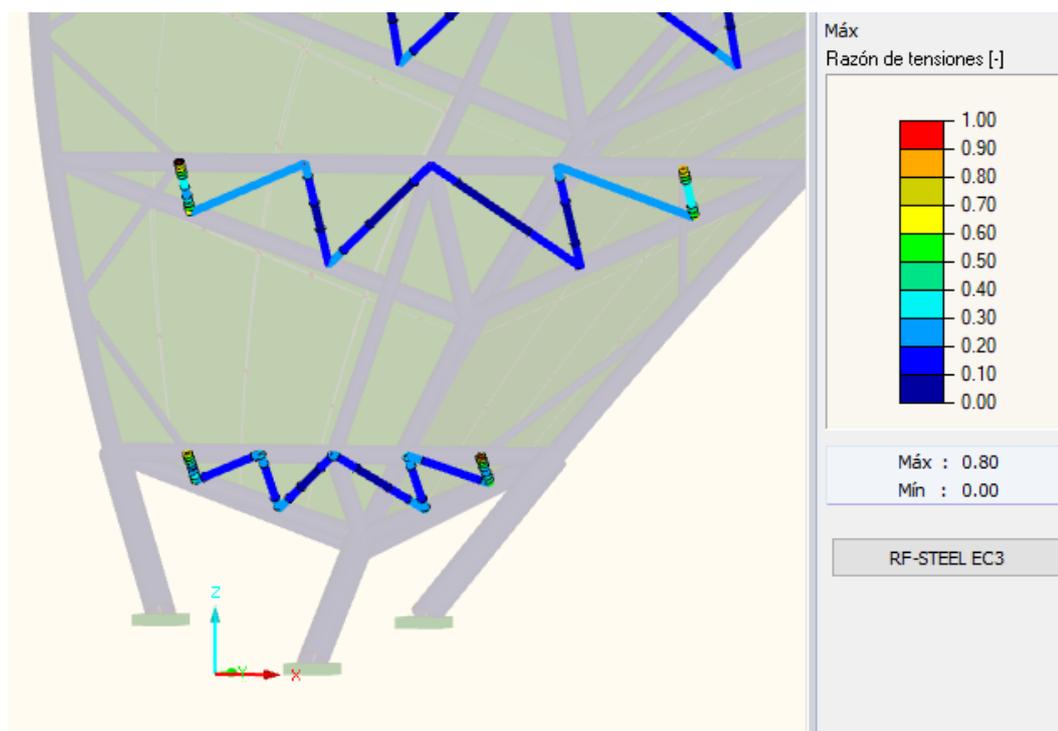


Figura 42. Razón de tensiones de resistencia mostrada por RFEM para diagonales y montantes.

En las diagonales y montantes se observa que los montantes más solicitados son los que se encuentran cerca de los arcos laterales, esto se debe a que son los primeros en soportar las fuerzas que hacen los arcos laterales que tienden a plegarse.

- CORDONES

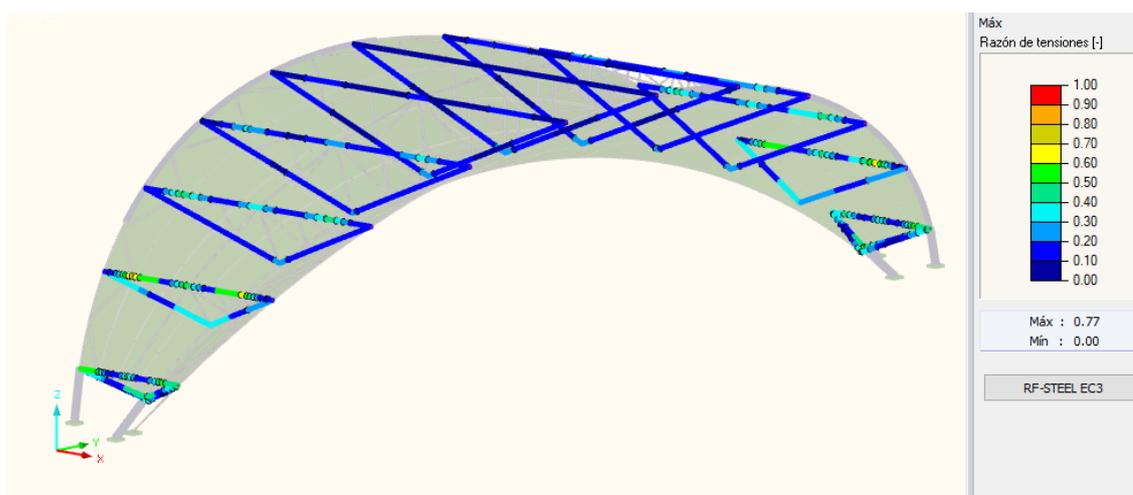


Figura 43. Razón de tensiones de resistencia mostrada por RFEM para los cordones.

De nuevo los cordones más solicitados son los superiores situados a los laterales de la estructura por el efecto de plegado que transmiten los arcos laterales.

- TIRANTES

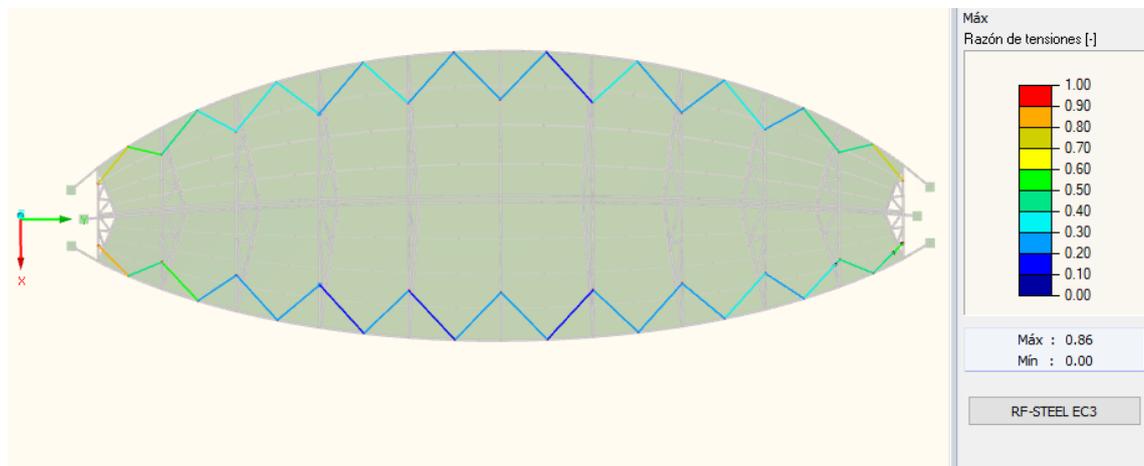


Figura 44. Razón de tensiones de resistencia mostrada por RFEM para los tirantes.

Una vez más las barras más solicitadas son las situadas en los laterales.

Como puede verse en la mayoría de los diferentes grupos existen muchas barras que no se encuentran trabajando de forma óptima. Se podría llevar a cabo una segunda fase de optimización volviendo a repetir los pasos mostrados en el punto 8. Esto traería ventajas de ahorro de material y por consecuencia coste, pero por el contrario sería complicado llevar a cabo el montaje de la estructura.

Una vez visto que todas las barras cumplen las comprobaciones de resistencia y estabilidad, se va a analizar la comprobación de servicio en ELS. Para ello se debe cumplir que el desplazamiento vertical sea menor que  $1/300$  y el desplazamiento horizontal sea menor que  $1/250$  ante cualquier combinación de acciones casi permanente.

De esta manera podemos ver que los desplazamientos más grandes son de  $-41,1\text{mm}$  en el eje Z, que frente a los  $70\text{m}$  de luz que tiene la cubierta hace que la relación sea menor que la relación establecida por el CTE.

Por otra parte, el desplome o desplazamiento horizontal de la cubierta es de  $11,2\text{mm}$  y se da en el eje Y, que frente a los  $11,5\text{m}$  de altura de la cubierta hace que la relación sea también menor que la relación establecida por el CTE. Estos desplazamientos máximos se pueden ver en las siguientes figuras:

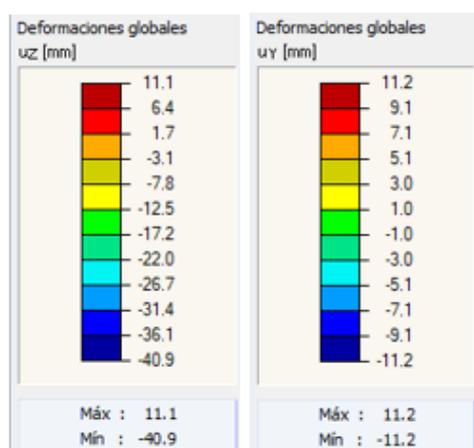


Figura 45. Desplazamientos máximos en ELS casi permanente.

A continuación, se muestran los resultados de los desplazamientos globales para una combinación de carga de ELS casi permanente de la cubierta, así como la deformada (mostrada multiplicada por un factor de 120 para apreciar cómo se está deformando):

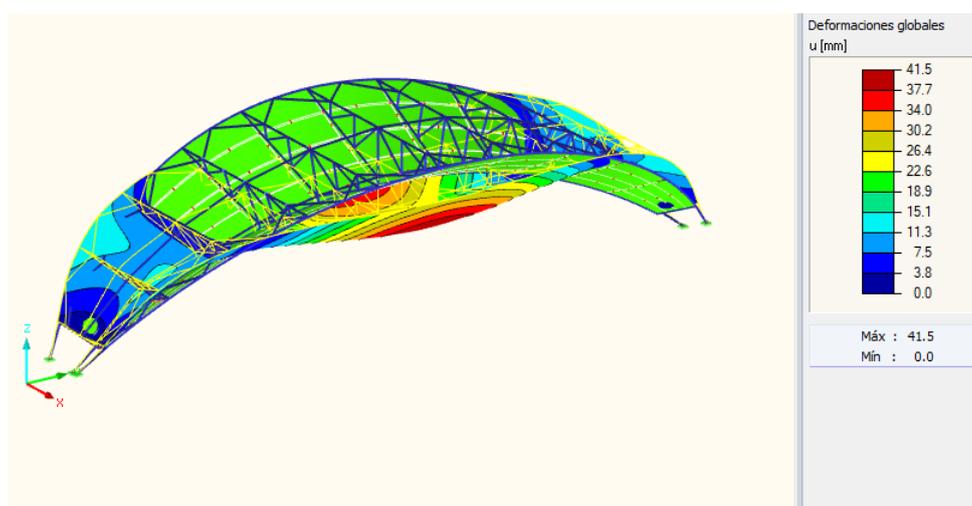


Figura 46. Desplazamientos globales

Realizadas todas las comprobaciones en cuanto a las barras se refiere, el siguiente paso es estudiar cómo se comporta la membrana. Para ello se van a analizar las tensiones que está soportando en el caso más desfavorable que va a ser la evolvente:

