

Agradecimientos

Gracias a todos los que durante los últimos meses, de manera consciente o inconsciente, me habéis quitado las ganas de dejarlo todo. Por todos los consejos, y por haber aguantado tantas chapas sobre todo lo que me ha ido pasando.

Gracias al profesor Sánchez Carratalá por toda la ayuda y la atención prestada durante la elaboración de este trabajo.

Gracias a mi familia por todo el apoyo y la confianza que me habéis transmitido.

Gracias al personal de Relaciones Internacionales de la UPV y de la Oficina de Movilidad de la UniTn por vuestra atención y paciencia a la hora de resolver cualquier duda que he tenido a lo largo de estos años.

Resumen

En este trabajo se aborda el diseño, cálculo y dimensionamiento de la cubierta del recinto de pelota valenciana “Regidor Vicent Mascarell”, en Real de Gandía (Valencia). La cubierta se realiza mediante una membrana textil tensada, de acuerdo con los Eurocódigos y la Norma UNE-13782, aplicando también la “Guía europea de diseño de las estructuras superficiales tensadas” para los aspectos que la normativa no alcanza. Para ello: se realiza un estudio de soluciones para definir la tipología y sistema estructurales; se modela la estructura con elementos finitos; se realiza un análisis no lineal y la verificación de la estructura; se dimensionan los elementos estructurales sobre el nivel del terreno que constituyen la cubierta y su soporte, así como las cimentaciones y anclajes; se definen los diferentes detalles constructivos necesarios para conformar la estructura; se establece el proceso constructivo y la planificación de la ejecución, así como el plan de mantenimiento de la estructura; y finalmente se realiza una valoración económica de la construcción de la cubierta.

Sintesi

In questa tesi si affronta la progettazione, il calcolo e il dimensionamento della copertura del campo della *pelota valenciana* “Regidor Vicent Mascarell”, a Real de Gandía (Valencia). La copertura è costituita da una membrana tessile tesa, conforme agli Eurocodici e alla norma UNE-13782, applicando anche la “Guida alla progettazione europea per le tensostrutture” per gli aspetti non coperti dalle norme. A tal fine: viene effettuato uno studio delle soluzioni per definire la tipologia e il sistema strutturale; la struttura viene modellata agli elementi finiti; si esegue un’analisi non lineare e una verifica della struttura; sono dimensionati gli elementi strutturali sopra il livello del suolo che costituiscono la copertura e il suo supporto, nonché le fondazioni e gli ancoraggi; vengono definiti i diversi dettagli costruttivi necessari a formare la struttura; vengono stabiliti il processo di costruzione e la pianificazione dell’esecuzione, così come il piano di manutenzione della struttura; e infine viene effettuata una valutazione economica della costruzione della coperta.

Resum

En aquest treball s'aborda el diseny, càlcul i dimensionament de la coberta del recinte de pilota valenciana "Regidor Vicent Mascarell", a El Real de Gandia (València). La coberta es realitza per mig d'una membrana tensada, d'acord amb els Eurocòdecs i la Norma UNE-13782, aplicant també la "Guia europea de diseny de les estructures superficials tensades" pels aspectes que la normativa no alcança. Per a això: es realitza un estudi de solucions per definir la tipologia i sistema estructurals; es modela l'estructura amb elements finits; es realitza una anàlisi no lineal i la verificació de l'estructura; es dimensionen els elements estructural per damunt del nivell del terreny que constitueixen la coberta i el seu suport, aixina com els fonaments i ancoratges; es defineixen els diferents detalls constructius necessaris per a conformar l'estructura; s'estableix el procés constructiu i la planificació de l'execució, aixina com el pla de conservació de l'estructura; i finalment es realitza una valoració econòmica de la construcció de la coberta.

Abstract

This work deals with the definition, analysis and design of the roof for the Valencian pilota court "Regidor Vicent Mascarell", in Real de Gandía (Valencia). The roof is made using a tensioned textile membrane, in accordance with the Eurocodes and the UNE-13782 Standard, following also the "European Design Guide for Tensile Surface Structures" for those aspects not covered by the standards. For this, the following steps will be taken: to carry out a study of solutions to define the structural typology and system; a finite element modelling of the structure and non-linear analysis with large displacements, as well as the verification of the structure; design of structural elements above ground level, which constitute the roof and its supports, and also of their foundations and nails; to define the different construction details necessary to make up the structure; to establish the construction process and maintenance plan of the structure; and, finally, to carry out an economic assessment of the roof construction.

CONTENIDOS

I MEMORIA Y ANEJOS

MEMORIA

ANEJO 01. ESTUDIO DE SOLUCIONES

ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO

ANEJO 03. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

ANEJO 04. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

ANEJO 05. PATRONAJE Y DETALLES CONSTRUCTIVOS

ANEJO 06. PROCESO CONSTRUCTIVO Y PROGRAMA DE TRABAJOS

ANEJO 07. PLAN DE CONSERVACIÓN

BIBLIOGRAFÍA

II PLANOS

III VALORACIÓN ECONÓMICA

CUADRO DE PRECIOS Nº 1

MEDICIONES Y PRESUPUESTOS PARCIALES

PRESUPUESTO GENERAL

Documento I

MEMORIA Y ANEJOS

MEMORIA

1.	Objeto	2
2.	Alcance	2
3.	Antecedentes	2
4.	Emplazamiento	3
5.	Estado del arte	4
5.1.	Uso de tensoestructuras	4
5.2.	Tipologías	7
5.3.	Materiales	9
5.4.	Métodos de búsqueda de la forma y cálculo	10
6.	Condicionantes	11
6.1.	Condicionantes urbanísticos	11
6.2.	Condicionantes funcionales	11
6.3.	Condicionantes geotécnicos	12
7.	Normativa	12
8.	Estudio de soluciones	13
9.	Solución realizada	16
9.1.	Cimentaciones	16
9.2.	Estructura metálica	17
9.3.	Membrana	18
9.4.	Cables	19
9.5.	Vida útil de la estructura	20
10.	Análisis estructural	20
10.1.	Análisis de cargas	21
10.2.	Búsqueda de forma	22
10.3.	Análisis global	23
10.4.	Verificaciones	24
11.	Detalles constructivos	25
11.1.	Patronaje de la membrana	25
11.2.	Detalles de uniones	26
12.	Plan de trabajos	27
12.1.	Fase de montaje	27
12.2.	Fase de conservación	27
13.	Valoración económica	28
14.	Conclusiones	28

1. Objeto

El presente Trabajo Final de Máster tiene dos objetos.

Por una parte, el objeto didáctico de servir como trabajo académico para la obtención del Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos por la Universitat Politècnica de València y la *Laurea Magistrale in Ingegneria Civile* por la *Università degli Studi di Trento*.

Para ello se trata de aplicar parte de los diversos conocimientos adquiridos durante la titulación de Máster como son: la comprensión del comportamiento estructural de diferentes tipologías, la modelización de estructuras por el MEF, la realización de análisis no lineales de la geometría y de las cargas, y la elaboración de planes de construcción y conservación de estructuras. Así como de adquirir nuevas habilidades y conocimientos no llegados a tratar durante las asignaturas cursadas.

Por otra parte, el objeto práctico de definir una solución para la necesidad detectada por el Ayuntamiento de Real de Gandía (Valencia) de disponer una cubierta en el recinto deportivo “Carrer de pilota Regidor Vicent Mascarell”, ubicado en este mismo municipio. La construcción de esta cubierta permitirá que la instalación pueda ser utilizada un mayor número de días al ser dotada de protección frente a la lluvia, y pueda ser utilizada con mayor confort al proporcionar sombra al espacio de juego.

2. Alcance

El trabajo comprende la extensión de un proyecto básico estructural. Se realiza un estudio de soluciones para la elección de la tipología estructural que resolvería de un modo óptimo el problema. De esta solución adoptada, se realiza el dimensionamiento y comprobaciones de los elementos estructurales, así como la definición y cálculos simplificados de los detalles constructivos necesarios.

También se estiman los costes de construcción, se definen las operaciones y los plazos del proceso de montaje, y se define un programa de conservación para la fase de servicio de la instalación.

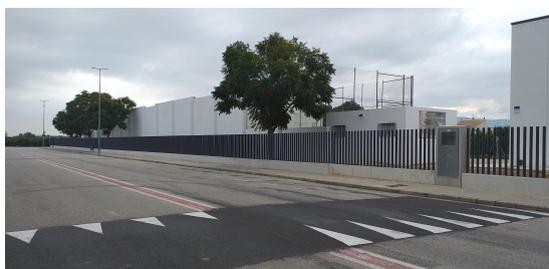
3. Antecedentes

Actualmente la instalación sirve como espacio para la práctica de las modalidades de pelota valenciana como llargues, raspall y galotxa. Estas modalidades tradicionalmente eran practicadas en calles “reales” de características muy concretas: eran calles rectas y llanas, con anchura cercana a los 9,5 metros y prácticamente constante en toda la calle, y con una longitud en torno a los 80 metros. Cada pueblo solía disponer de una calle dedicada a la práctica de este deporte.

Recientemente, se han desarrollado calles “artificiales” en diversos municipios de la Comunidad Valenciana, como es el caso de Real de Gandía, que imitan los elementos de las reales (balcones, puertas, ventanas, aceras), y permiten la práctica del deporte sin ocasio-

nar molestias ni inconvenientes a los vecinos. Del mismo modo que en las calles reales, es en las aceras donde se sitúa el público que asiste a presenciar los partidos.

Este recinto de Real de Gandía consta de dos paredes de hormigón en los laterales de 7 m de altura que se prolongan en toda la longitud de la calle a excepción de los extremos de la calle donde la altura de estas paredes es de aproximadamente 2,5 m y el resto de la altura se completa con malla de simple torsión. En los fondos también se tienen muros de 2,5 m con mallas hasta los 7 m. En la Figura I.0.1 se muestran dos vistas de la estructura existente.



(a) Vista noreste



(b) Vista sudeste

Figura I.0.1: Situación actual de la calle de pelota de Real Gandía. Fuente: Propia.

4. Emplazamiento

El municipio de Real de Gandía se encuentra en la provincia de Valencia, 60 km al sur de la capital.

La instalación se encuentra en la Avenida de la Pau, localizada en la zona Este del municipio. En la Figura I.0.2 se muestra la posición del Carrer dentro de Real de Gandía.



Figura I.0.2: Ubicación de la instalación en la población. Fuente: [Google Earth](#).

5. Estado del arte

Como se detalla posteriormente en la sección 9, la solución adoptada utiliza la tipología de membrana tensada. En el presente apartado se realiza un resumen de la evolución y situación actual de esta tipología, y el uso de las tensoestructuras en la construcción.

Se entienden como tensoestructuras aquellas estructuras formadas por tejidos pretensados y redes de cables que se sustentan a base de elementos rígidos tipo mástiles, arcos o pórticos. En lo referente al mecanismo resistente, las tensoestructuras responden a la actuación de las cargas externas desarrollando únicamente esfuerzos de tracción en los tejidos y cables; y esfuerzos de compresión en los elementos rígidos. [Basset Salom, 2012]

Según la clasificación de las estructuras definida en [Engel, 2001], las tensoestructuras se encuentran dentro del grupo de las “Estructuras de forma activa”, este grupo engloba estructuras que tienen en común que la transmisión de cargas se efectúa a través de una forma adecuada y una estabilización de la forma característica. Las formas de estos sistemas representan la trayectoria natural de las fuerzas desde su punto de aplicación hasta el punto de apoyo.

5.1. Uso de tensoestructuras

La combinación de elementos superficiales textiles con elementos lineales rígidos es una técnica que ya se utilizaba hace varios miles de años en algunas construcciones.

Como se recoge en [Koch and Habermann, 2004], esta técnica se inicia con las tiendas cónicas que los pueblos nómadas usaban como habitáculo (Figura I.0.3). Estas tiendas estaban formadas por pieles de animales en torno a una estructura de palos de madera; estos materiales ligeros hacían que resultara fácil el transporte de sus viviendas en los periodos de migración. Las formas ejecutadas se adaptaban a las necesidades climáticas de cada zona y los materiales utilizados dependían de la fauna presente en cada zona.

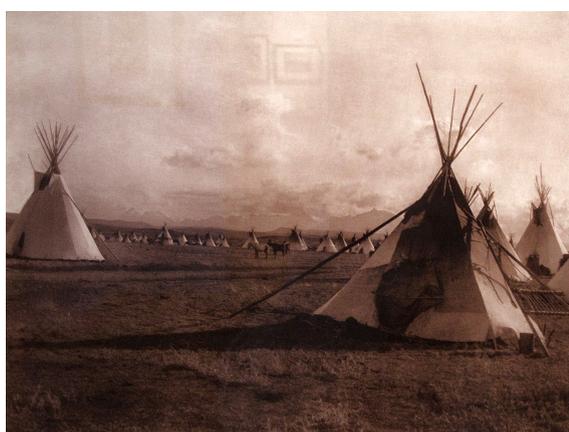


Figura I.0.3: Ejemplo de tiendas de civilizaciones nómadas. Fuente: [Wikipedia](#).