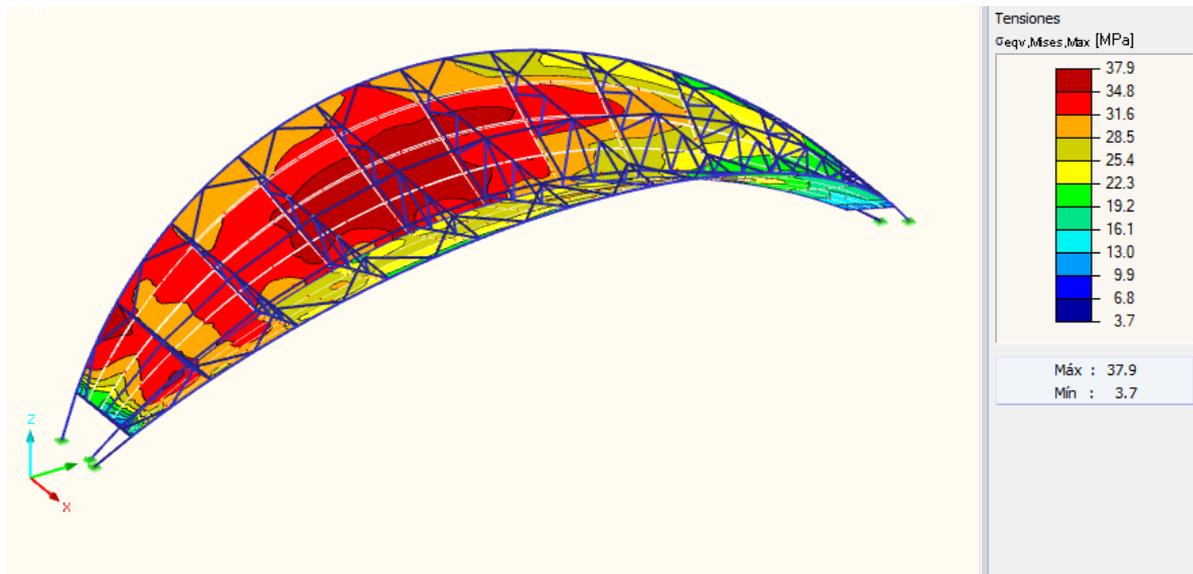


Figura 47. Tensiones en la membrana.

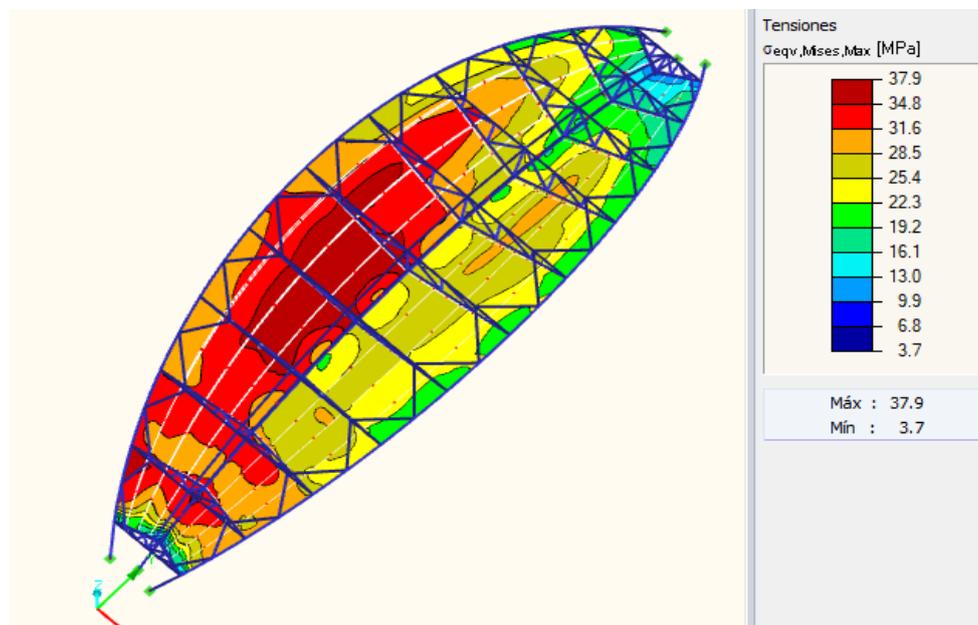


Figura 48. Tensiones en la membrana (2).

Como se puede ver en ambas figuras, la tensión máxima que está soportando es de 37,9 MPa, esta tensión estaría por debajo de la tensión de rotura que sería de 80MPa, es decir, se está trabajando con un coeficiente de seguridad de 2.

La última comprobación que nos faltaría por analizar sería la comprobación de pandeo global. Este fenómeno es el pandeo que se produce a escala general sin que los componentes estructurales tengan cada uno su carga de pandeo.

Este estudio se va a llevar a cabo con el módulo de RFEM, *RF-STABILITY*. En este módulo no se permite realizar la comprobación con la hipótesis de carga envolvente, y en este caso se va a realizar con la hipótesis C06 que es una de las más desfavorables.

Los resultados obtenidos con este análisis son los siguientes:

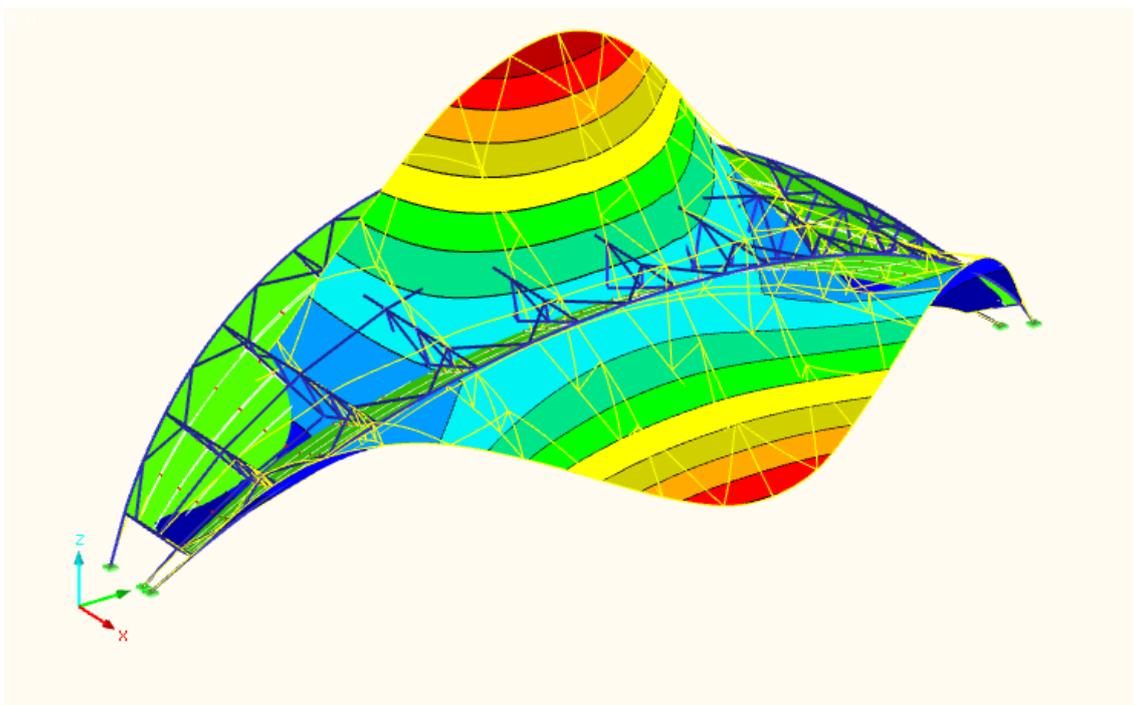


Figura 49. Resultados obtenidos del pandeo global.

Valor pr. núm.	A	B
	Factor de carga crítica f [-]	Coef. de amplificación $\alpha$ [-]
1	6.305	1.188
2	6.702	1.175
3	8.068	1.141
4	8.213	1.139

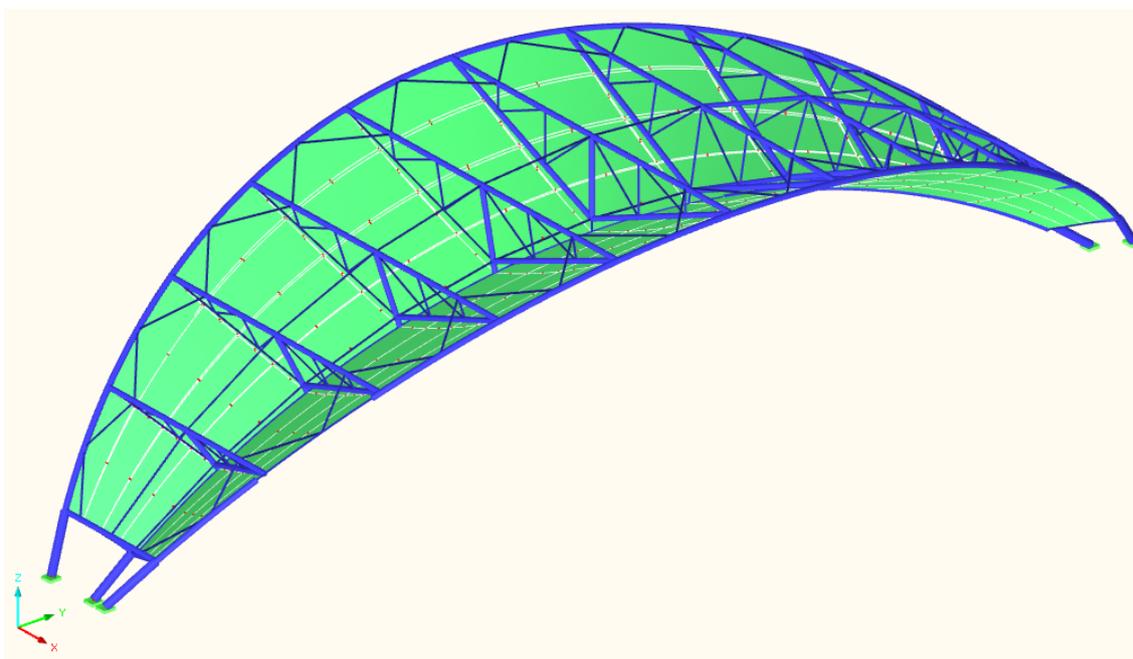
Figura 50. Factores de carga crítica en el pandeo global.

La estructura no pandeo globalmente puesto que para que exista el pandeo global se debe tener un factor menor que 1 y en este caso se cuenta con un factor de carga crítica de 6,3, esto significa que se necesitaría aumentar las cargas 6,3 veces para que existiera pandeo global.