Posteriormente, en otras civilizaciones como el Imperio romano, las estructuras formadas por superficies textiles fueron utilizadas para la construcción de tiendas transportables destinadas a usos militares (Figura I.0.4a). Se trataban de construcciones modulares, en

las que las dimensiones de los habitáculos eran acordes al rango del personal militar que en ellas habitaba. Esto introduce la idea de la fabricación en serie de viviendas y la propiedad de ser provisionales, desmontables y transportables.

Este tipo de técnica también fue utilizada en la cubrición de grandes espacios como los anfiteatros (Figura I.0.4b).



(a) Tiendas militares



(b) Cubierta anfiteatro

Figura I.0.4: Recreaciones de estructuras de material textil en Imperio romano. Fuente: [Pinterest](#).

Más recientemente, a finales del siglo XIX se puede destacar la utilización de esta técnica en los recintos dedicados a albergar espectáculos circenses (Figura I.0.5). Debido al carácter itinerante de estos espectáculos, precisaban de estructuras de grandes dimensiones que fueran ligeras y fácilmente transportables y desmontables. Esto se conseguía con una estructura principal de mástiles de madera y cables, y una envolvente de material textil. Estas construcciones se llevaban a cabo por personal especializado y podían albergar en su interior a varios miles de personas.



Figura I.0.5: Ejemplo carpa circo siglo XIX. Fuente: [Memoria digital de Elche](#).

A mediados del siglo XX, gracias a la aparición de nuevas técnicas y nuevos materiales, se introducen estas estructuras en la arquitectura y adquieren el carácter de ser estructuras definitivas.

Destaca principalmente la figura de Frei Otto, como el primer arquitecto en usar estas soluciones, en construcciones como una cubierta en el pabellón de música en Kassel en el año 1955 (Figura I.0.6a), o el pabellón alemán en la Expo de Montreal en 1967 (Figura I.0.6b). Estas nuevas soluciones suponían un ahorro económico respecto a otras alternativas existentes, además de destacar por su ligereza y por no requerir grandes volúmenes de material.



(a) Pabellón música Kassel



(b) Pabellón alemán Expo Montreal

Figura I.0.6: Construcciones de Frei Otto con material textil. Fuente: [Researchgate](#).

Posteriormente a Otto, destacan las aportaciones de otros proyectistas como Walter Bird o David H. Geiger.

Walter Bird fue un ingeniero aeroespacial estadounidense. Destaca por ser el primer ingeniero en realizar estructuras neumáticas, membranas que se estabilizan frente a cargas exteriores gracias a la presión interna del aire. En la década de los 60, la NASA desarrolló el PTFE (Teflón), Bird aplicó este nuevo material en forma de membranas de fibra de vidrio recubiertas de PTFE para las estructuras. Ejemplos de estas técnicas son la cubierta del aeropuerto de Jeddah, Arabia Saudí (Figura I.0.7a), o el Centro de estudiantes en La Verne College, en California (Figura I.0.7b). Otro hecho destacable en la trayectoria de Bird es la creación de la empresa Birdair, que supuso la primera empresa que se dedicó a comercializar el diseño y construcción de estructuras tensadas. Desde su creación, esta empresa ha sido partícipe de la construcción de un número relevante de tensoestructuras como cubiertas de grandes recintos deportivos, o terminales de aeropuertos.



(a) Cubierta aeropuerto Jeddah



(b) Centro de estudiantes La Verne

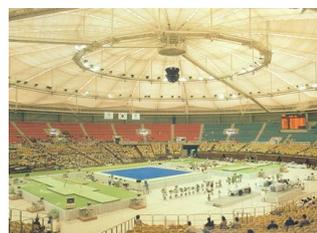
Figura I.0.7: Construcciones de Walter Bird con material textil. Fuente: [Birdair](#).

Por último, en la obra de David H. Geiger se puede destacar también su contribución al desarrollo de estructuras de membrana hinchables, soportadas por la presión interior del aire.

Ejemplo de esta técnica es el Pabellón de EEUU en la Expo de Osaka en 1970 (Figura I.0.8a) en el que se combinan mallas de cables con cojines hinchables de fibra de vidrio para cubrir el espacio interior del pabellón de 140 m de luz. Más tarde se uniría a Horst Berger para crear la empresa Geiger berger Asociados, que se dedicaría al diseño de estructuras de membranas, entre las que destaca la cubierta del estadio de gimnasia de Seul (Figura I.0.8b) al ser la primera estructura que utilizaba el sistema tensegrity combinado con un material textil.



(a) Pabellón estadounidense Expo Osaka



(b) Cubierta estadio gimnasia Seul

Figura I.0.8: Construcciones de David H. Geiger con material textil. Fuente: [Tensinet](#).

Posteriormente, las tensoestructuras siguieron siendo una solución muy utilizada en la construcción de estructuras temporales de grandes dimensiones, como es el caso de numerosos pabellones en ediciones de la Expo Universal o en eventos deportivos.

Las membranas textiles también se aplican en estructuras móviles, principalmente en cubiertas, como pueden ser los casos de la cubierta del estadio olímpico de Montreal o la plaza de toros de Zaragoza.

5.2. Tipologías

Las posibilidades de formas que pueden adoptar las estructuras de membranas tensadas son prácticamente ilimitadas. Atendiendo a la clasificación que se realiza en el libro [Koch and Habermann, 2004] en función del tipo de estructura primaria, pueden diferenciarse las siguientes tipologías:

- Estructuras con arco soportante: La forma de arco es ideal como elemento portante principal de las estructuras de membrana. La disposición adecuada de los miembros del arco a lo largo de las líneas de soporte facilita la creación de zonas de apoyo de la membrana. El arco funciona como elemento portante sometido únicamente a tensiones de compresión y representa una inversión lineal de la membrana que está sometida a tensiones de tracción. La forma del arco se deriva de la línea de apoyo ideal para la carga de compresión.
Se pueden crear sistemas de carga muy eficaces para vanos de hasta unos 25 m asegurando una interacción entre el arco de acero y la membrana. Cuando los dos elementos actúan conjuntamente, la membrana ejerce sus propias cargas sobre el arco y lo estabiliza, asegurándolo así eficazmente contra el pandeo.
- Puntos de apoyo primarios: pueden crearse superficies en forma de silla de montar introduciendo apoyos puntuales que no se encuentran contenidos en un mismo plano. La estructura y la geometría básicas de una superficie de paraboloides hiperbólicos pueden conseguirse conectando cuatro puntos en diferentes planos mediante cables de borde. El ejemplo más sencillo es una vela de cuatro puntos, de la que pueden derivarse geometrías cada vez más complejas.
Una estructura primaria sencilla para una membrana puede consistir en un único mástil con un tirante y los otros tres puntos de anclaje en el suelo. De forma igualmente sencilla, utilizando un solo mástil dentro del área de la membrana, se puede

crear una estructura cónica. Esta forma de construcción se suele replicar en grupos o filas.

En este sentido, esta tipología también permite la posibilidad de variar la ubicación de los puntos de apoyo dentro de la zona de la membrana. La superficie ondulada creada de este modo se distingue por una curvatura general hacia arriba de la membrana y la formación de puntos altos o vértices locales. La forma se deriva de la elevación de estos puntos, que se ajustan a la forma general deseada y a los principios aplicables a las membranas con soportes de un solo punto.

- Principio cresta-valle, cables de curvatura opuesta: consiste en colocar cables con curvaturas opuestas uno al lado del otro, con lo que se puede crear una estructura primaria en la que se pueden formar y soportar superficies de membrana con una ligera doble curvatura. En este sistema, el cable superior, que podría compararse con el cable de carga de un puente colgante, se denomina cable de cresta; el cable inferior, cable de valle, es necesario para soportar las fuerzas de succión del viento.
- Estructuras hinchables superficiales: esta tipología utiliza el aire como elemento sustentador de la membrana para soportar las cargas de compresión, se puede desarrollar una gran gama de estructuras eficientes que pueden cubrir vanos extremadamente amplios. Ejemplos típicos de esta forma de construcción son las naves sencillas con tubos de membranas rellenas de aire, que suelen ser también móviles. El sistema se basa en la creación de una presión de aire entre el suelo y la membrana, en el que la presión debe ser al menos igual a la de la carga externa.
- Estructuras de elementos lineales hinchables: de forma análoga a las formas superficiales soportadas por aire, también pueden crearse elementos lineales inflados a partir de una combinación de materiales de aire y membrana. En general, se trata de elementos portantes axialsimétricos en forma de arcos inflados o incluso de vigas infladas. Dado que las fibras de los bordes del elemento portante deben estar formadas en su totalidad por material resistente a la tracción, los esfuerzos de tracción resultantes del pretensado interno del material de la membrana deben ser siempre mayores que los esfuerzos de compresión causados por la carga. La presión del aire en el interior del tubo provoca un pretensado circunferencial y lineal del miembro. En este sistema, el aire en el elemento inflado es el verdadero elemento resistente; la membrana que lo encierra sólo impide su desplazamiento lateral.
- Construcción de rueda radiada: se aplica en esta tipología el mismo principio de la rueda de una bicicleta para la transmisión de cargas verticales en el plano de la rueda. Como resultado del pretensado que se produce a través de los radios, que funcionan como miembros de tensión muy eficientes entre el eje y la llanta, las cargas se transmiten entre el apoyo y el eje central. Al mismo tiempo, la serie continua de radios confiere a la llanta (que funciona como un anillo de compresión) la estabilidad necesaria, separada del eje, lo que permite soportar las cargas en ángulo recto con respecto al plano de la rueda. Este principio puede aplicarse al desarrollo de cubiertas sobre áreas circulares de gran envergadura.
- Estructuras de mástiles: los mástiles se pueden utilizar en combinación con una amplia variedad de sistemas de membrana. Para crear una superficie de doble curvatura, a menudo es necesario elevar la estructura a una altura superior a la funcionalmente necesaria. Las estructuras de los mástiles permiten varios tipos de sistemas: mástiles con apoyos articulados y estabilizados por tirantes, mástiles con apoyos articulados

estabilizados por la propia membrana, o mástiles con fijaciones rígidas.

Debido a que las grandes fuerzas soportadas por la membrana dan lugar a grandes cargas, principalmente laterales, en los mástiles: en el caso de las fijaciones rígidas, los momentos resultantes que deben resistirse en la base de los mástiles son extremadamente altos; mientras que en los mástiles estabilizados con tirantes esto supone únicamente la resolución de un polígono de fuerzas de tensión y compresión con una base amplia.

Los mástiles tienen que soportar varias cargas, de las cuales la carga axial (compresión) es el caso principal; pero también se producen momentos adicionales como resultado de las cargas del viento y el peso muerto de los mástiles inclinados.

- Cubiertas en arco: Las membranas se combinan con frecuencia con estructuras arqueadas, ya que la forma de arco permite realizar las dimensiones de sección transversal necesarias para las grandes cubiertas altas. Además, la línea curva del arco es la forma geométrica ideal para crear membranas de doble curvatura. Sin embargo, este tipo de estructura tiene las desventajas de ser la forma ideal sólo para un determinado patrón de cargas y de necesitar sistemas de estabilización al ser estructuras muy comprimidas.
- Estructuras móviles: las estructuras de membrana son especialmente adecuadas para cubiertas que deben cambiar de forma. La forma más habitual en que las membranas cambian de forma es mediante un proceso de plegado de la piel y recogida. La pronunciada ligereza de las membranas es una ventaja más en este sentido. También se puede explotar para crear unidades deslizantes en las que cambia la posición de un elemento de la cubierta, pero no la forma.

5.3. Materiales

En lo que se refiere a los materiales utilizados, han ido evolucionando de la misma forma que lo han hecho las dimensiones de las construcciones y la tecnología de la que se dispone. Hace milenios, en las primeras construcciones, los materiales empleados eran pieles de animales, con el paso del tiempo fueron evolucionando hasta los materiales sintéticos utilizados actualmente, que han aportado evidentes mejoras en cuanto a durabilidad, propiedades mecánicas, procesos de fabricación, tonalidades, transparencia o impermeabilidad. Formados por la combinación de un tejido al que se le aplica un recubrimiento.

Actualmente el 90 % de las estructuras de membrana tensada que se realizan están constituidas por alguno de estos 3 materiales:

- Tejido de fibra de vidrio recubierto de politetrafluoroetileno (PTFE), también conocido como teflón.
- Tejido de poliéster (PES) recubierto de cloruro de polivinilo (PVC). Es el material más utilizado debido al equilibrio que se alcanza entre costes, resultados y durabilidad, aunque es el material con peores propiedades de los 3.
- Láminas de etileno-tetrafluoroetileno (ETFE). Es más resistente a los rayos ultravioleta y no se amarillea, puede tener una opacidad muy variable (5-90 %), pesa mucho

menos que los otros, estable a altas temperaturas (170°), muy bajo coeficiente de rozamiento por lo que son autolimpiables. A diferencia de los otros dos, en este caso no es un tejido de hilos o fibras sino que es un polímero termoplástico que se puede obtener por inyección, extrusión o moldeo.

Entre los últimos materiales desarrollados destacan los materiales de bajas emisiones (low-e), que pueden ser tanto láminas de ETFE como fibra de vidrio recubierto de PTFE. En estos materiales se pretende conseguir mejorar las propiedades de aislamiento acústico, que puedan absorber el sonido y por tanto puedan evitar la propagación, y de aislamiento térmico, que en el espacio delimitado por la membrana sea posible poder mantener una temperatura distinta de la temperatura exterior con un bajo uso de energía.

Se tiene el inconveniente que en la actualidad no es muy elevado el número de fabricantes de estos materiales de altas prestaciones, lo que supone un elevado coste de transporte hasta los emplazamientos de las obras, que se suma al ya elevado coste de fabricación de los materiales.

5.4. Métodos de búsqueda de la forma y cálculo

Del mismo modo, también han evolucionado los métodos de cálculo utilizados en el diseño de las estructuras tensadas. Como se recoge en [Mollaert et al., 2015], donde se realiza una comparación entre un caso de mitad del siglo XX y los métodos actuales. Se muestra la evolución de los métodos de cálculo manuales o experimentales hasta los métodos computacionales más recientes.

En cuanto a los métodos de búsqueda de forma de las membranas, se ha evolucionado de los métodos experimentales, como las analogías utilizadas por Frei Otto con películas de jabón, a los métodos computacionales como los métodos basados en la matriz de rigidez, el método de la densidad de las fuerzas, los métodos de equilibrio dinámico. El método utilizado por los programas de cálculo es la estrategia de la referencia actualizada (Updated Reference Strategy). Este método parte de una formulación alternativa del trabajo virtual de la membrana en la cuál se utilizan las 2^{as} tensiones de Piola-Kirchhoff (fuerzas en la configuración inicial por unidad de superficie en la configuración inicial) en lugar de las tensiones de Cauchy. La configuración de referencia se adapta iterativamente hacia la solución estable óptima hasta que se alcanzan en la superficie los valores de pretensado esperados y la diferencia entre soluciones consecutivas es suficiente baja, y con ello se acepta que la aproximación ha terminado y se obtiene la geometría de la membrana.

Para los análisis estructurales, inicialmente se utilizaban fórmulas aproximadas para calcular las tensiones en función de la curvatura de la superficie, actualmente son utilizados modelos de elementos finitos en que se realizan análisis de tercer orden en grandes desplazamientos para verificar el comportamiento de las membranas bajo la acción de las cargas.

El último análisis a realizar en el proceso de diseño es la determinación de las formas de los patrones de corte bidimensionales para que su posterior ensamblaje configure la membrana tridimensional. Actualmente se realizan mediante herramientas computacionales, que

determinan las formas de los patrones radiales o paralelas con las que se reproduce de forma óptima con patrones de tela planos la forma tridimensional de la estructura. Con esto se consigue aprovechar el material de forma más eficiente y que la distribución de tensiones sobre la membrana sea más uniforme. [Koch and Habermann, 2004]

6. Condicionantes

En el proceso de diseño de la cubierta se tienen en cuenta una serie de condicionantes de tipo urbanístico, funcional, y geotécnico, que se detallan en la presente sección. Estos aspectos suponen las condiciones de contorno del proceso de búsqueda de forma que obtiene como solución la geometría de equilibrio de la estructura, como se detalla en el ANEJO 03. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.

6.1. Condicionantes urbanísticos

Atendiendo a las Normas Subsidiarias del municipio de Real de Gandía y la modificación puntual posterior, aprobada por la Comisión Territorial de Urbanismo el 30 de enero de 2019, que transformó la parcela de zona verde a dotacional deportivo [Consejería d'Habitatge], y a los datos disponibles del Catastro [Ministerio de Hacienda, a], se define un volumen en cuyo interior debería situarse la solución proyectada.

En planta, este volumen está delimitado por la parcela en la cual se encuentra la instalación. En el lado norte de la instalación, que ocupa el frente de fachada de la Avenida de la Pau entre las calles Jovada y de L'Alquerieta y de las que el carrer de Pilota ocupa la esquina noreste, se dispone de una franja de 5 m de distancia hasta la alineación de fachada. En el lado oeste existe un edificio adosado con las instalaciones complementarias del juego de pilota, a partir del cual se encuentra el resto de la parcela ocupada por otras instalaciones deportivas y de la que se considera una franja de 10 m. En la medianera sur, la parcela linda con suelo urbanizable destinado, actualmente, a uso agrícola y del que la edificación está separada una distancia media de unos 11 m. La fachada este recae a la calle L'Alquerieta, separada de ésta por una franja de anchura media de unos 10,90 m.

En elevación, este prisma está limitado por la altura que permite el planeamiento urbanístico para esta parcela, que son 10 metros. Esta es la cota máxima que puede considerarse para los mástiles altos de la cubierta.

6.2. Condicionantes funcionales

Para las modalidades de pelota valenciana que se juegan en calles artificiales (galotxa, raspall, llargues), la Federación de este deporte no establece unos límites a las dimensiones en altura que deben respetar estas instalaciones, sí en planta. Es por ello que cada municipio dispone en sus instalaciones diferentes valores de alturas en sus instalaciones. En el caso que se está tratando, se considera una altura de las paredes actuales de 7 m, y esta sería la cota mínima que deben tener los mástiles bajos de la cubierta. Adicionalmente para

la posición del perímetro de la membrana se tiene el condicionante de generar zonas de sombra para el espacio de juego.

6.3. Condicionantes geotécnicos

Se adaptan las propiedades del terreno obtenidas en el estudio geotécnico realizado previamente a la construcción del Pabellón deportivo ubicado en la misma avenida que el “Carrer” de pelota, y cuyos aspectos relevantes para el cálculo se recogen en el APÉNDICE 01 ESTUDIO GEOTÉCNICO del ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO.

Se recogen en la Tabla I.0.1 los datos con los que se caracteriza geotécnicamente el terreno.

Parámetro	Valor
Cohesión efectiva c'	0,26 kp/cm ²
Resistencia corte no drenada c_u	1 kp/cm ²
Ángulo de rozamiento efectivo ϕ'	20°
Peso específico seco γ_{seco}	1,8 kp/dm ³
Módulo de elasticidad de suelos E	20 MPa
Coefficiente de Poisson ν	0,3

Tabla I.0.1: Parámetros geotécnicos del emplazamiento. Fuente: [G2G Consultores, 2018].

Se recogen además en este estudio dos consideraciones: en primer lugar un nivel freático que no se espera alcanzar ya que no se localizó su presencia en toda la longitud del sondeo del citado estudio geotécnico (15 m); y un terreno de tipo III según la clasificación de la NCSE para el cálculo del Espectro Elástico de Respuesta.

7. Normativa

La solución proyectada se ha realizado cumpliendo la normativa técnica:

- **Código Técnico de la Edificación (CTE)** Documento básico Seguridad estructural-Acciones en la edificación (DB-SE-AE) [Ministerio de Vivienda, 2009]
- **Código Estructural** [Ministerio de la Presidencia, 2021]
- **Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras.** UNE-EN 1990:2019 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2019]
- **Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón.** Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1992-1-1:2013 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013a]

- **Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero.**
Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1993-1-1:2013 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013b]
Parte 1-8: Uniones. UNE-EN 1993 1-8:2013 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013c]
Parte 1-11: Cables y tirantes. UNE-1993 1-11:2015 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2015]
Parte 3-1: Torres, mástiles y chimeneas. Torres y chimeneas. UNE-EN 1993 3-1:2013 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013d]
- **Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico.** Parte 1: Reglas generales. UNE-EN 1997-1 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016a]
- **Norma de Construcción Sismorresistente:** Parte general y edificación (NCSE-02). [Ministerio de Fomento, 2002]
- **Norma UNE-EN 13782: Estructuras temporales-Carpas-Seguridad** [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016b]

Para los aspectos no tratados en estas normas, se siguen las recomendaciones recogidas en la Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas [Forster and Mollaert, 2004], para el diseño de la estructura; y en la Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera [Dirección General de Carreteras, 2001] para el diseño de los anclajes de los contravientos.

8. Estudio de soluciones

En el ANEJO 01. ESTUDIO DE SOLUCIONES se muestra el procedimiento seguido para definir la tipología estructural óptima que posibilite la resolución del problema planteado y cumpla con las necesidades presentes. Para ello se realiza una comparación entre diversas tipologías comúnmente utilizadas en las estructuras de cubiertas de espacios de uso deportivo, y mediante un análisis multicriterio se escoge dicha tipología óptima.

Se evalúan 4 tipologías distintas como posible solución: alternativa A_1 pórticos transversales con dintel tipo viga de acero y chapa metálica sobre correas en cubierta, alternativa A_2 pórticos transversales con dintel tipo cercha de acero y chapa metálica sobre correas en cubierta, alternativa A_3 pórticos longitudinales de acero con paneles autoportantes en cubierta, y alternativa A_4 estructura de membrana tensada sobre estructura de acero; y se comparan según los criterios: C_1 coste económico con un peso $w_1 = 0,35$, C_2 eficiencia estructural con un peso $w_2 = 0,35$, C_3 tiempo de construcción con un peso $w_3 = 0,18$, y C_4 estética con un peso $w_4 = 0,12$. Los 3 primeros criterios son objetivos y se definen sus puntuaciones en función de ratios obtenidos de proyectos de construcciones similares de la tipología correspondiente.

En la Tabla I.0.2 se muestran las puntuaciones de cada una de las tipologías en cada uno de los criterios.

Alternativa	Criterio C_1	Criterio C_2	Criterio C_2	Criterio C_4
Alternativa A_1	6,19	5,84	5	6
Alternativa A_2	8,19	7,78	2,5	8
Alternativa A_3	8,03	7,30	7,5	7
Alternativa A_4	7,59	9,08	7,5	8

Tabla I.0.2: Puntuaciones según criterios para elección de tipología estructural. Elaboración: Propia.

En la Tabla I.0.3 se muestran las sumas de las puntuaciones de los criterios ponderadas según los pesos mencionados previamente.

Alternativa	Puntuación I_j
Alternativa A_1	5,83
Alternativa A_2	7,00
Alternativa A_3	7,56
Alternativa A_4	8,14

Tabla I.0.3: Puntuaciones ponderadas según tipologías estructurales. Elaboración: Propia.

Atendiendo a estas puntuaciones ponderadas, se escoge una tipología de membrana tensada sobre estructura de acero para resolver el problema, en la cual el elemento superficial es de un material textil que se encuentra en su totalidad tensado. Dentro de esta tipología, se realiza un nuevo análisis multicriterio para escoger uno de los infinitos sistemas estructurales posibles.

Se consideran 4 sistemas como posibles soluciones: S_1 , Sistema en forma de tienda con puntos de soporte y anclaje alternados con superficies onduladas (Fig. I.0.9a); S_2 , Sistema en forma de tienda con estructura suspendida para puntos altos alineados (Fig. I.0.9b); S_3 , Sistema compuesto por módulos en forma de tienda con soportes exteriores y superficies sencillas a dos aguas (Fig. I.0.9c); y S_4 , Sistema en forma de tienda con arcos paralelos de puntos altos sobre planta rectangular (Fig. I.0.9d).

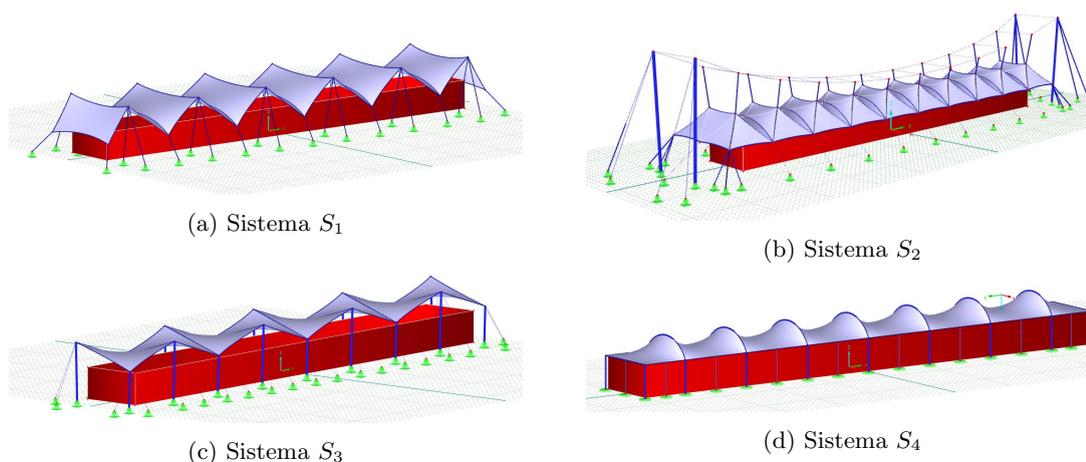


Figura I.0.9: Posibles sistemas estructurales de membrana tensada a aplicar. Elaboración: Propia.

Se consideran 4 criterios para determinar el sistema más adecuado para el caso que se pretende resolver, y son: la eficiencia estructural con un peso de $w_1 = 0,30$, la idoneidad para adaptarse a la geometría existente con un peso de $w_2 = 0,23$, la simplicidad del proceso constructivo con un peso de $w_3 = 0,27$, y el criterio estético con un peso de $w_4 = 0,20$. Se puntúan de forma subjetiva todos los criterios.