De esta manera se habrían visionado los resultados más significativos de la simulación con RFEM. Como se ha podido ver, toda la estructura cumple todas las comprobaciones y cuenta con un diseño óptimo para su funcionamiento.

Por lo tanto, quedan definidos todos los materiales y perfiles que componen la estructura portante de barras y del mismo modo también quedan definidos el material de la membrana. Respecto a esta, se ha incluido un *ANEXO IV. PROPIEDADES MEMBRANA PVC*, donde se incluyen algunos aspectos relevantes de sus propiedades (muchas ya comentadas genéricamente en la introducción), confección y montaje.

Con todo esto el diseño de la cubierta estaría completado. A continuación, se muestra una imagen del diseño final y sobre el que se han mostrado todos los resultados mostrados a lo largo de la memoria.



## 10 CONCLUSIONES

---

Tras mostrar el procedimiento seguido para el diseño y cálculo de la cubierta para un futuro estadio mediante elementos finitos, se llega a la conclusión de que, tras realizar todas las comprobaciones de resistencia, estabilidad y servicio de la estructura portante de barras, y ver como la membrana trabaja con un coeficiente de seguridad de 2 en el caso más desfavorable, el diseño de la estructura es correcto.

Todos los elementos que componen la cubierta cumplen con la normativa como ha podido comprobarse a lo largo de los cálculos durante el proyecto, y por ello, al tener valores de tensiones y deformaciones inferiores a los admisibles, se podría llevar a cabo la materialización de este proyecto en la vida real.

En lo personal, y como estudiante, este proyecto me ha permitido profundizar en el mundo de la ingeniería estructural desarrollando y ampliando mis conocimientos sobre esta. A través de él he podido enfrentarme al cálculo de una estructura complicada, manejando la normativa que la envuelve y aprender sobre las estructuras de membranas tensadas a las cuales les depara un futuro notable en la construcción por sus propiedades y la flexibilidad que dan para adaptarse a todo tipo de proyectos.

A todo esto, hay que sumarle el aprendizaje adquirido de un software de uso profesional de análisis estructural de elementos finitos que desconocía y que nunca había manejado, RFEM Dlubal, el cual tiene un potencial muy grande en el mercado por su facilidad y abanico de herramientas y seguro que me ayudará a afrontar nuevos retos en un futuro.

Todo el proyecto ha sido un reto, en el cual me he enfrentado a diversos problemas de ingeniería, errando y encontrando la solución, y donde he podido aplicar los conocimientos teóricos adquiridos durante estos cuatro años y ver como se trabaja en la práctica, ya que los conocimientos teóricos no tienen lugar sin su aplicación en casos prácticos.

Agradecer a la Dra. Icíar Alfaro Ruiz su disposición y trabajo, ya que toda esta puesta en práctica, así como todos los nuevos conocimientos aprendidos de ingeniería estructural, software etc., no habrían sido posibles sin su ayuda y explicaciones.

En conclusión y poniendo en valor todo el proyecto, esta actividad formativa ha sido beneficiosa tanto personalmente cómo académicamente.

## 11 BIBLIOGRAFÍA

---

Autores, V. (2021). *Apuntes Teoría de Estructuras y Construcciones Industriales*. España.

Dubal. (2020). *RFEM-manual*.

Dubal. (2020). *rf-steel-manual-es*.

Google imagenes. (2021). Obtenido de <https://www.google.es/imghp?hl=es>

*ingenieriacivil.es*. (18 de Diciembre de 2021). Obtenido de  
<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/1294>

Lastra&Zorrilla. (2021). *arquitectil*. Obtenido de <http://www.arquitectil.net>

UPC. (19 de Diciembre de 2021). *upcommons*. Obtenido de  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3380/40088-2.pdf>

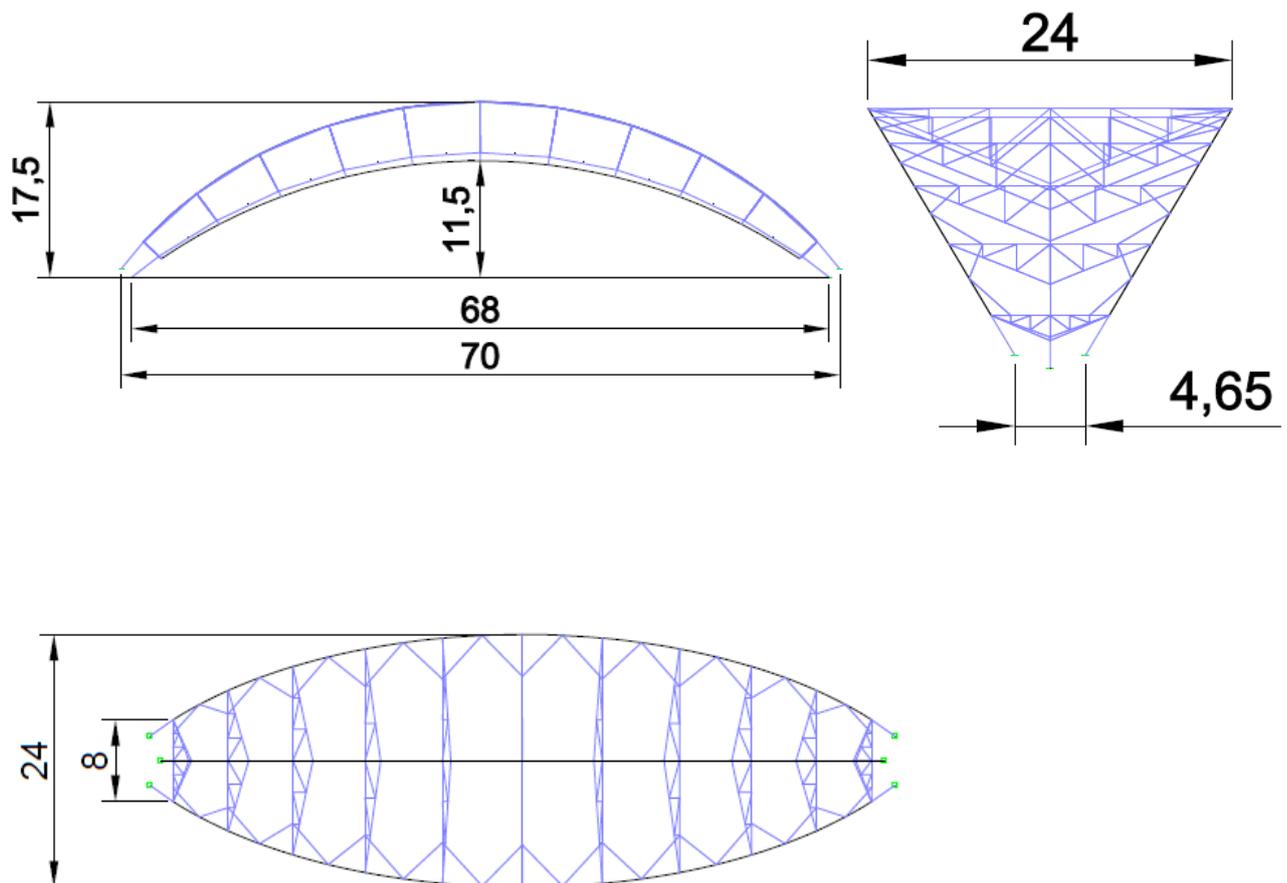
UPV. (25 de Noviembre de 2021). Obtenido de memoria\_2045138:  
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/115286/memoria\\_20451381.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/115286/memoria_20451381.pdf)

Wagg. (23 de Diciembre de 2021). Obtenido de  
<https://wagg.com.ar/productos/exteriores/cubiertas-tensadas.html>

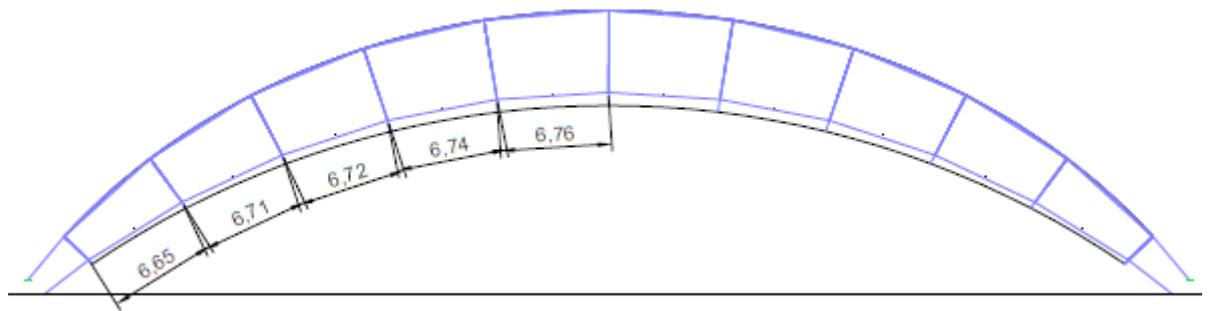
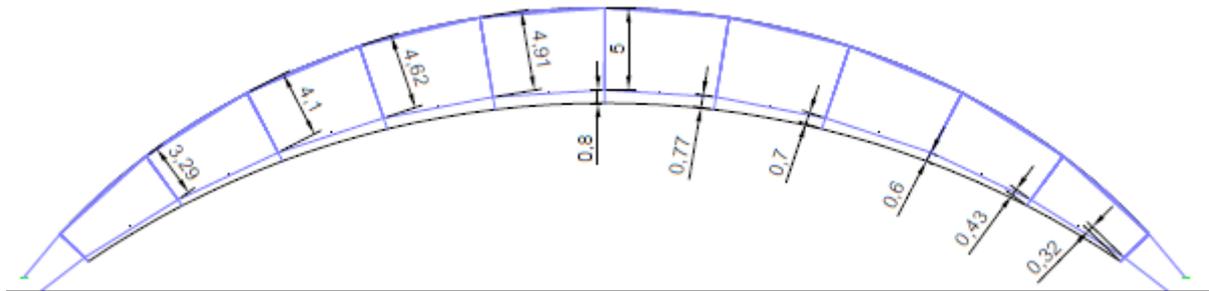
wikipedia. (Noviembre de 2021). Obtenido de  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Cubierta\\_\(construcci%C3%B3n\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Cubierta_(construcci%C3%B3n))

## ANEXO I. DIMENSIONES PRINCIPALES DE LA CUBIERTA

En este anexo se muestran unos bocetos básicos donde se incluyen algunas de las dimensiones principales en metros de la geometría de la cubierta que se va a diseñar y calcular.