En la Tabla I.0.4 se muestran las puntuaciones de cada una de los sistemas en cada uno de los criterios.

Sistema	Eficiencia	Idoneidad	Simplicidad	Estética
Sistema S_1	8	5	6	6
Sistema S_2	5	6	6	8
sistema S_3	8	7	7	7
Sistema S_4	6	8	8	5

Tabla I.0.4: Puntuaciones del análisis para la elección del sistema estructural. Elaboración: Propia.

En la Tabla I.0.5 se muestran las sumas de las puntuaciones de los criterios ponderadas según los pesos mencionados previamente.

Sistema	Puntuación
Sistema S_1	6,37
Sistema S_2	6,10
Sistema S_3	7,30
Sistema S_4	6,80

Tabla I.0.5: Puntuaciones ponderadas de los sistemas estructurales. Elaboración: Propia.

Tras este segundo análisis, se adopta el sistema estructural que parte de la estructura anticlástica simple formada por un paño de membrana con forma de paraboloides hiperbólicos de 4 lados, apoyado en 2 puntos altos situados en los extremos de una de las diagonales del cuadrilátero, y 2 puntos bajos en los extremos de la otra diagonal. Este módulo se replica siguiendo la dirección del lado mayor de la huella, dos módulos contiguos tienen en común dos mástiles y uno de los bordes de la membrana.

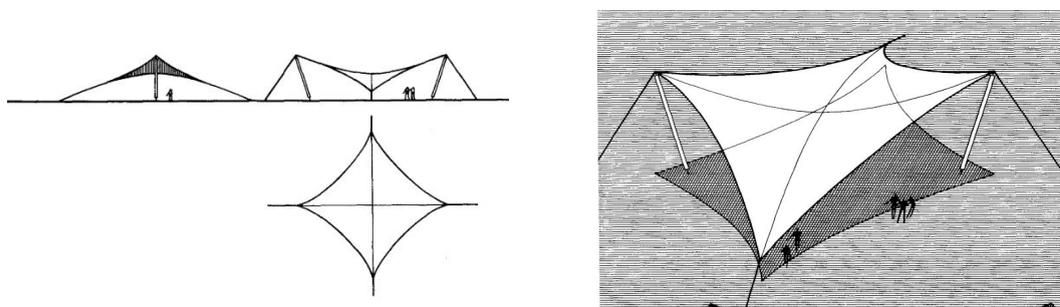


Figura I.0.10: Croquis de un módulo de la solución escogida. Fuente: [Engel, 2001].

9. Solución realizada

La solución realizada consta de una cubierta textil tensada de doble curvatura negativa o anticlástica. Se compone de 6 módulos con forma de sector de paraboloides hiperbólicos de 4 lados rectos. Dos de los vértices forman puntos altos a unas cotas de 9,50 y 8,80 m respecto al nivel del terreno, en los extremos de una de las diagonales, y los otros dos vértices son puntos bajos a unas cotas de 7,40 y 7,20 m respecto al nivel del terreno, en la otra diagonal. Dos de los lados del módulo se orientan según la alineación mayor de la planta, la distancia en planta de los vértices de estos bordes es de 14,40 m. Los otros lados son casi perpendiculares a los anteriores y la distancia en planta entre los vértices es de 14,64 y 14,74 m.

Se cubre una superficie de 1.050 m².

9.1. Cimentaciones

Se disponen dos tipos distintos de elementos de cimentación.

Por un lado, zapatas aisladas para las cimentaciones de los mástiles. Se definen cinco tipos de zapatas distintas, en función de los niveles de carga transmitida y el espacio disponible en la base de cada uno de los mástiles. En la Tabla I.0.6 se resumen las dimensiones de cada uno de los tipos de zapatas y el número de zapatas de cada tipo. El tipo de hormigón utilizado en las zapatas es HA-25/B/20/XC2.

Tipo	L [m]	B [m]	D [m]	Nº [Ud]
Z1	1,6	1,6	0,75	3
Z2	1,8	1,8	0,75	3
Z3	2,0	2,0	0,75	4
Z4	2,2	2,2	0,75	2
Z5	2,4	2,4	0,75	2

Tabla I.0.6: Dimensiones de las zapatas proyectadas. Elaboración: Propia.

L y B , son las dimensiones en planta de la zapata; D , es la profundidad del plano de apoyo de la zapata.

Se dispone un armado de $\phi 20@200$ en los primeros 2 tipos de zapatas y un armado de $\phi 20@150$ en los 3 últimos tipos de zapatas. El tipo de acero utilizado en las armaduras es B-500S.

Por otro lado se disponen anclajes pasivos permanentes con inyección repetitiva y selectiva para los apoyos de los cables. Se definen 3 tipos distintos de anclajes en función de la magnitud de los axiles que se deben transmitir al terreno. En la Tabla I.0.7 se muestran las dimensiones de cada uno de los tipos de anclajes y el número de anclajes de cada tipo. Los tirantes se conforman por cables de $\phi 0,6''$, y tipo de acero es Y1860S7.

Tipo	D_N [m]	L_b [m]	Cables [Ud]	A_T [mm ²]	L_{lib} [m]	Incl [deg]	N° [Ud]
A1	0,152	6	3	547,2	4,5	15	6
A2	0,152	8	4	729,7	4,5	15	14
A3	0,152	10	5	912,1	4,5	15	8

Tabla I.0.7: Tipos de anclajes dispuestos. Elaboración: Propia.

D_N es el diámetro de la inyección; L_b , la longitud del bulbo de anclaje; N° el número de cables por tirante; A_T , el área de acero del tirante; L_{lib} , la longitud libre de anclaje; e $Incl$, la inclinación del anclaje respecto la dirección vertical.

9.2. Estructura metálica

La estructura sobre la que apoya la membrana está compuesta por 7 mástiles altos y 7 mástiles bajos con sección circular hueca de acero S275JOH. Los diámetros de los tubos varían entre 219,1 y 323,9 mm, y los espesores, entre 6,3 y 12,5 mm. En la Tabla I.0.8 se muestran las secciones utilizadas, y sus longitudes y masas, tras detraer el espacio correspondiente a los aparatos de apoyo de su longitud en la estructura modelada.

Sección D x e [mm]	Longitud [m]	N° [Ud]	Masa [kg]
219,1x6,3	13,648	2	451
244,5x6,3	21,079	3	780
244,5x8	13,598	2	634
273x10	25,333	3	1.643
273x12,5	18,308	2	1.470
323,9x10	18,258	2	1.413
Total:			6.392

Tabla I.0.8: Resumen de los tipos de barras empleados en mástiles. Elaboración: Propia.

Los mástiles se disponen en el perímetro de la membrana, a lo largo de la dimensión mayor de la huella rectangular que se trata de cubrir. En una misma alineación se disponen alternativamente mástiles altos y bajos. Entre las dos alineaciones, los pares de mástiles enfrentados son cada uno de un tipo diferente, para poder conseguir la forma de doble curvatura negativa que dota de estabilidad a la membrana.

Los mástiles interiores se consideran articulados en su base, se impiden las 3 traslaciones y la rotación según el eje paralelo a la dirección mayor de la planta, se ejecuta una unión de tipo pasador. Los mástiles de esquina se consideran totalmente articulados, se impiden únicamente las traslaciones, la unión a ejecutar es de tipo rótula. En las cabezas de los mástiles, las relingas y contravientos se unen por placas soldadas a las cabezas de los mástiles a las cuales se unen por bulones.

9.3. Membrana

Para la membrana se emplea un tejido de Poliéster recubierto con cloruro de polivinilo (PVC). Es el material usado más habitualmente en la arquitectura textil. Existe otra posibilidad como es el tejido de fibra de vidrio recubierto de politetrafluoroetileno (PTFE) que aunque presenta mejores propiedades mecánicas, se descarta para este trabajo debido a su elevado coste y su mayor dificultad para la manipulación.

Se escoge el material Flexlight Advanced 1302 S2 producido por el fabricante Serge Ferrari, equivalente a una membrana de PES/PVC Tipo IV, el espesor es de 1,02 mm; y un peso de 1,35 kp/m². El resto de propiedades del tejido se muestran en la ficha del producto, Figura I.0.11. Las propiedades mecánicas consideradas en el análisis de la estructura se definen detalladamente en el ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO.

	■ Características técnicas	Normas
Tratamiento de superficie (derecho/revés)	S2 PVDF / PVDF	
Hilo	Poliéster de alta tenacidad 1100/2200 Dtex Tratamiento anti-capilaridad Low-wick	
Peso	1350 g/m ²	EN ISO 2286-2
Ancho	267 cm	
■ Propiedades físicas		
Resistencia a la tracción (urdimbre/trama)	800 / 700 daN/5 cm	EN ISO 1421
Resistencia al desgarro (urdimbre/trama)	120 / 110 daN	DIN 53.363
Adherencia	13 daN/5 cm	EN ISO 2411
> Las características técnicas indicadas son valores medios, con una tolerancia de +/- 5%		
■ Reacción al fuego		
Euroclase Clasificación	C-s2,d0 B1	EN 13501-1 DIN 4102-1
> Otros certificados de incendio disponibles bajo demanda		
■ Espesor y estabilidad dimensional		
Espesor total	1.02 mm	
Alargamiento 24 h -10 daN/5 cm (urdimbre/trama)	< 1.2% / < 1.2%	EN 15977
Alargamiento residual	< 0.5% / < 0.5%	EN 15977
■ Prestaciones térmicas y acústicas		
Coefficiente de transferencia de calor (vertical/ horizontal)	U = 5.6 / 6.4 W / sqm / °C	Calculado
Índice de atenuación acústica	15 dBA	ISO 140-3 & ISO 717-1
■ Propiedades óptico-solares		
Transmisión de luz visible (Tv)	6%	NFP 38511
Reflexión de luz visible (Rv)	2.5%	EN 410
Transmisión Solar (Ts)	4%	EN 410
Reflexión Solar (Rs)	82%	
Factor Solar (g)	8.5%	
Transmisión UV	0%	
Índice de reflectancia solar (SRI)	90.3%	ASTME1980-01 (Approach II)

Figura I.0.11: Ficha del material Flexlight Advanced 1302 S2. Fuente: [Serge Ferrari](#).

La estructura se compone de un total de 6 módulos cuadrangulares, cuyas dimensiones se muestran en la Tabla I.0.9. Se asume un pretensado inicial de la membrana de 6,20 kN/m uniforme en toda su extensión y según ambas direcciones principales del tejido.

Módulo	Área [m ²]	Masa [kg]
Módulo 1	182,632	242
Módulo 2	186,503	2450
Módulo 3	186,216	247
Módulo 4	186,216	247
Módulo 5	186,503	250
Módulo 6	182,632	242
Total:	1.110,702	1.489

Tabla I.0.9: Dimensiones de los módulos de material textil. Elaboración: Propia.

Los 6 paños de membrana se unen entre sí con una soldadura de alta frecuencia por solape de los patrones en taller, y un cable interior que une el par de mástiles enfrentados. La longitud del solape es un parámetro que debe ser definido por el fabricante, que debe determinar la resistencia de la unión. En ausencia de datos al respecto, se consideran 80 mm.

En los bordes perimetrales de la membrana se dispone un dobladillo continuo, por el cual se pasa la relinga flexible perimetral. Constituyendo así el borde flexible necesario para transferir los esfuerzos de la membrana al elemento de borde.

9.4. Cables

Según su posición, se distinguen 3 tipos de cables en la estructura:

- Contravientos: cables que estabilizan los mástiles uniendo las cabezas de estos con dos apoyos en el terreno. En el extremo del terreno, se transmiten las tracciones a este por medio de anclajes.
- Relingas internas: cables que unen mástiles de alineaciones enfrentadas, coinciden con las uniones de módulos contiguos.
- Relingas perimetrales: cables que definen el perímetro de la membrana, unen mástiles contiguos de la misma alineación.

En los contravientos se utilizan cables cerrados “Full Locked Coil” de acero 1670, en las relingas se utilizan cables en espiral “Open Spiral Strands” de acero 1770, en ambos casos del fabricante Redaelli.

Por seguridad para prevenir la inestabilidad de la estructura debido a la rotura de uno de los cables, se duplican los cables en la posición de cada cable considerada en el análisis, siendo de diferente longitud para que solamente el más corto de ellos se encuentre en tensión. En la Tabla I.0.10 se muestra un resumen de la cantidad de cada uno de los cables utilizados en la estructura.

Tipo	l_{tot} [m]	Masa tipo [kg]
FLC36	69,976	504
FLC32	103,868	592
FLC28	162,082	697
FLC24	147,42	472
OSS24	413,698	1.200
OSS20	142,086	284
Total:		3.748

Tabla I.0.10: Longitudes y masas totales de cables. Elaboración: Propia.

9.5. Vida útil de la estructura

Esta estructura se incluye en el grupo de “Estructuras de edificios y otras estructuras comunes” según la clasificación del Eurocódigo UNE EN-1990 Bases de cálculo de estructuras, con lo cuál la vida útil es de 50 años.

Debido a que la vida útil de los materiales es menor que la vida útil de la estructura, será necesario realizar reemplazos periódicos de los elementos estructurales (cables, mástiles y membrana) en función de su estado de deterioro.