Otras dimensiones que pueden servir de interés serían las siguientes:



## ANEXO II. CÁLCULO DE LA CARGA DE VIENTO

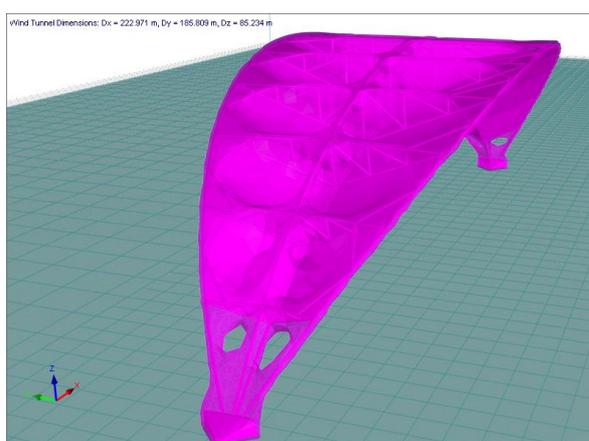
En este anexo se va explicar detalladamente como se ha obtenido la carga de viento a través del programa RWIND.

RWIND es un programa que realiza simulaciones numéricas de flujos de viento, lo que viene siendo un túnel de viento, pero digital. El programa genera un flujo sobre edificios, objetos o la geometría que se incluya en el modelo y genera una carga de viento sobre ellos.

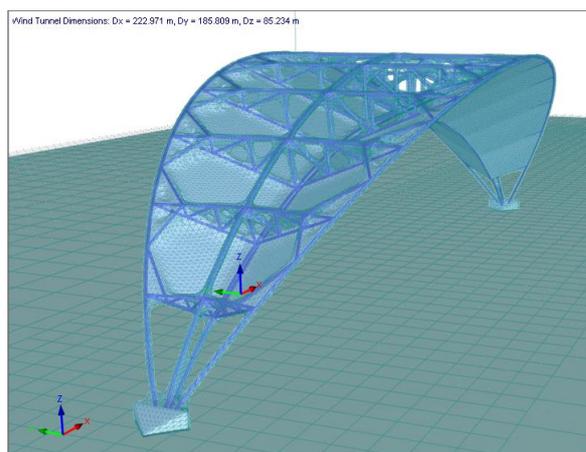
Para llevar a cabo la simulación, RWIND usa una malla solida con elementos 3D. El programa realiza un mallado automático donde es posible establecer la densidad de malla y donde podemos configurar un refinamiento local, como en la mayoría de programas de elementos finitos. También, RWIND usa un solucionador numérico para flujos turbulentos incompresibles con el objetivo de calcular los flujos de viento y las presiones superficiales en el modelo.

Este punto es uno de los más importantes de la simulación, es vital para obtener unos resultados coherentes y precisos ajustar el mallado, así como hacer un buen refinamiento del modelo. RWIND por defecto genera un modelo simplificado, con el objetivo de hacer un mallado más simple y no tener un gasto computacional tan alto, o lo que es lo mismo, tardar en realizar la simulación y los cálculos menos tiempo. Por eso es importante realizar un refinamiento del modelo puesto que RWIND nos va a proponer un modelo más grosero donde no se aprecian los huecos entre las barras de la celosía y tirantes, esto hará que los resultados no sean reales.

En las siguientes figuras, se muestran ambos modelos, a la izquierda el modelo propuesto en un principio por RWIND donde no existen los intersticios entre barras y a la derecha el que se ha modificado para llevar a cabo todos los cálculos, mucho más detallado:

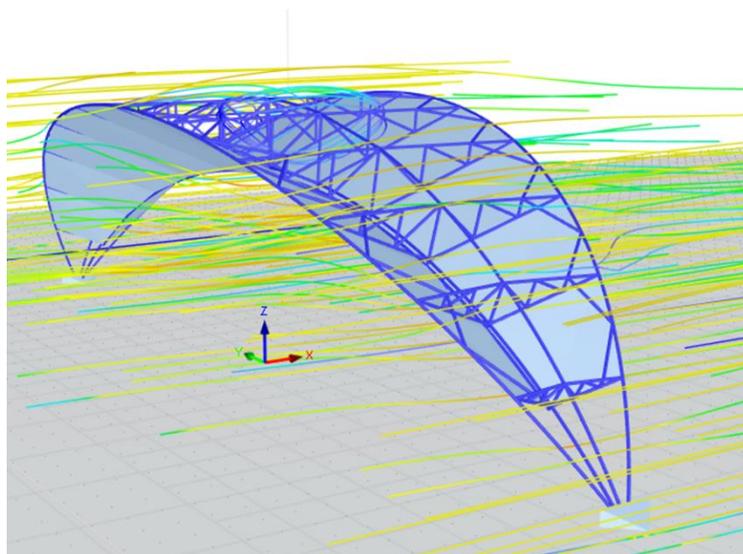


Modelo grosero.

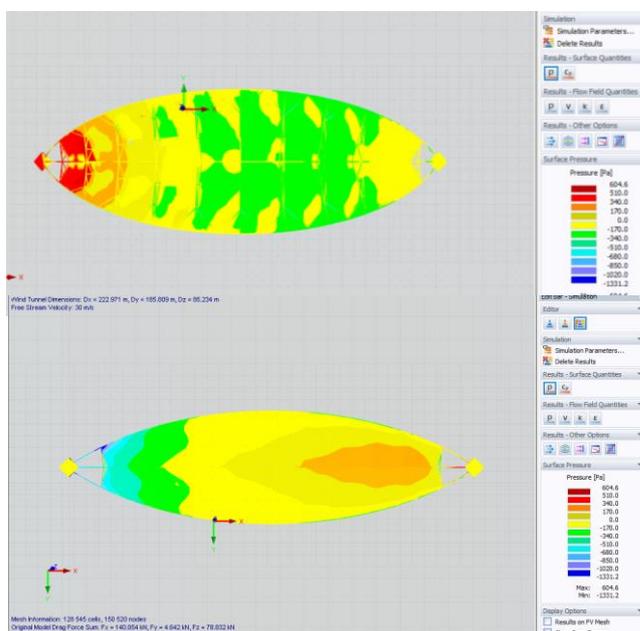


Modelo modificado

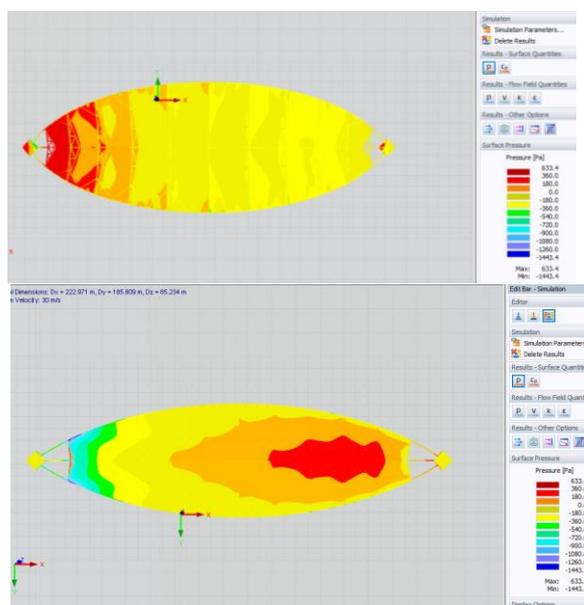
Una de las formas de ver que los resultados entre ambos modelos no son iguales es viendo las líneas de flujo actúan sobre el modelo. En el primero no se generan líneas de flujo en el interior de las celosías, mientras que en el segundo modelo sí que se generan, como se muestra en la siguiente figura:



Finalmente, se van a mostrar las diferencias entre ambos modelos, para ver la importancia de todo lo comentado anteriormente:



Modelo grosero. Malos resultados



Modelo óptimo. Resultados correctos

Una vez se lleva a cabo el mallado y el refinamiento del modelo en RWIND, podemos pasar a realizar la simulación. En ella, el programa nos muestra un gran abanico de soluciones, desde el coeficiente de presión  $C_p$ , presiones, líneas de viento, campo de velocidades, vectores velocidad...etc. Dentro del gran abanico de resultados que nos da el programa, se va a utilizar la presión que genera el viento sobre la membrana para extrapolar los resultados. El programa nos ofrece la presión en pascales (Pa) o lo que es lo mismo en  $N/m^2$ , realizando un cambio de unidades, se obtendrá esa presión en  $KN/m^2$  y ya podremos proceder a la extrapolación de resultados, que se va a explicar a continuación.

- PROCEDIMIENTO A SEGUIR

La forma de calcular la carga de viento a través de RWIND va a consistir en dos partes:

- En la primera parte, se ha realizado un cálculo donde se ha llevado a cabo un análisis del modelo en el túnel de viento digital, obteniendo todos tipos de resultados. En esta ocasión, nos vamos a quedar con las presiones que genera el viento en el modelo.
- La segunda parte del cálculo, consiste en extrapolar los resultados a RFEM, esto consiste en realizar una analogía a lo que plantea el CTE para edificios convencionales. Se basa en dividir la membrana en diferentes secciones, y con los resultados obtenidos en la simulación de túnel de viento asignar a cada área una carga en función de los resultados obtenidos y siempre del lado de la seguridad. Se va a dividir la membrana completa en 80 secciones o áreas diferentes para tener una buena aproximación de resultados de RWIND a RFEM.

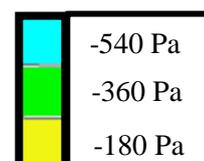
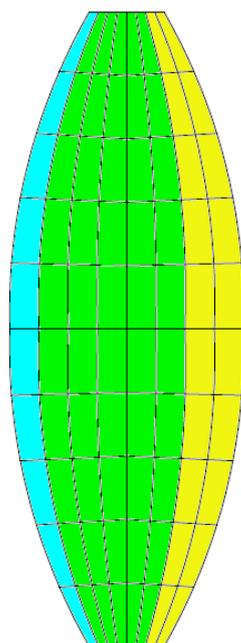
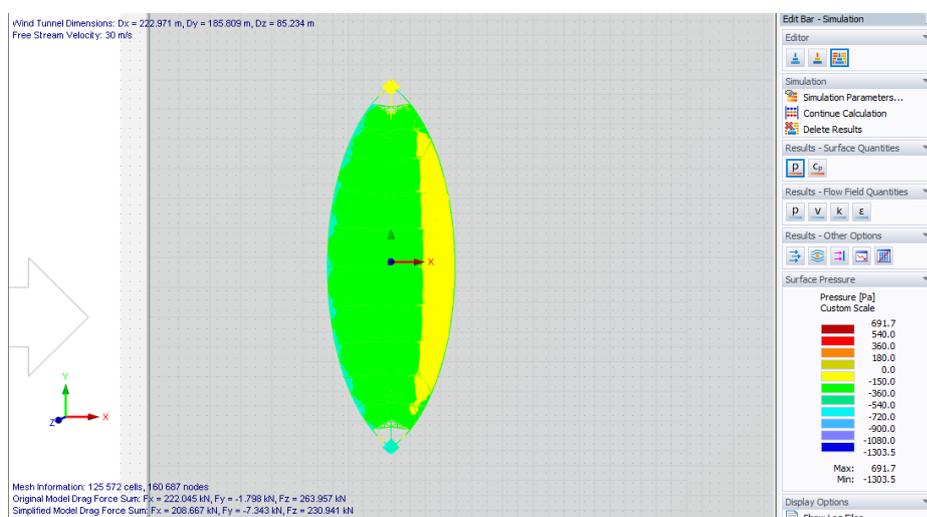
En la simulación se van a realizar tres casos de carga en diferentes direcciones, un caso con viento a  $0^\circ$ , otro a  $45^\circ$  y finalmente otro a  $90^\circ$ , el sentido será indiferente puesto que la cubierta es simétrica tanto en el eje X como en el eje Y. Por lo tanto, se introducirá el modelo y se colocará en las tres direcciones y posteriormente se simulará, teniendo así tres simulaciones diferentes con sus respectivos resultados.

- **CÁLCULO CARGA DE VIENTO A 0°**

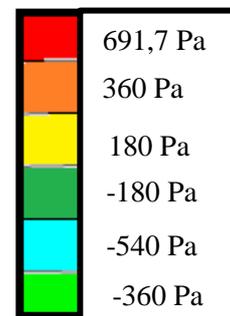
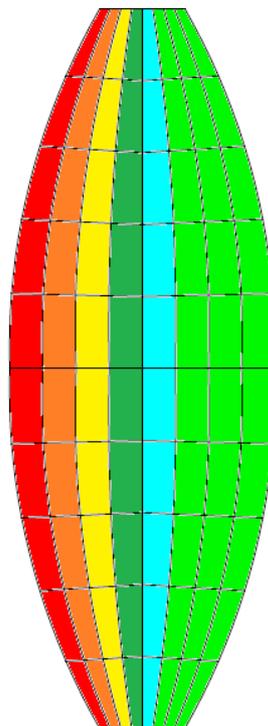
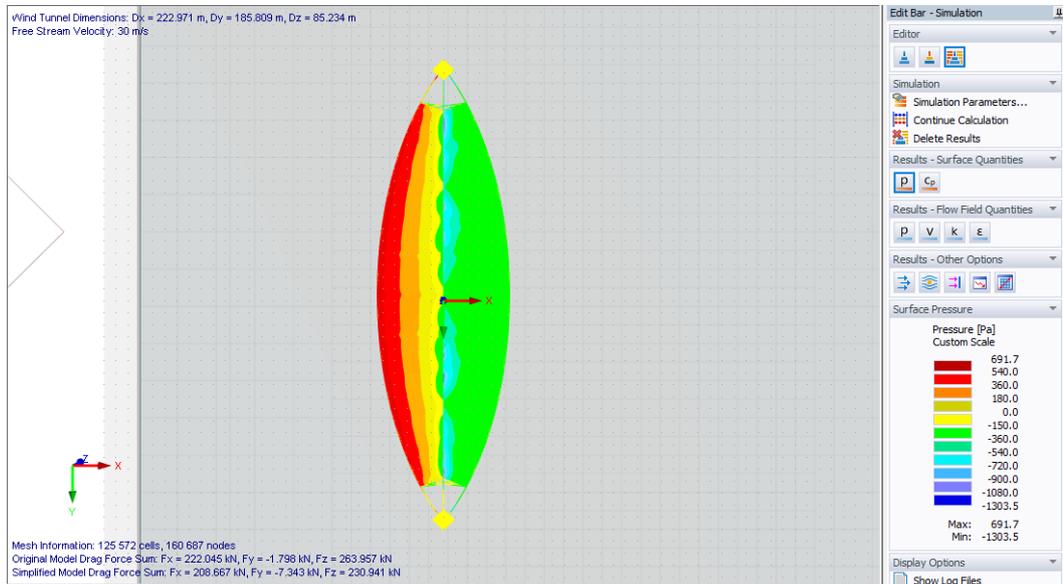
En la primera simulación, el viento incide en dirección +X, es decir, se va a colocar la cubierta en el túnel de viento de manera que el viento atravesase entre los apoyos de la estructura.

A continuación, se van a mostrar los resultados obtenidos en la simulación y debajo su extrapolación, siempre desde un punto vista del lado de la seguridad. Cabe destacar que las presiones con signo negativo se consideran de succión, mientras que las que tienen un signo positivo se consideran de presión. Por lo tanto, los resultados obtenidos y su correspondiente extrapolación, para este caso de carga, quedan de a siguiente manera:

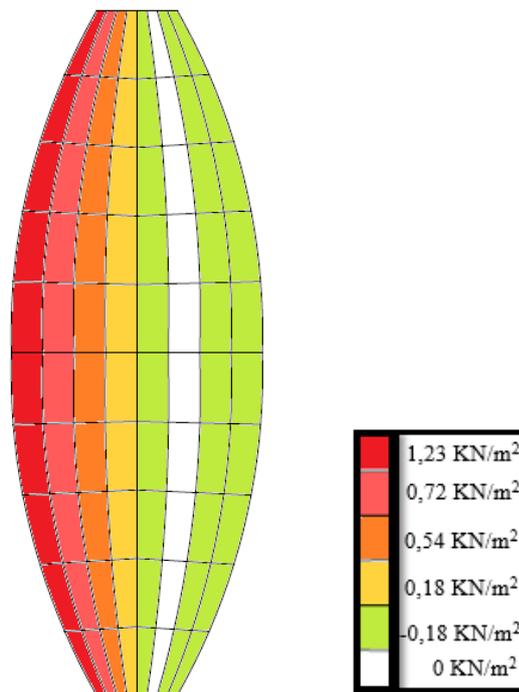
- **PARTE SUPERIOR DE LA MEMBRANA:**



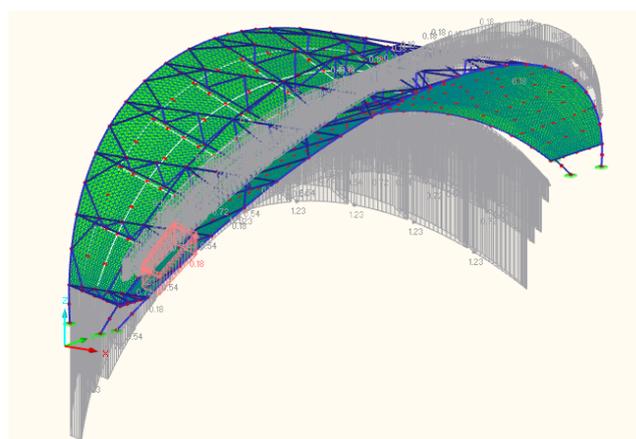
- PARTE INFERIOR DE LA MEMBRANA:



Sumando las presiones por debajo y por arriba de la membrana, teniendo en cuenta que las presiones negativas son de succión y las positivas de presión. De modo que si, por ejemplo, en la parte superior de la membrana tenemos una succión de  $-540 \text{ Pa}$  (fuerza hacia arriba) y en la parte inferior una presión de  $691,7 \text{ Pa}$  (fuerza hacia arriba también), obtenemos como resultado una presión en la membrana de  $1231,7 \text{ Pa}$ , y realizando un cambio de unidades de  $\text{Pa}$  ( $\text{N/m}^2$ ) a  $\text{KN/m}^2$ , para el cual únicamente hay que dividir por  $1000$ , nos queda una fuerza de  $1,23 \text{ KN/m}^2$ , dato que ya se puede introducir en RFEM. Realizando análogamente esto para todas las secciones en las que se ha dividido la sección obtenemos finalmente la carga de viento en dirección X a  $0^\circ$ :



Estos datos se introducirán en RFEM, con su correspondiente signo, es decir las fuerzas con signo negativo se introducirán en dirección  $-Z$  y las positivas en dirección  $+Z$ .

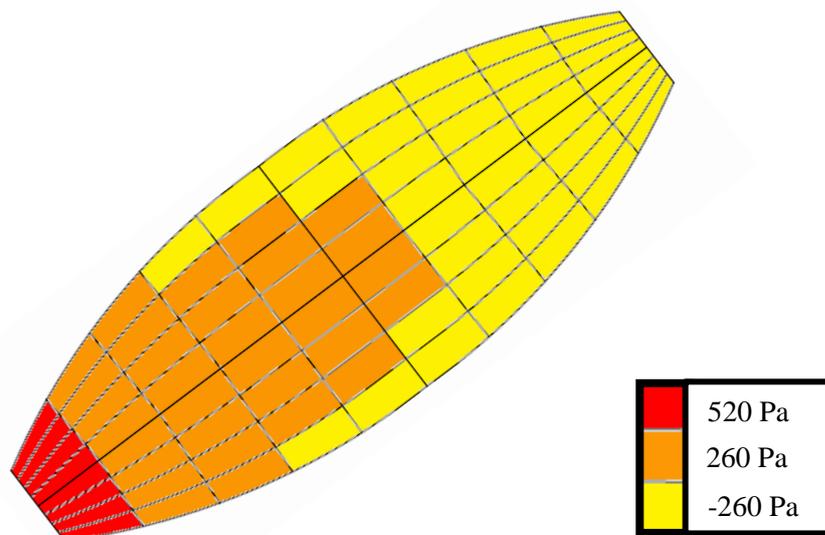
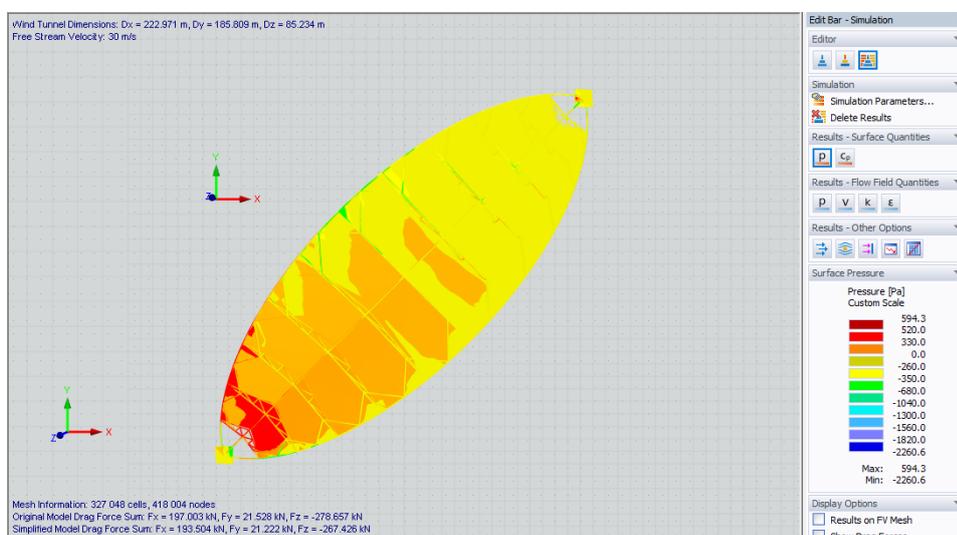