10. Análisis estructural

El análisis estructural realizado se divide en varias fases:

- Determinación de las acciones externas que debe soportar la estructura y sus valores característicos.
- Proceso de búsqueda de forma para obtener la geometría de la estructura y el estado tensional inicial.
- Análisis no lineal de la estructura bajo la acción de las cargas externas y evaluación del comportamiento.
- Verificación de la estabilidad global de la estructura, y de la capacidad de los elementos estructurales, en todas las situaciones de carga posibles.

En este procedimiento que tiene como finalidad definir la geometría de la estructura, las fases no son independientes las unas de las otras, ni se trata de un procedimiento unidireccional. Los resultados obtenidos en cada fase hacen variar la geometría de la estructura, la cual se redefine iterativamente hasta alcanzar una solución que valide todos los requerimientos.

Las acciones consideradas en el cálculo, las combinaciones de estas, y las propiedades de los materiales utilizados en la estructura, se muestran en el ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO.

El modelo de elementos finitos utilizado para el análisis estructural de la cubierta, los procedimientos seguidos para determinar la forma de la membrana y las condiciones de estado tensional iniciales de la estructura, y las comprobaciones efectuadas para verificar el cumplimiento de los requisitos estructurales de la estructura proyectada, así como de cada uno de los elementos que la conforman, se muestran en el ANEJO 04. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

Se detallan a continuación los aspectos más relevantes del análisis estructural.

10.1. Análisis de cargas

La determinación de las acciones sobre la estructura se realiza teniendo en consideración las indicaciones presentes en el CTE DB SE-AE y las recomendaciones de la Norma UNE-EN 13782. Se tienen en cuenta 7 acciones de distinta naturaleza: peso propio, pretensado, viento, nieve, mantenimiento, carga equivalente y sismo.

El peso propio se considera en el cálculo aunque es una acción que no influye significativamente en los resultados debido a la ligereza de la estructura.

Ya que todos los elementos que conforman la estructura poseen función estructural, y por tanto se introducen en el modelo de cálculo, el peso propio se considera únicamente como propiedad de los materiales del modelo. Los pesos de los materiales empleados se recogen en la Tabla I.0.11.

Material	Peso propio
Acero estructural S275JOH	77 kN/m ³
Acero cables Grado 1670 N/mm ²	78 kN/m ³
Acero cables Grado 1770 N/mm ²	78 kN/m ³
Hormigón HA-25/B/20/XC2	24,5 kN/m ³
Poliéster (PES)/Policloruro de vinilo (PVC)	1,324 daN/m ²

Tabla I.0.11: Valores característicos del peso propio de los materiales. Elaboración: Propia.

En la acción de pretensado se considera una tensión inicial en toda la membrana de 6,20 kN/m en ambas direcciones, lo que supone que las fuerzas de tesado de los cables tomen valores entre 51 y 406 kN. Las fuerzas de tesado de cada uno de los cables se detallan en el apartado 04.3.1 del ANEJO 04. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

Los valores de cálculo de las acciones variables consideradas son:

- Q_1 Viento: se considera una presión dinámica $q_b = 0,42 \text{ kN/m}^2$ y 5 direcciones de incidencia. Los valores de presión estática q_e se obtienen a partir de un análi-

sis computacional de flujo, cuyos resultados se muestran en el apartado 02.6.3 del ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO.

- Q_2 Nieve: carga superficial $q_s = 0,2 \text{ kN/m}^2$ distribuida sobre toda la proyección horizontal de la membrana uniformemente.
- Q_3 Sobrecarga de mantenimiento: carga puntual $Q_3 = 1,50 \text{ kN}$ aplicada en diversos puntos de la estructura.
- Carga Q_{el} equivalente: carga superficial $q_{el} = 0,1 \text{ kN/m}^2$ distribuida parcialmente sobre zonas concretas de la cubierta para analizar los efectos de estados de carga asimétricos.

Se considera por último la acción accidental de sismo. Según la ubicación y condiciones de la estructura, se tienen unos valores de: aceleración sísmica básica $a_b = 0,07g$, coeficiente de contribución $K = 1,0$, coeficiente adimensional del riesgo $\rho = 1,0$, y coeficiente del terreno C de 1,6. Con esto se obtiene una aceleración sísmica de cálculo $a_c = 1,28 \cdot 1,0 \cdot 0,07g = 0,0896g$. Se considera en el modelo con el espectro de respuesta elástico mostrado en la Figura I.0.12.

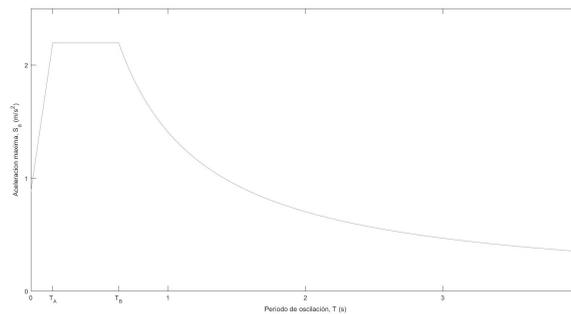


Figura I.0.12: Espectro de respuesta elástica. Elaboración: Propia.

10.2. Búsqueda de forma

En los sistemas estructurales de forma activa, el proceso de búsqueda de forma es un procedimiento equivalente al proceso de dimensionamiento de las secciones, que se realiza en los sistemas estructurales de sección activa. En las estructuras de membrana tensada, la estabilidad depende principalmente de la forma de la estructura y en menor medida de los espesores de los elementos estructurales; contrariamente a lo que sucede por ejemplo en las estructuras de hormigón, en las que la estabilidad depende fundamentalmente de la geometría y forma de las secciones. La forma ideal de la membrana es aquella que represente con mayor exactitud el flujo natural que las fuerzas realizan desde el punto de la superficie en el que se aplican hasta el punto de apoyo del terreno. [Engel, 2001]

En el apartado 04.2.2 del ANEJO 04. ANÁLISIS ESTRUCTURAL se recoge la descripción del procedimiento llevado a cabo para determinar la forma de la estructura; y en el apartado 04.3.1, la geometría y estado tensional obtenidos como resultado de este proceso en la última iteración.

10.3. Análisis global

Tras la obtención de la geometría inicial de la estructura, se realiza el análisis del comportamiento de la estructura bajo la acción de las cargas externas.

Este análisis realizado es del tipo estático no lineal de tercer orden o en grandes desplazamientos, debido a los grandes cambios de forma que se producen en la membrana para poder conseguir la posición de equilibrio, y a los diversos tipos de no linealidad que presenta la estructura.

Por un lado se tiene la no linealidad geométrica, que debido a los desplazamientos considerables de la membrana hace que cambie la rigidez de la estructura y los resultados no sean proporcionales a las acciones.

Por otro lado se tiene la no linealidad de las cargas, ya que estas dependen de la posición y forma de la estructura, que al ser notablemente variables, varían por tanto las magnitudes y direcciones de las cargas. Se considera esta no linealidad en el caso de la nieve, pero no resulta factible su consideración en el caso del viento.

La estructura también presenta una no linealidad de los materiales o mecánica, ya que tanto el acero como el PES/PVC varían su relación constitutiva principalmente en función del valor de tensiones aplicado y del historial de cargas. Tiene influencia también la temperatura, la fluencia, o la relajación, aunque con menos relevancia.

La aplicación de las cargas se realiza de forma gradual en 10 incrementos, se resuelven las ecuaciones de equilibrio en cada iteración con el método de Newton-Raphson, y se recalcula la matriz de rigidez global en cada incremento. Se realiza este análisis con el software RFEM5 [Dlubal, 2021].

En la Figura I.0.13 se muestra una vista de la discretización de la estructura utilizada en el análisis. Se compone de 8.451 nodos, 896 elementos finitos 1D (barras y cables) y 15.984 elementos finitos 2D (triangulares de 3 nodos y 3 GDL).

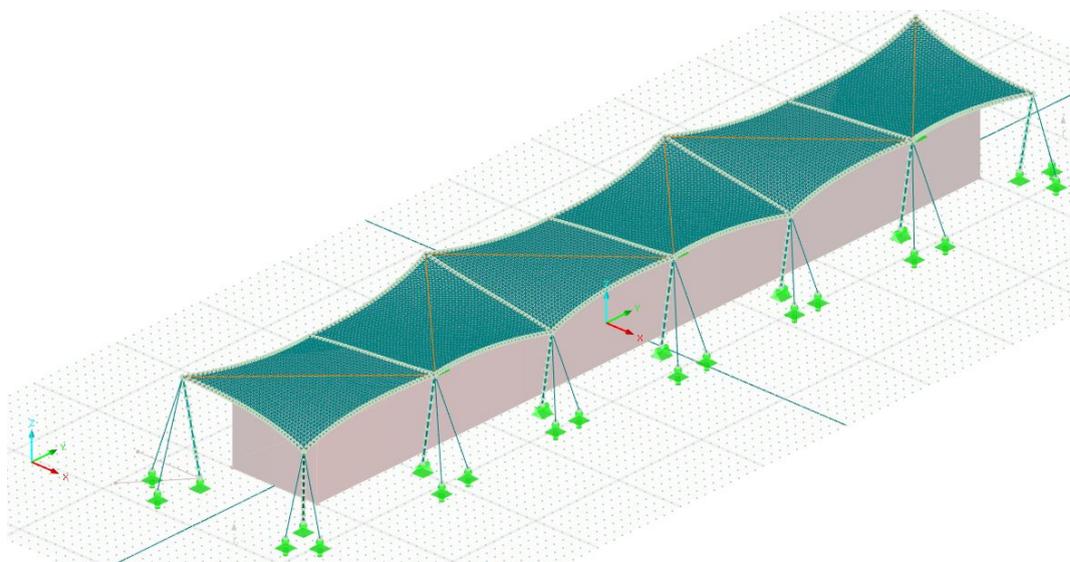


Figura I.0.13: Modelo de elementos finitos de la estructura. Elaboración: Propia.

10.4. Verificaciones

Para la validación de la geometría de la estructura, se realizan una serie de verificaciones a partir de los resultados del análisis global que deben cumplir cada uno de los elementos estructurales, así como la estructura de forma global.

Individualmente en cada uno de los elementos estructurales se verifica:

- La no plastificación de las barras comprimidas, para lo que debe cumplirse en todos los mástiles que $N_{Ed} < N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}$. La ratio más desfavorable obtenida es de 0,50.
- La resistencia a pandeo de los elementos comprimidos, para lo que debe cumplirse en todos los mástiles que $N_{Ed} < N_{b,Rd} = \frac{\chi Af_y}{\gamma_{M1}}$. La ratio más desfavorable obtenida es de 0,75.
- La resistencia a tracción de los cables, para lo que debe cumplirse que $F_{Ed} < F_{Rd} = \min \left\{ \frac{F_{uk}}{1,5\gamma_R}; \frac{F_k}{\gamma_R} \right\}$. La ratio más desfavorable obtenida es de 0,82.
- La limitación tensional en los cables, para lo que debe cumplirse que $\sigma_{Ed} < 0,45\sigma_{uk} = 0,45\frac{F_{uk}}{A_m}$. La ratio más desfavorable obtenida es de 0,85.
- La limitación tensional de la membrana, que se realiza según lo dispuesto en la Norma UNE-EN 13782 que considera coeficientes de seguridad parciales en la resistencia y en las acciones; y según lo dispuesto en la Guía, que considera únicamente un coeficiente de seguridad global en la resistencia del tejido. La ratio más desfavorable obtenida según la comprobación de la Norma UNE es de 0,23, y según la Guía es de 0,44.

Globalmente en la estructura se verifica:

- La ausencia de zonas de inversión de curvatura de la membrana, que puedan provocar zonas de acumulación de agua o suciedad. No es una verificación numérica, sino que debe observarse de manera individual las curvas de nivel de la configuración de la deformada en cada caso de carga. Se cumple esta condición en todos los estados de carga analizados.

Tras comprobar el cumplimiento de todas las verificaciones, se adopta como válida la geometría de la estructura analizada.

11. Detalles constructivos

A partir de la geometría de la estructura modelada, representada únicamente por elementos lineales y superficiales que confluyen en nodos sin dimensiones, el siguiente paso es la definición de los detalles constructivos que permiten pasar de esta estructura idealizada a la estructura finalmente construida.

Esto supone definir las formas de los patrones de tejido que deben cortarse para que una vez ensamblados, la forma resultante sea lo más próxima posible a la forma proyectada; y definir también los elementos que representan los nudos del modelo, en los que confluyen barras y cables, o confluyen estos con los elementos de cimentación.

Se definen más extensamente estos detalles en el ANEJO 05. PATRONAJE Y DETALLES CONSTRUCTIVOS.

11.1. Patronaje de la membrana

En el caso de la membrana, no resulta posible realizar la forma de la cubierta proyectada de una única pieza, pues el material del tejido viene suministrado por el fabricante en rollos de 267 cm de ancho. Por ello se definen 10 patrones en cada uno de los módulos que se ajusten a este ancho. Se dispone además un sobreaancho en los patrones con el fin de poder unir los diferentes patrones entre sí por medio de soldadura de alta frecuencia por solape en taller, y poder realizar dobladillos en el perímetro de la membrana por los que pasar las relingas.