- **CÁLCULO CARGA DE VIENTO A 45°**

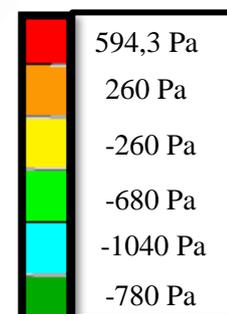
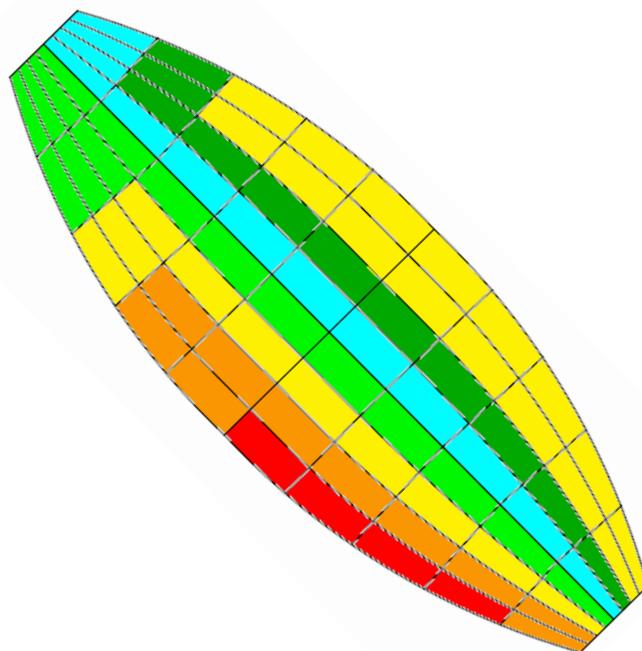
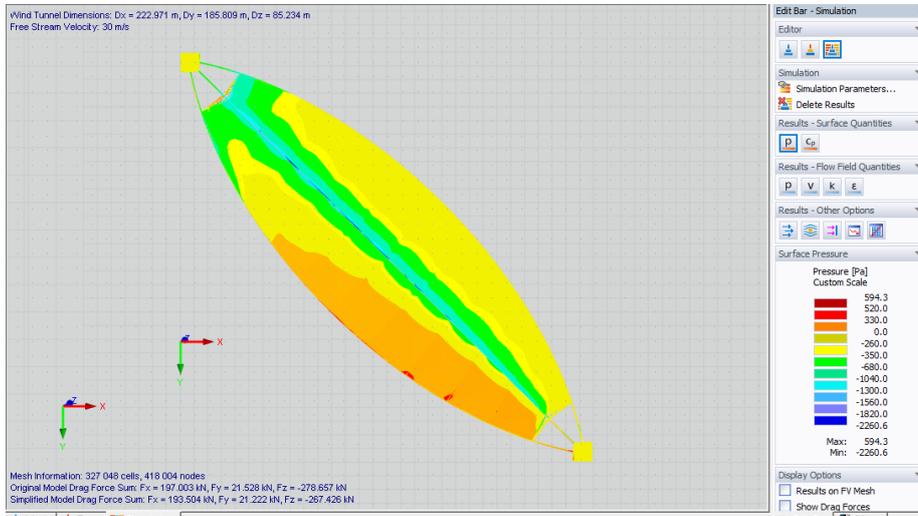
En la segunda simulación, el viento incide a la membrana con un ángulo de 45°, es decir, se va a colocar la cubierta en el túnel de viento girada 45° respecto a la anterior simulación.

De la misma forma que se ha hecho anteriormente, se van a mostrar los resultados obtenidos en la simulación y debajo su extrapolación, siempre desde un punto vista del lado de la seguridad. Igual que antes, las presiones con signo negativo se consideran de succión, mientras que las que tienen un signo positivo se consideran de presión. Por lo tanto, los resultados obtenidos y su correspondiente extrapolación, para este caso de carga, quedan de a siguiente manera:

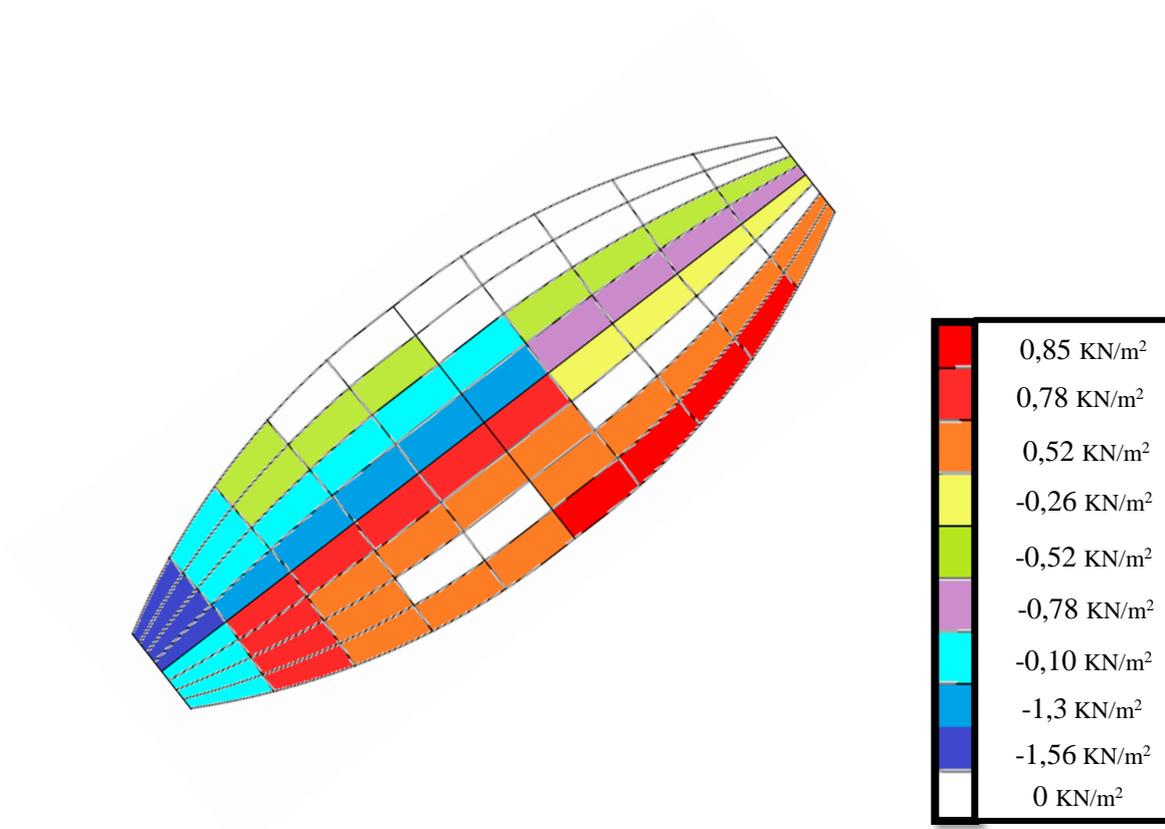
- **PARTE SUPERIOR DE LA MEMBRANA:**



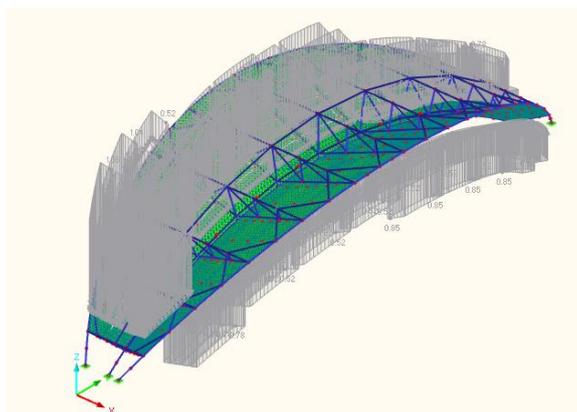
- PARTE INFERIOR DE LA MEMBRANA:



Sumando las presiones por debajo y por arriba de la membrana, teniendo en cuenta que las presiones negativas son de succión y las positivas de presión y realizando análogamente lo comentado anteriormente para todas las secciones en las que se ha dividido la sección, obtenemos finalmente la carga de viento a 45°:



Estos datos se introducirán en RFEM, con su correspondiente signo, es decir las fuerzas con signo negativo se introducirán en dirección  $-Z$  y las positivas en dirección  $+Z$

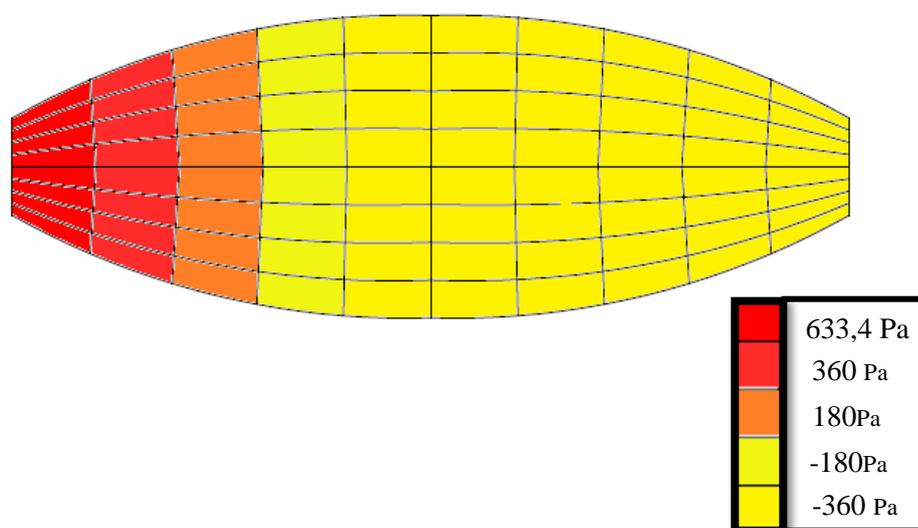
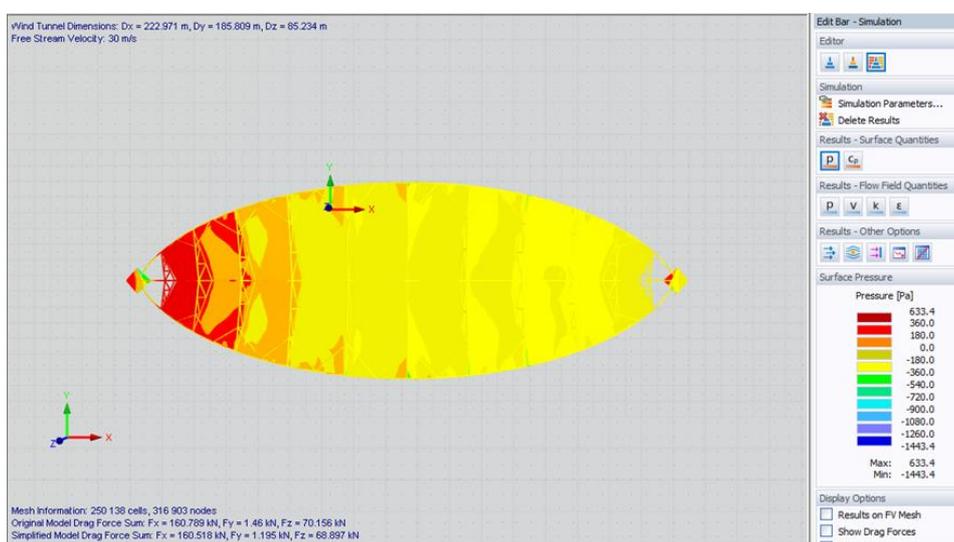