La forma de cada uno de los patrones se muestra en el Documento II PLANOS.

En la Figura I.0.14 se muestra un esquema de la estructura en la que se representan los patrones que conforman la membrana.

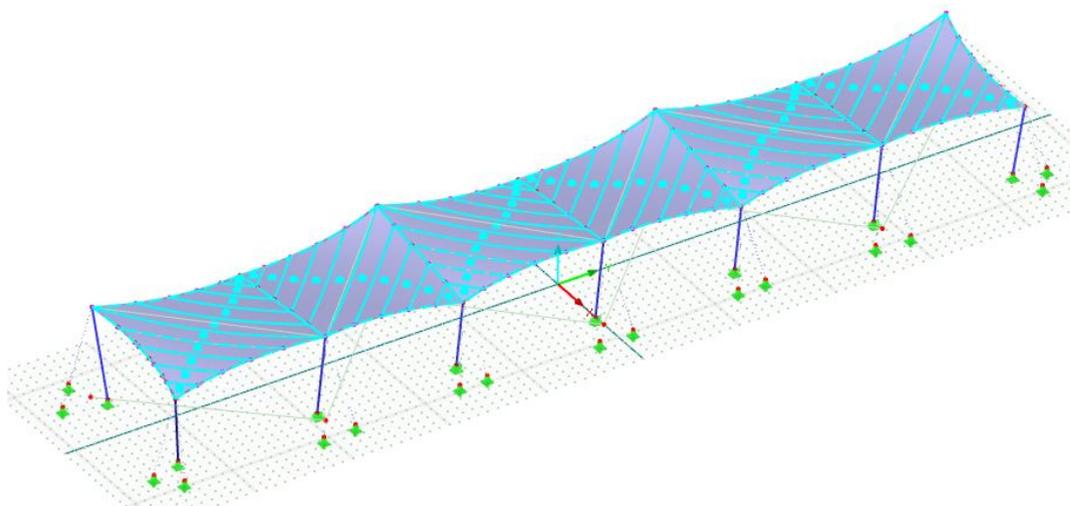


Figura I.0.14: Vista de la estructura con patrones de corte. Elaboración: Propia.

11.2. Detalles de uniones

En el ANEJO 05. PATRONAJE Y DETALLES CONSTRUCTIVOS se especifica también el tipo de unión a ejecutar para conectar los mástiles con las cimentaciones, los cables con los mástiles, los cables con la membrana y los cables con el terreno.

En la base de los mástiles internos de las alineaciones se plantea una unión tipo pasador en la cual se permite únicamente una de las dos rotaciones en este extremo. Esta unión está formada por dos orejetas soldadas a una placa embebida en la cimentación y una orejeta soldada en el extremo inferior del mástil, se unen estas tres orejetas por medio de un pasador.

En la base de los mástiles de esquina se plantea una unión tipo esfera y rótula que permite libertad de giros en la base de estos mástiles. Se suelda un tronco de tubo a la placa embebida en la cimentación y otro tronco de tubo al extremo del mástil, se unen ambos elementos por medio de la esfera.

En las uniones de ambos tipos de cables a los mástiles, por un lado se sueldan orejetas a los mástiles, por otro lado se disponen terminales en horquilla ajustables en los extremos de los cables. Ambos elementos se unen introduciendo el pasador del que disponen los elementos de horquilla en los agujeros de las orejetas. Los diámetros de los agujeros y pasadores, así como los espesores de las orejetas vienen definidos por los elementos de unión *Adjustable fork socket* que el fabricante [Redaelli Tecna S.P.A.] dispone en función del diámetro de cable.

En las conexiones de los cables a placas de anclajes, se utiliza el elemento *Adjustable bridge socket* del mismo fabricante en el extremo inferior de los vientos, que facilita su ajuste de tensión. Este elemento se une a la placa del anclaje introduciendo el pasador en una orejeta soldada a la placa.

En las zonas de unión de los paños de membrana a los mástiles por medio de las relingas, se conectan las membranas a los mástiles con cintas que evitan el desplazamiento de la membrana respecto de las relingas y aseguran la posición y una correcta transmisión de las fuerzas en el perímetro.

Las propiedades de cada uno de los elementos que conforman estas uniones se muestran con detalle en el Documento II PLANOS.

12. Plan de trabajos

Se definen las operaciones necesarias para ejecutar la estructura y para mantenerla en un estado óptimo durante su vida útil.

12.1. Fase de montaje

En el ANEJO 06. PROCESO CONSTRUCTIVO Y PROGRAMA DE TRABAJOS se definen las fases en las que se divide el proceso de montaje de la cubierta, estas son:

- Fase 1: Actuaciones previas, con una duración estimada de 3 días.
- Fase 2: Movimientos de tierra, con una duración estimada de 6 días.
- Fase 3: Cimentaciones, con una duración estimada de 7 días.
- Fase 4: Montaje de estructura metálica, con una duración estimada de 7 días.
- Fase 5: Instalación de membrana textil, con una duración estimada de 5 días.
- Fase 6: Acabados, con una duración estimada de 5 días.

Se estima que la realización de estos trabajos tendría una duración de 31 días laborables.

12.2. Fase de conservación

En el ANEJO 07. PLAN DE CONSERVACIÓN se definen las operaciones necesarias a realizar durante la fase de uso y explotación de la estructura, y la frecuencia con la que deben realizarse, con la finalidad de lograr que permanezca durante un mayor periodo de tiempo en condiciones aceptables sin ver comprometida su estabilidad, ni llegar a suponer un riesgo para los usuarios de la instalación.

Por un lado se establecen los requisitos de mantenimiento que debe cumplir la estructura, los cuales son un adecuado estado de limpieza, ausencia de procesos de corrosión, drenaje adecuado y estado de pretensado adecuado.

Por otro lado, se definen los controles e inspecciones que deben realizarse en los distintos elementos estructurales con el fin de comprobar que se encuentran en un estado adecuado, o detectar posibles daños en su etapa inicial que puedan ser reparados con una intervención sencilla que evite que se produzcan daños más graves o sean necesarias posteriormente operaciones de reparación o sustitución más complejas.

Se incluyen por último las actuaciones que deberían llevarse a cabo en la estructura en caso de que se produjeran sucesos accidentales como incendios, nevadas o fuertes temporales de viento.

13. Valoración económica

En el Documento III. VALORACIÓN ECONÓMICA se realiza la valoración económica de la ejecución material, que se organiza de la forma:

CAPÍTULO	IMPORTE	PORCENTAJE
1 ACTUACIONES PREVIAS	576,00 €	0,20 %
2 MOVIMIENTOS DE TIERRA	1.861,60 €	0,64 %
3 CIMENTACIONES	49.455,74 €	16,88 %
4 ESTRUCTURA METÁLICA	57.176,33 €	19,51 %
5 CUBIERTA TEXTIL	167.957,62 €	57,32 %
6 ACABADOS	15.969,30 €	5,45 %
TOTAL P.E.M.	292,996,60 €	100,00 %

Tabla I.0.12: Valoración económica de la ejecución material. Elaboración: Propia.

Considerando los incrementos debidos a gastos generales (13% P.E.M.), beneficio industrial (6% P.E.M.), e I.V.A. (21% (P.E.M. + (13% + 6%) P.E.M.)), la valoración económica final asciende a la cantidad de 421.885,80 € (CUATROCIENTOS VEINTIÚN MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y CINCO EUROS CON OCHENTA CÉNTIMOS).

14. Conclusiones

Atendiendo a los resultados expuestos en los diversos Anejos, se puede concluir que en este proyecto básico se ha propuesto una solución viable que resuelve las necesidades funcionales que la estructura actual presentaba, cumpliendo con los distintos condicionantes que el emplazamiento, la propia estructura y el deporte desarrollado en esta suponían.

La singularidad de la tipología planteada trata de resaltar la singularidad del deporte autóctono que se practica en el espacio en el cual se integra.

En València, a julio de 2022



Francisco Fabregat Barberán

ANEJO 01. ESTUDIO DE SOLUCIONES

01.1. Objeto del anejo	2
01.2. Necesidad	2
01.3. Metodología	2
01.4. Definición de alternativas	3
01.4.1. A_1 , pórticos transversales con dintel tipo viga de acero y chapa metálica sobre correas en cubierta	4
01.4.2. A_2 , pórticos transversales con dintel tipo cercha de acero y chapa metálica sobre correas en cubierta	4
01.4.3. A_3 , pórticos longitudinales de acero con paneles autoportantes en cubierta	4
01.4.4. A_4 , estructura de membrana tensada sobre estructura de acero	5
01.5. Determinación de criterios e indicadores	5
01.5.1. C_1 , criterio coste económico	5
01.5.2. C_2 , criterio eficiencia estructural	7
01.5.3. C_3 , criterio tiempo de construcción	8
01.5.4. C_4 , criterio estética	9
01.5.5. Resumen de los criterios	10
01.6. Evaluación de las alternativas	11
01.6.1. Evaluación alternativa A_1	11
01.6.2. Evaluación alternativa A_2	11
01.6.3. Evaluación alternativa A_3	11
01.6.4. Evaluación alternativa A_4	12
01.7. Selección de la solución	12
01.8. Definición de la solución	13
01.8.1. Sistemas estructurales	13
01.8.2. Determinación de los criterios	19
01.8.3. Solución adoptada	22

01.1. Objeto del anejo

El objeto del presente anejo es mostrar el procedimiento seguido para definir la tipología estructural óptima que posibilite la resolución del problema planteado y cumpla con las necesidades existentes. Para ello se realiza una comparación entre diversas tipologías comúnmente utilizadas en las estructuras de cubiertas de recintos deportivos, y con un análisis multicriterio se escoge la tipología óptima.

Una vez escogida esta tipología óptima, se concretiza la solución con la elección del sistema estructural más apropiado.

01.2. Necesidad

Por parte del Ayuntamiento de Real de Gandía en el año 2018, se detectó que en el recinto deportivo “Carrer de pilota regidor Vicent Mascarell” era conveniente la instalación de una cubierta, con la finalidad de que este recinto pudiera estar operativo en un mayor número de días al año, y se incrementase el confort de los usuarios, evitando los problemas ocasionados por la ausencia de sombra o la presencia de lluvia.

Con esta finalidad de evitar las molestias ocasionadas por la lluvia y los rayos de Sol, la solución adoptada debe de cubrir en su totalidad el espacio de juego. Y cubrir además una franja adicional al perímetro de al menos 2 m de ancho.

La instalación existente está formada por un espacio de juego rectangular de dimensiones 9,5x80 (760 m²), delimitado por cerramientos verticales en forma de paredes de ladrillo en algunos puntos del perímetro y mallas metálicas en otros. Se considera que estos cerramientos tienen únicamente la función de delimitar el espacio de juego y no sería apropiado asignarles la función estructural de sustentar el peso de la cubierta. Por ello la estructura de cubierta que se proyecte debe ser independiente de la estructura que delimita el recinto de juego.

01.3. Metodología

La elección de la tipología óptima, se realiza mediante un análisis multiatributo de suma ponderada. [Yepes, 2018] [Aznar Bellver, 2012]

Por una parte, se escogen n alternativas A_j donde ($j = 1, 2, \dots, n$), que corresponden con n tipologías estructurales posibles como solución del problema que se desea resolver. Las alternativas escogidas se detallan en la sección 01.4.

Por otra parte, se establecen los m criterios C_i donde ($i = 1, 2, \dots, m$), que sirven para evaluar los diferentes atributos de las alternativas.

A cada criterio se le asigna un peso w_i , la suma de los cuales es igual a 1. Los valores de estos pesos se definen de forma subjetiva, y el mayor o menor valor de estos pesos representa la mayor o menor influencia que se pretende que el criterio tenga en la determinación de la tipología.

Definidos las alternativas y los criterios, el siguiente paso es realizar una ordenación de las alternativas según estos criterios. Esta ordenación se busca que sea mayormente objetiva, se introducen el mayor número de criterios de tipo cuantitativo posibles. En estos criterios se definen unos indicadores representativos.

Los valores p_{ji} de estos indicadores se asigna a partir de una serie de proyectos de construcción de estructuras de cubiertas de estas tipologías ejecutados en España en los últimos 5 años, de los cuales se extraen las magnitudes pertinentes para definir el valor de cada indicador. La documentación de estos proyectos ha sido obtenida del sitio web contrataciondelestado.es. [Ministerio de Hacienda, b]

Debido a que los valores de cada uno de estos indicadores obtenidos de los proyectos puede adoptar el valor de cualquier número racional positivo, se normalizan los valores de los indicadores mediante diversas funciones $f_i = (p_{ji})$ y se obtienen las puntuaciones r_{ji} limitadas a un rango de valores entre 0 y 10, se posibilita así la confrontación de los valores de cada criterio en una misma escala. Los criterios establecidos y las funciones utilizadas se detallan en la sección 01.5. En el caso de los criterios subjetivos, se asignan directamente puntuaciones en una escala de 0 a 10 en función de las cualidades observadas.