- CÁLCULO CARGA DE VIENTO A 90°

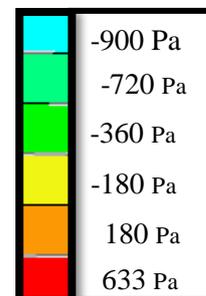
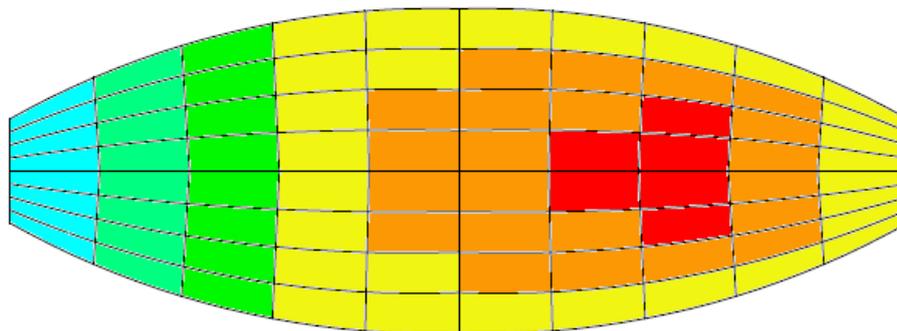
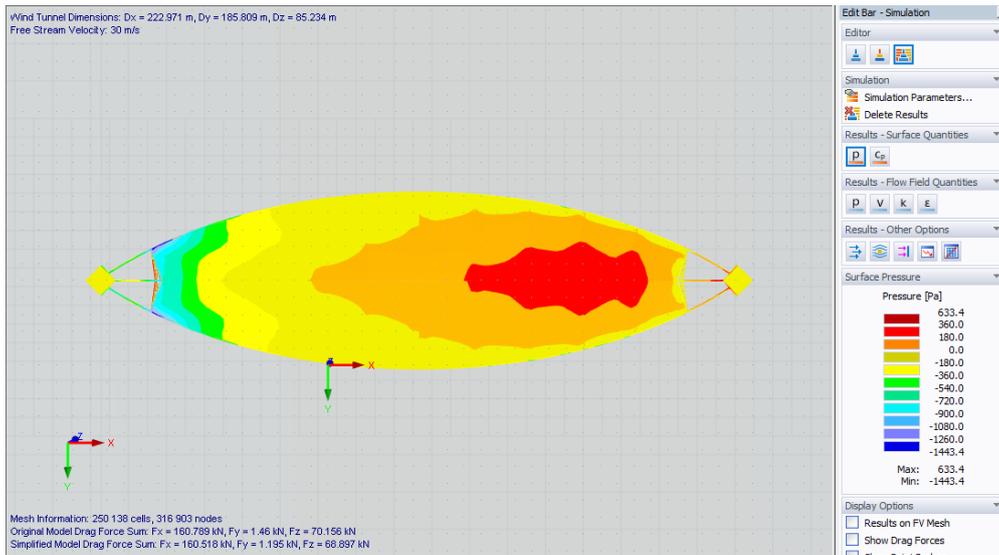
En la última simulación, el viento incide en dirección +Y, es decir, se va a colocar la cubierta en el túnel de viento de manera que el viento atraviese las celosías de la estructura.

A continuación, se van a volver a mostrar los resultados obtenidos en la simulación y debajo su extrapolación, siempre desde un punto vista del lado de la seguridad. Del mismo modo que se ha hecho en los anteriores casos de carga, las presiones con signo negativo se consideran de succión, mientras que las que tienen un signo positivo se consideran de presión. Por lo tanto, los resultados obtenidos y su correspondiente extrapolación, para este caso de carga, quedan de a siguiente manera:

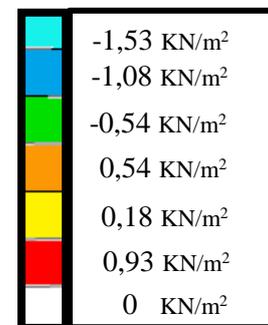
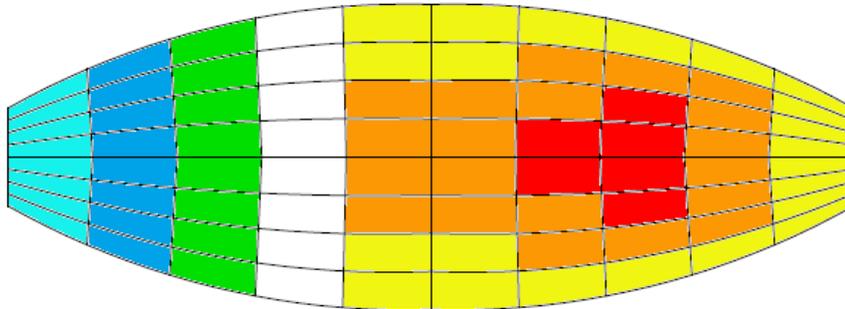
- PARTE SUPERIOR DE LA MEMBRANA:



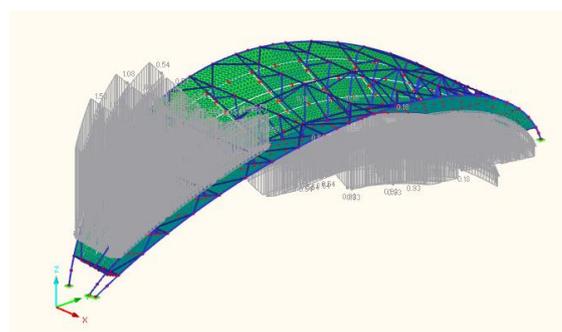
- PARTE INFERIOR DE LA MEMBRANA:



De nuevo, se vuelven a sumar las presiones por debajo y por arriba de la membrana, y haciendo esto para todas las secciones en las que se ha dividido la sección obtenemos finalmente la carga de viento a 90°:



Para finalizar, introducimos este caso de carga en RFEM, con su correspondiente signo, es decir, las fuerzas con signo negativo se introducirán en dirección  $-Z$  y las positivas en dirección  $+Z$ .



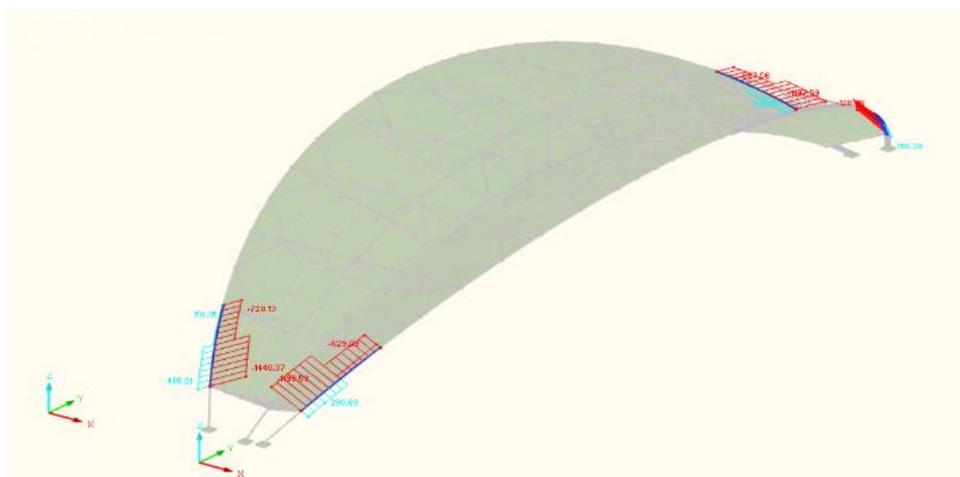
## ANEXO III. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD ARCOS LATERALES

Los arcos laterales se han modelado en el programa como arcos, y no como barras rectas, aunque en su futura construcción estrarían formados por barras rectas. Esto es una simplificación geométrica a la hora de modelar, que nos va a permitir introducir la estructura en RFEM de una manera más sencilla y nos va a permitir generar la superficie de la membrana de manera correcta. Se ha optado por esta simplificación ya que no va a traer apenas diferencias en los resultados y nos va a aportar facilidad para generar toda la geometría de la estructura.

El problema está en que esto hace que el programa calcule todas las comprobaciones de resistencia, pero no la comprobación a pandeo puesto que no considera las barras totalmente rectas.

A continuación, se detalla la comprobación realizada:

Puesto que los arcos laterales están formados por barras con la misma longitud, y los mayores esfuerzos de compresión se encuentran en las últimas barras, es decir, las que están en contacto con las barras de apoyo, se va a estudiar con los resultados mostrados por RFEM las cuatro barras en contacto con estas barras de apoyo y se va a ver cuál es la más desfavorable. Como ya se ha comentado, se va a estudiar en la hipótesis de carga envolvente, para estar del lado de la seguridad. De ahí se obtendrán los esfuerzos,  $N_{Ed}$ ,  $M_{y, Ed}$  y  $M_{z, Ed}$ , que servirán para el cálculo.



De acuerdo a la figura anterior, y tras estudiar todos los esfuerzos en las cuatro barras, se ha visto que la barra más desfavorable es la barra 98. Obteniendo de ahí los esfuerzos ya comentados. Siendo estos:

- $N_{Ed}$  : 1370KN
- $M_{y, Ed}$  : 74,44 KNm
- $M_{z, Ed}$  : 203,44 KNm

A partir de ahí ya podemos realizar la comprobación a pandeo con las siguientes expresiones de acuerdo al CTE:

- Para toda pieza:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A^* \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{c_{m,y} \cdot M_{y,Ed} + e_{N,y} \cdot N_{Ed}}{\chi_{LT} W_y \cdot f_{yd}} + \alpha_z \cdot k_z \cdot \frac{c_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1$$

- sólo en piezas no susceptibles de pandeo por torsión:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A^* \cdot f_{yd}} + \alpha_y \cdot k_y \cdot \frac{c_{m,y} \cdot M_{y,Ed} + e_{N,y} \cdot N_{Ed}}{W_y \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{c_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1$$

A continuación, se detallan los términos que interviene en las expresiones:

- $N_{Ed}$ ,  $M_{y, Ed}$  y  $M_{z, Ed}$ : son los valores de la fuerza axial y de los momentos de cálculo de mayor valor absoluto de la pieza.
- $f_{yd}$ : límite elástico de cálculo.
- $\gamma_{M1}$ : coeficiente de minoración relacionado con comprobaciones de estabilidad.
- $A$ : Área de la sección bruta.
- $W$ : Módulo resistente según tipo de sección.
- $\alpha_y$ ,  $\alpha_z$ : coeficientes indicados en la tabla 6.1, para clase 3.

Tabla 6.1.- Términos de comprobación, según peor clase de sección en la pieza

Clase	A	$W_y$	$W_z$	$\alpha_y$	$\alpha_z$	$e_{N,y}$	$e_{N,z}$
1	A	$W_{pl,y}$	$W_{pl,z}$	0,6	0,6	0	0
2	A	$W_{pl,y}$	$W_{pl,z}$	0,6	0,6	0	0
3	A	$W_{el,y}$	$W_{el,z}$	0,8	1	0	0
4	$A_{eff}$	$W_{eff,y}$	$W_{eff,z}$	0,8	1	Según pieza y tensiones	Según pieza y tensiones

- $\chi_y$ ,  $\chi_z$ : coeficientes de reducción de pandeo en cada dirección, en nuestro caso iguales.
- $e_{N,y}$ ,  $e_{N,z}$ : desplazamientos del centro de gravedad de la sección transversal efectiva con respecto a la posición del centro de gravedad de la sección transversal bruta, en piezas con secciones de clase 4. Por lo tanto, en nuestro caso con 0.
- $k_y$ ,  $k_z$ ,  $k_{y,LT}$ : factores de interacción relacionados con la esbeltez reducida:

$$1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$$

- $c_{m,y}$ ,  $c_{m,z}$ ,  $c_{m,LT}$ : factores de momento flector uniforme equivalente. Se obtienen de la tabla 6.3 en función de la forma del diagrama de momentos flectores. Como en nuestro caso no se parecen, se va a tomar 0,9 para estar del lado de la seguridad.

En nuestro caso se va a calcular con el momento resultante, y los términos  $e_{N,y}$ ,  $e_{N,z}$  van a ser 0. De esta forma, las expresiones quedan reducidas a:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A^* \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{c_{m,y} \cdot M_{R,Ed}}{\chi_{LT} W_y \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A^* \cdot f_{yd}} + \alpha_y \cdot k_y \cdot \frac{c_{m,y} \cdot M_{R,Ed}}{\chi_{LT} W_y \cdot f_{yd}} \leq 1$$

Calculando todos los valores que se necesitan incluir en las dos expresiones mostradas, se han obtenido los siguientes valores para cada uno de ellos:

- $N_{Ed} : 1370\text{KN}$
- $M_{y,Ed} : 74,44 \text{ KNm}$
- $M_{z,Ed} : 203,44 \text{ KNm}$
- $A = 21100$
- $W = 1676000$
- $f_{yd} = 265/1,05$
- $\gamma_{M1} = 1,05$
- $\alpha_y = 0,8$
- $\chi_y = \chi_z = 0,828$
- $k_y = 1,139$
- $C_{m,y} = 1$  (para estar del lado de la seguridad).

Sustituyendo todos los valores en ambas ecuaciones mostradas al principio, en N y mm, obtendremos el valor de factor de pandeo, que debe ser menor que 1.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- $0,88 < 1$  para la primera expresión.
- $0,766 < 1$  para la segunda expresión.

## ANEXO IV. PROPIEDADES MEMBRANAS PVC

Las membranas de PVC se componen de un tejido base, protegido y estabilizado por un recubrimiento en ambas caras. El tejido base está formado por los hilos de trama a lo ancho y por los de urdimbre a lo largo.

El recubrimiento de PVC contiene aditivos, tales como estabilizadores para los rayos UVA, sustancias retardantes al fuego, colorantes y fungicidas. Todos ellos se laminan habitualmente en su superficie aplicando lacas protectoras facilitan la autolimpieza de las membranas con las lluvias.

Algunas de las principales características de este tipo de membranas son las siguientes:

- **TRANSPARENCIA Y PERMEABILIDAD A LA LUZ**

Es la característica física de las telas que resulta más aprovechable para lograr un ambiente interior atractivo, además de la propia cubierta como protección de la lluvia y del sol. El concepto de luz natural es un concepto ampliamente utilizado en arquitectura, sobre todo desde el punto de vista de ahorro energético.

Como término medio, de la radiación total incidente, un  $\pm 70\%$ , es reflejada directamente mientras que un  $\pm 15\%$  pasa al interior, y otro  $\pm 15\%$  es absorbida por el textil, que actúa como nuevo foco difusor de energía, reflejando la mitad hacia el exterior e introduciendo la otra mitad hacia el ambiente interior en forma de energía calorífica.

En definitiva, resulta un coeficiente de transparencia muy próximo al  $\pm 15\%$  con carácter general.

- **RESISTENCIA A LA TRACCIÓN**

Una membrana textil está sometida permanentemente a una tensión de tracción en dos direcciones. Ésta es la característica más importante que debemos tener en cuenta.

Para comprobar el comportamiento del textil en su conjunto, se ensayan probetas de tela de 50 mm de ancho y 300 mm de longitud. Se considera que un textil intermedio el que tiene una resistencia de 400 daN/5 cm, un espesor de 0,9 mm y un peso de 1.000 g/m<sup>2</sup>

- **RESISTENCIA AL FUEGO**

Existen otros factores que pueden condicionar la durabilidad de las telas además de su resistencia y que dependen de su uso. El más importante, y a la vez más analizado, es el fuego.

Como sabemos, el PVC se derrite sin goteo. Por tanto, cuando las llamas llegan al material, o la temperatura interna supera los 100°C, las membranas de PVC ayudan a una rápida evacuación del humo, reduciendo los posibles daños. Ralentiza el efecto de combustión y mejora la seguridad de las personas afectadas. No hay riesgo de que aparezcan gotas ardientes ni que se difunda el fuego por la superficie de la membrana.

- **DURABILIDAD**

El tiempo es uno de los agentes más agresivos para cualquier material de construcción, sobre todo si se usa en cerramientos exteriores. Deben considerarse siempre en relación con los agentes climáticos, temperatura, humedad y radiación solar, fundamentalmente.

La mayoría de los fabricantes garantizan una vida útil de la tela de 20 años, siempre que esté sometida a las condiciones físicas previstas, aunque podemos considerar que la resistencia a tracción tiende a disminuir aproximadamente entre un 10 % y un 15% en los 10 primeros años para después mantenerse casi constante.

- **AISLAMIENTO TÉRMICO Y ACÚSTICO**

No cabe duda que el textil como material de construcción de un cerramiento no puede presentar grandes coeficientes de aislamiento debido a su poco peso y espesor, por lo que las condiciones térmicas y acústicas de un espacio cerrado habrá que obtenerlas por vía del diseño.

El coeficiente de transmisión térmica “U” de una membrana textil puede variar entre 6,2 y 4,1 W/m<sup>2</sup>K (DIN 52611) para un textil simple.

En cuanto al aislamiento acústico, en este tipo de cubiertas el aspecto más importante no es el aislamiento del ruido exterior, sino el acondicionamiento interior. Es decir, la disminución de las reflexiones interiores.

- **TÉCNICAS DE CONFECCIÓN**

La confección de las membranas es una actividad altamente especializada que requiere personal experimentado.

El proceso de confección se puede dividir en cuatro fases:

- 1- Suministro y control de calidad del tejido.
- 2- Corte.
- 3- Soldadura
- 4- Embalaje.

Se deberá definir tanto la descomposición de los patrones, que dependerá de las dimensiones de suministro de la tela (RFEM, cuenta con un módulo adicional con el que nos indica los patrones de corte idóneos), como el sistema de unión, que dependerá del tipo de maquinaria de confección de taller.

El tejido, como material industrial, se suministra en bobinas de anchos relativamente reducidos que varían entre 1,2 y 2,7 m como término medio.

Los patrones se generan con programas informáticos específicos para esta operación, teniendo en cuenta la “compensación” requerida para cada tejido, así como los márgenes de soldaduras y detalles de los bordes de la membrana. El despiece se transfiere a un cutter/ploter.

Una vez obtenidos los patrones, se deberán unir entre sí para obtener la superficie total deseada. El proceso de soldar los patrones de las membranas de PVC se realiza normalmente por aportación de calor, bien sea inducción de alta frecuencia, por aire caliente o por cuña transferidora de calor.

Aprovechando la capacidad de reblandecimiento y fusión del PVC que recubre el tejido de poliéster, bastará con calentar los bordes a unir por alguno de los procedimientos descritos anteriormente, solaparlos y someterlos a presión hasta que soldarlos.

- **MONTAJE**

Es la última fase del proceso y puede añadir condicionantes que afectan al diseño y que deberán ser considerados desde el principio. La solución estructural y el sitio en donde va a estar localizada la cubierta son puntos clave a tener en cuenta.

El montaje de las estructuras textiles requiere personal experto y maquinaria adecuada. Una de las ventajas más importantes de las estructuras de membranas textiles es su proceso de instalación y reajuste sencillo y rápido. Los componentes tienen poco peso, por lo que no es necesario utilizar grandes grúas pesadas para el montaje. Sólo en arquitectura textil es posible cubrir una superficie de 2000 m<sup>2</sup> en 5 días laborables.

El montaje de las estructuras tensadas requiere condiciones atmosféricas razonables. Se considera un valor seguro si la velocidad del viento no supera los 5 m/s. (18 Km/h). Cuando la fuerza del viento supera dicho valor, se deberán suspender ciertas operaciones de montaje.

- **MANTENIMIENTO**

El tejido se puede cortar, romper, perforar o dañar debido a una carga de compresión alta en una superficie pequeña, debido a un error de diseño o a una sujeción inadecuada.

Los operarios que trabajan en las cubiertas deben llevar calzado adecuado, a ser posible, zapatillas blandas y limpias y de suelas blancas. Se debe poner especial cuidado en que las herramientas y maquinaria no sean arrastradas por la superficie del tejido, evitando que el material superficial del recubrimiento del tejido se deteriore prematuramente.

En las edificaciones de este tipo la membrana textil suele formar parte estructural del conjunto. Para garantizar una estructura estable la cubierta se somete a un pretensado mecánico para resistir a factores externos como el viento, la lluvia o arena.