El último paso es la agregación de las puntuaciones r_{ji} correspondientes a una misma alternativa A_j , según la ecuación 1.1, y se obtiene un índice I_j para cada alternativa, en una escala entre 0 y 10. Resulta escogida como alternativa óptima aquella cuya puntuación agregada I_j sea mayor.

$$I_j = \sum_{i=1}^m r_{ji} \cdot w_i \quad (1.1)$$
$$\{I_j\} = [r_{ji}] [w_i]$$

Una vez escogida la tipología óptima, se evalúan los distintos sistemas estructurales de esta tipología que serían de posible aplicación y mediante una nueva evaluación multiatributo se escoge el sistema estructural más apropiado para el caso que se plantea resolver.

01.4. Definición de alternativas

Se establece un total de 4 tipologías alternativas A_j , donde ($j = 1, 2, 3, 4$), que se consideran viables como resolución del problema planteado. Estas tipologías son:

- Alternativa A_1 : pórticos transversales con dintel tipo viga de acero y chapa metálica sobre correas en cubierta.
- Alternativa A_2 : pórticos transversales con dintel tipo cercha de acero y chapa metálica sobre correas en cubierta.
- Alternativa A_3 : pórticos longitudinales de acero con paneles autoportantes en cubierta.
- Alternativa A_4 : estructura de membrana tensada sobre estructura de acero.

A continuación se detalla cada una y se indican los proyectos escogidos como referencia.

01.4.1. A_1 , pórticos transversales con dintel tipo viga de acero y chapa metálica sobre correas en cubierta

Consiste en cubrir la superficie con el sistema estructural de pórticos metálicos de perfiles laminados a lo largo de una de las direcciones y unidos entre sí por correas transversales en la otra dirección, más el uso de paneles metálicos como elemento superficial.

Los proyectos tomados como referencia para esta tipología, se indican en la Tabla I.1.1.

Proyecto	Código	Sup. (m ²)
Cubrición de pista deportiva en Banejuzar	A_1 -Banejuzar	749
Cubrición de cancha CEIP Villa de Firgas	A_1 -Firgas	1.080

Tabla I.1.1: Proyectos de referencia alternativa A_1 . Elabroación: Propia.

01.4.2. A_2 , pórticos transversales con dintel tipo cercha de acero y chapa metálica sobre correas en cubierta

Se trata de una alternativa similar a la A_1 pero en este caso se sustituyen las vigas de perfiles laminados de los pórticos por cerchas trianguladas.

Los proyectos tomados como referencia para esta tipología, se indican en la Tabla I.1.2.

Proyecto	Código	Sup. (m ²)
Cubierta de pista polideportiva en el Colegio San Javier	A_2 -Escatron	975
Cubierta de pista deportiva en CP Dolores Escámez	A_2 -Lorqui	800
Cubierta de pista deportiva en CEIP Maestro J. Varela	A_2 -DosHermanas	871

Tabla I.1.2: Proyectos de referencia alternativa A_2 . Elabroación: Propia.

01.4.3. A_3 , pórticos longitudinales de acero con paneles autoportantes en cubierta

Se trata de cubrir la superficie con un elemento metálico que en este caso presenta una mayor contribución a la estabilidad global de la estructura. Esta superficie es de simple curvatura, habitualmente una chapa grecada, que apoya sobre una estructura perimetral de pórticos. En este caso no se necesitan disponer elementos estructurales lineales sobre la huella a cubrir, se disponen únicamente en el perímetro. Los proyectos tomados como referencia para esta tipología con el fin de establecer el valor de los indicadores de cada criterio, se indican en la Tabla I.1.3.

Proyecto	Código	Sup. (m ²)
Cubierta de pista polideportiva en CP Ciudad de Nara	A ₃ -Toledo	1.208
Cubrición de pista deportiva en pabellón L.A. Samperio	A ₃ -Corrales	1.219
Cubierta de pista polideportiva en CP Gómez Manrique	A ₃ -Manrique	968
Cubierta de pista de tenis en Villasana de Mena	A ₃ -Villasana	800

Tabla I.1.3: Proyectos de referencia alternativa A₃. Elabroación: Propia.

01.4.4. A₄, estructura de membrana tensada sobre estructura de acero

Esta alternativa supone la realización de una cubierta en la cual el elemento superficial es de un material textil que se encuentra en su totalidad tensado, y es sustentado en algunos casos por un entramado de barras comprimidas y cables traccionados. Los proyectos tomados como referencia para esta tipología con el fin de establecer el valor de los indicadores de cada criterio, se indican en la Tabla I.1.4.

Proyecto	Código	Sup. (m ²)
Cubierta de la pista del parque Antón Sevillano	A ₄ -Sevilla	1.408
Pista de pádel y cubierta en San Cristóbal de Segovia	A ₄ -SCristobal	828
Proyecto de urbanización en Azkoitia	A ₄ -Azkoitia	520
Proyecto de cubierta textil en Ajo	A ₄ -Bareyo	250

Tabla I.1.4: Proyectos de referencia alternativa A₄. Elabroación: Propia.

01.5. Determinación de criterios e indicadores

Una vez planteadas las posibles soluciones, se establecen los 4 criterios C_i , donde ($i = 1, 2, \dots, 4$), empleados para comparar entre sí las 4 alternativas. Los 3 primeros de estos criterios son cuantitativos y se obtienen las puntuaciones a partir de los datos del proyecto, el último criterio es de tipo cualitativo y se asignan los valores de las puntuaciones tras una valoración subjetiva.

01.5.1. C₁, criterio coste económico

El primer criterio establecido es el coste económico de cada una de las tipologías. Con este criterio se busca tener en cuenta que el coste económico de la solución escogida sea bajo. Es un criterio utilizado con frecuencia a la hora de escoger entre posibles proyectos o soluciones, así como en las licitaciones.

Se asigna como indicador de este criterio el coste de ejecución material referente a los capítulos de cimentación, estructura y cubierta de cada tipología, obtenidos de los presupuestos de los proyectos que se toman como referencia. Para tener en cuenta que la

superficie que cubren los distintos proyectos toma un amplio rango de valores, se mide en €/m². En los demás criterios en los que se toman magnitudes del proyecto como indicadores, se divide de igual manera el valor de estas magnitudes entre el valor de la superficie cubierta por cada proyecto.

En la Tabla I.1.5 se muestran la suma de los costes en cada proyecto de las unidades incluidas en los capítulos mencionados anteriormente. Se muestran también los valores de los indicadores p_1 obtenidos al dividir los costes entre las superficies cubiertas.

Código	Coste (€)	Indicador p_1 (€/m ²)
A1-Benejuzar	147.172	136,27
A1-Firgas	103.471	138,15
A2-DosHermanas	37.694	43,29
A2-Escatron	83.901	86,03
A2-Lorqui	53.416	66,81
A3-Corrales	90.202	74,00
A3-Manrique	48.160	49,75
A3-Toledo	101.196	83,77
A3-Villasana	61.656	77,07
A4-Azkoitia	56.515	108,68
A4-Bareyo	29.916	119,67
A4-SCristobal	42.025	50,75
A4-Sevilla	96.159	68,29

Tabla I.1.5: Indicadores criterio C_1 . Elaboración: Propia.

Los valores de los indicadores correspondientes a cada una de las alternativas se obtienen realizando el promedio de los valores de los indicadores de los proyectos correspondientes a una misma alternativa.

La función utilizada para normalizar los valores del indicador de cada alternativa es la de normalización por la suma, mostrada en la ecuación 1.2. Se divide el valor del indicador de cada una de las alternativas entre la suma de los indicadores de las 4 alternativas. Con ello se obtienen las puntuaciones normalizadas ordenadas de mayor a menor en un rango entre 0 y 1, donde la alternativa con mayor puntuación corresponde con la de mayor coste económico. Debido a que se pretende que los valores de las puntuaciones estén comprendidos entre 0 y 10, y que además obtenga mayor puntuación la alternativa más económica, se resta a 1 el cociente obtenido y el resultado de esta resta se multiplica por 10. Se obtienen así las puntuaciones en el orden y rango pretendidos.

$$r_{j1} = f_i(p_{j1}) = 10 \cdot \left(1 - \frac{p_{j1}}{\sum_{j=1}^4 p_{j1}} \right) \quad (1.2)$$

Aplicando la función mencionada, se obtienen las puntuaciones mostradas en la Tabla I.1.6. A este criterio se le asigna un peso $w_1 = 0,35$, pues se considera que debe ser uno de

los criterios más predominantes en la valoración global.

Alternativa	Promedio p_{j1} (€/m ²)	Puntuación r_{j1}
A ₁ Pórticos metálicos	137,21	6,19
A ₂ Cerchas metálicas	65,38	8,19
A ₃ Paneles autoportantes	71,15	8,03
A ₄ Membrana tensada	86,85	7,59

Tabla I.1.6: Puntuaciones criterio C_1 . Elaboración: Propia.

01.5.2. C_2 , criterio eficiencia estructural

El segundo de los criterios es la eficiencia de las tipologías. Con este criterio se busca que la tipología escogida consiga cubrir la mayor superficie posible empleando el menor peso posible de materiales, con el objetivo de no realizar una estructura que suponga un elevado uso de materia prima.

Se toma como indicador de este criterio el ratio entre el peso de los materiales que componen la estructura, excluyendo el peso de las cimentaciones, y la superficie que cubren. Se expresa en kp/m^2 .

En la Tabla I.1.7 se muestran en los pesos de las estructuras de cada uno de los proyectos. Dividiendo estos entre la superficie cubierta, se obtienen los valores de los indicadores p_2 .

Código	Peso (kp)	Indicador p_2 (kp/m ²)
A1-Benejuzar	75.187	69,62
A1-Firgas	28.304	37,79
A2-DosHermanas	21.742	24,97
A2-Escatron	30.191	30,96
A2-Lorqui	23.853	29,83
A3-Corrales	42.317	34,71
A3-Manrique	27.309	28,21
A3-Toledo	44.880	37,15
A3-Villasana	31.258	39,07
A4-Bareyo	2.228	8,91
A4-SCristobal	12.365	14,93

Tabla I.1.7: Indicadores criterio C_2 . Elaboración: Propia.

La función empleada para normalizar los valores de este indicador es análoga a la utilizada en el criterio precedente, la de normalización por la suma. Se sigue por tanto el mismo procedimiento expuesto en el apartado anterior para llegar a la función que se muestra en

la ecuación 1.3.

$$r_{j2} = f_i(p_{j2}) = 10 \cdot \left(1 - \frac{p_{j2}}{\sum_{j=1}^4 p_{j2}} \right) \quad (1.3)$$

Habiendo obtenido el promedio en los valores de los indicadores de cada alternativa y aplicando la función mencionada, se obtienen las puntuaciones mostradas en la Tabla I.1.8. A este criterio se le asigna un peso $w_2 = 0,35$, pues se considera que disponer una tipología eficiente que lleve a un menor uso de materia prima, es de igual importancia que disponer una tipología que sea más económica.

Alternativa	Promedio p_{j2} (kp/m ²)	Puntuación r_{j2}
A_1 Pórticos metálicos	53,7	5,84
A_2 Cerchas metálicas	28,6	7,78
A_3 Paneles autoportantes	34,8	7,30
A_4 Membrana tensada	11,9	9,08

Tabla I.1.8: Puntuaciones criterio C_2 . Elaboración: Propia.

01.5.3. C_3 , criterio tiempo de construcción

El tercer criterio establecido es la duración de la construcción de la estructura y la cubierta. Se incluye con el objetivo de que la tipología escogida se construya en un tiempo lo más breve posible. Por un lado, este hecho sería beneficioso para el constructor y, por otro lado, los usuarios verían interrumpido el servicio de la instalación en un menor tiempo. Como indicador se utiliza una estimación del número de días (d) que duraría la instalación de una cubierta sobre una superficie de 760 m², según cada una de las tipologías. Para ello se tienen en cuenta los proyectos de los que se ha podido obtener el programa de trabajos; se toma por una parte la duración estimada de las fases de Estructura y de Cubierta (dur_j), y por otra parte la superficie (sup_j) que cubre cada proyecto. Aplicando una proporcionalidad para un área de 760 m², se obtienen los indicadores según la ecuación 1.4.

$$p_{j3} = \left(\frac{760}{sup_j} \right) \cdot dur_j \quad (1.4)$$

En la Tabla I.1.9 se muestran los valores de los indicadores obtenidos de los proyectos que incluyen el programa de trabajos.

Código	Duración (d)	Indicador p_3 (d)
A1-Benejuzar	30	21,1
A1-Firgas	25	25,3
A2-Escatron	30	23,4
A2-Lorqui	30	28,5
A3-Toledo	20	12,6
A3-Corrales	30	18,7
A4-Sevilla	30	16,2

Tabla I.1.9: Indicadores criterio C_3 . Elaboración: Propia.

Para normalizar los valores de este indicador, se establecen una función a tramos con 5 niveles posibles, como se indica en la ecuación 1.5. Si el plazo fuera igual o menor a 3 semanas (15 días laborables) se asigna la máxima puntuación, y por cada semana que se incrementase la duración se disminuye un nivel, hasta el caso en que la duración fuera superior a 1 mes y medio que para ese caso se asigna una puntuación de 0 en este criterio.

$$r_{j3} = f_i(p_{j3}) = \begin{cases} 10 & \text{si } p_{j3} \in [0, 15] \\ 7,5 & \text{si } p_{j3} \in (15, 20] \\ 5 & \text{si } p_{j3} \in (20, 25] \\ 2,5 & \text{si } p_{j3} \in (25, 30] \\ 0 & \text{si } p_{j3} > 30 \end{cases} \quad (1.5)$$

Habiendo obtenido el promedio en los proyectos de cada alternativa y aplicando la función mencionada, se obtienen las puntuaciones mostradas en la Tabla I.1.10. Este criterio se considera menos importante que los dos anteriores, por lo que se le asigna un peso $w_3 = 0,18$ con lo que influye la mitad en el resultado final que cada uno de los otros.

Alternativa	Promedio p_{j3} (d)	Puntuación r_{j3}
A_1 Pórticos metálicos	23,2	5
A_2 Cerchas metálicas	25,9	2,5
A_3 Paneles autoportantes	15,6	7,5
A_4 Membrana tensada	16,2	7,5

Tabla I.1.10: Puntuaciones criterio C_3 . Elaboración: Propia.

01.5.4. C_4 , criterio estética

El último criterio establecido es el valor estético de cada una de las tipologías. Ese criterio se analiza de forma subjetiva, las puntuaciones se otorgan en la escala de 0 a 10 en función de la propia percepción.

Las puntuaciones que se asignan a cada alternativa se muestran en la Tabla I.1.11.

Alternativa	Puntuación r_{j4}
A_1 Pórticos metálicos	8
A_2 Cerchas metálicas	6
A_3 Paneles autoportantes	7
A_4 Membrana tensada	8

Tabla I.1.11: Puntuaciones criterio C_4 . Elaboración: Propia.

A este criterio se le asigna un peso $w_4 = 0,12$. Menor peso de todos pues no se considera un criterio importante y por tratarse de un criterio que depende de la apreciación de la persona que realice el análisis.

01.5.5. Resumen de los criterios

El vector de pesos $[w_i]$ que se obtiene es el siguiente:

$$[w_i] = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,35 \\ 0,35 \\ 0,18 \\ 0,12 \end{bmatrix}$$

En la Tabla I.1.12 se resumen los aspectos de cada uno de los criterios.

Criterio	Indicador	Unidad	Objetivo
C_1 Coste	Precio de cimentación y cubierta	€/m ²	Minimizar
C_2 Eficiencia	Peso propio de las estructuras	kp/m ²	Minimizar
C_3 Tiempo	Duración estimada construcción	d	Minimizar
C_4 Estética	Apreciación subjetiva	-	-

Tabla I.1.12: Resumen criterios. Elaboración: Propia.

01.6. Evaluación de las alternativas

Tras definir los criterios con los que se evalúan las alternativas y asignar las puntuaciones de cada alternativa en cada uno de los criterios, se agrupan las puntuaciones de cada alternativa.

01.6.1. Evaluación alternativa A_1

Atendiendo a los indicadores de la Alternativa A_1 en cada criterio, las puntuaciones que se obtienen para esta alternativa son: una puntuación $r_{11} = 6,19$ en el criterio C_1 , una puntuación $r_{12} = 5,84$ en el criterio C_2 , una puntuación $r_{13} = 5$ en el criterio C_3 , y una puntuación $r_{14} = 6$ en el criterio C_4 . Con lo que la fila $[r_{1i}]$ correspondiente a esta alternativa en la matriz de puntuaciones resulta:

$$[r_{1i}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6,19 & 5,84 & 5 & 6 \end{bmatrix}$$

La solución de pórticos de perfiles laminados de acero, se trata de una alternativa de un elevado coste económico respecto a las otras y que emplea una elevada cantidad de material, lo que resulta poco eficiente.

01.6.2. Evaluación alternativa A_2

Atendiendo a los indicadores de la Alternativa A_2 en cada criterio, las puntuaciones que se obtienen para esta alternativa son: una puntuación $r_{21} = 8,19$ en el criterio C_1 , una puntuación $r_{22} = 7,78$ en el criterio C_2 , una puntuación $r_{23} = 2,5$ en el criterio C_3 , y puntuación $r_{24} = 8$ en el criterio C_4 . Con lo que la fila $[r_{2i}]$ correspondiente a esta alternativa en la matriz de puntuaciones resulta:

$$[r_{2i}] = \begin{bmatrix} r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,19 & 7,78 & 2,5 & 8 \end{bmatrix}$$

La solución de cerchas metálicas resulta la opción más económica, pero presenta la desventaja del elevado tiempo de construcción.

01.6.3. Evaluación alternativa A_3

Atendiendo a los indicadores de la Alternativa A_3 en cada criterio, las puntuaciones que se obtienen para esta alternativa son: una puntuación $r_{31} = 8,03$ en el criterio C_1 , una puntuación $r_{32} = 7,30$ en el criterio C_2 , una puntuación $r_{33} = 7,5$ en el criterio C_3 , y puntuación $r_{34} = 7$ en el criterio C_4 . Con lo que la fila $[r_{3i}]$ correspondiente a esta alternativa en la matriz de puntuaciones resulta:

$$[r_{3i}] = \begin{bmatrix} r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,03 & 7,30 & 7,5 & 7 \end{bmatrix}$$

La solución de paneles autoportantes es una de las alternativas más económicas, destaca también por ser la que se construiría en un menor tiempo.

01.6.4. Evaluación alternativa A_4

Atendiendo a los indicadores de la Alternativa A_4 en cada criterio, las puntuaciones que se obtienen para esta alternativa son: una puntuación $r_{41} = 7,59$ en el criterio C_1 , una puntuación $r_{42} = 9,08$ en el criterio C_2 , una puntuación $r_{43} = 7,5$ en el criterio C_3 , y puntuación $r_{44} = 8$ en el criterio C_4 . Con lo que la fila $[r_{4i}]$ correspondiente a esta alternativa en la matriz de puntuaciones resulta:

$$[r_{4i}] = \begin{bmatrix} r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,59 & 9,08 & 7,5 & 8 \end{bmatrix}$$

La solución de membrana tensada, presenta la gran ventaja de cubrir el espacio con la menor cantidad de material posible. Destaca también por el bajo tiempo que durarían los trabajos de construcción.

01.7. Selección de la solución

Una vez evaluadas todas las alternativas, se agrupan sus puntuaciones formando la matriz de puntuaciones $[r_{ji}]$:

$$[r_{ji}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6,19 & 5,84 & 5 & 6 \\ 8,19 & 7,78 & 2,5 & 8 \\ 8,03 & 7,30 & 7,5 & 7 \\ 7,59 & 9,08 & 7,5 & 8 \end{bmatrix}$$

Esta matriz se multiplica por el vector de pesos $[w_i]$, y se obtienen los índices globales I_j de cada una de las alternativas, que es el indicador final que sirve para la selección de la tipología más adecuada.

$$\{I_j\} = [r_{ji}] [w_i] = \begin{bmatrix} 6,19 & 5,84 & 5 & 6 \\ 8,19 & 7,78 & 2,5 & 8 \\ 8,03 & 7,30 & 7,5 & 7 \\ 7,59 & 9,08 & 7,5 & 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,35 \\ 0,35 \\ 0,18 \\ 0,12 \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} 5,83 \\ 7,00 \\ 7,56 \\ 8,14 \end{Bmatrix}$$

A la vista de los resultados de I_j obtenidos, se escoge la tipología de membrana tensada para resolver el problema que se aborda.

De los 4 criterios tenidos en cuenta, destaca principalmente la eficacia para cubrir una determinada superficie con el menor uso de material posible. Este hecho es una de las ventajas que se asocian a las tensoestructuras. En referencia al criterio económico, aunque esta tipología no es la más económica de las analizadas, el coste estimado no es excesivamente superior que el de las alternativas más económicas, también es una desventaja de esta tipología el elevado coste de la membrana textil. En cuanto al periodo de duración estimado de las obras, esta tipología sería una de las soluciones en las que sería menor.

01.8. Definición de la solución

Una vez establecida la tipología de la estructura, el siguiente procedimiento es concretar el tipo de sistema estructural a disponer. Uno de los aspectos que destacan de esta tipología es la infinidad de formas que pueden adoptar las estructuras, debido a la gran variedad que se tienen de sistemas de estabilización y apoyos posibles.

En este caso, al tratarse de una solución independiente a la estructura ya existente y de disponer de suficiente espacio en los 4 márgenes de la huella rectangular, se tienen pocos condicionantes geométricos para la solución.

La elección del sistema estructural se realiza siguiendo un procedimiento similar al empleado para determinar la tipología estructural. Se plantean 4 sistemas estructurales, y 4 criterios para evaluar estos sistemas. Se asignan las puntuaciones a los sistemas en cada uno de los criterios, los pesos a cada uno de los criterios y se calcula la puntuación global de cada una de las alternativas. Ante la dificultad de poder obtener proyectos que se correspondan con cada uno de los sistemas estructurales, los criterios establecidos son de tipo subjetivo.

01.8.1. Sistemas estructurales

En primer lugar, se definen las posibles soluciones de esta tipología que pudieran ser aplicables al problema. Se toman como referencia los sistemas estructurales recogidos en el libro *Sistemas de estructuras* [Engel, 2001], y los ejemplos de construcciones ya realizadas que se observan en la web de la Asociación TensiNet [TensiNet Association].

Los sistemas utilizados comúnmente se disponen para cubrir una huella en la cual las dos dimensiones son similares, huellas cuadradas o circulares, o una huella rectangular con pequeñas diferencias entre los valores de los lados de la huella. En este caso, se tiene un como huella un rectángulo de 9,5 m x 80 m, lo cual hace que el número de posibles soluciones se reduzca al no ser posible la aplicación de varios de los sistemas estructurales conocidos. Se descartan también los sistemas con apoyos interiores debido a que no sería lógico ocupar el espacio de juego con mástiles.

Atendiendo a este par de condiciones, se escogen 4 sistemas estructurales que sería posible aplicar al caso que se plantea resolver.

01.8.1.1. Sistema S_1 : Sistema en forma de tienda con puntos de soporte y anclaje alternados con superficies onduladas

Este sistema estructural consiste en apoyar el elemento superficial sobre una sucesión de crestas (cables de curvatura cóncava) y valles (cables de curvatura convexa). Con estos contornos de curvatura opuesta, se consigue que la membrana adquiera una doble curvatura negativa.

La membrana se apoya sobre una sucesión de puntos bajos y altos, donde los puntos altos se encuentran en las cabezas de mástiles y los puntos bajos pueden formarse simplemente con cables que se anclan al terreno.

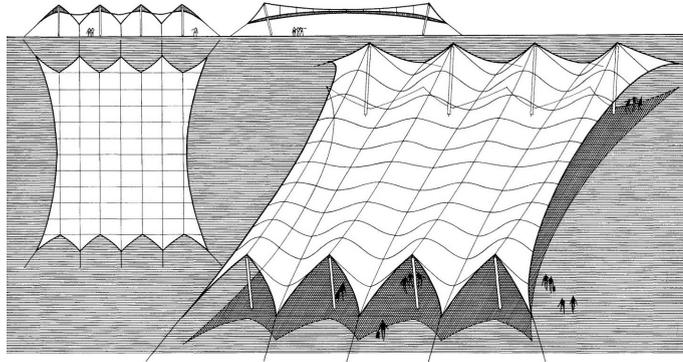


Figura I.1.1: Croquis estructura Sistema S_1 . Fuente: [Engel, 2001].

Como ejemplo de aplicación de este sistema se pueden encontrar la cubierta realizada en el Folklife Pavilion (Philadelphia, Estados Unidos), mostrado en la Figura I.1.2, o la cubierta del centro comercial Patio Tulancingo (Hidalgo, Mexico), Figura I.1.3.



Figura I.1.2: Cubierta Folklife Pavilion, Philadelphia. Fuente: [TensiNet Association].



Figura I.1.3: Cubierta centro comercial Patio Tulancingo, Hidalgo. Fuente: [TensiNet Association].

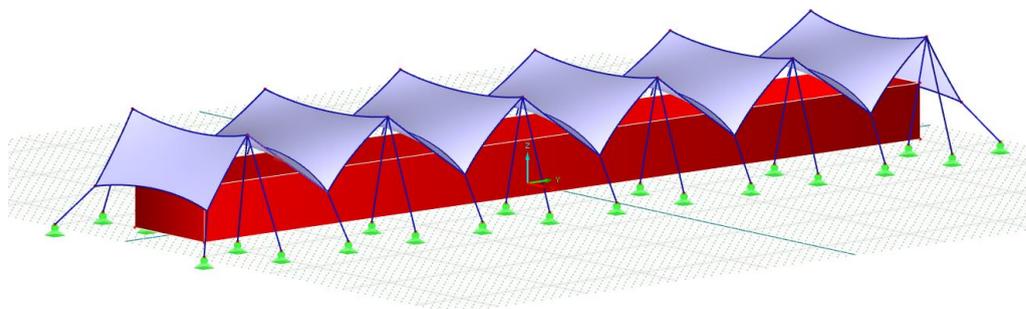


Figura I.1.4: Esquema estructural Sistema S_1 aplicado al caso de estudio. Elaboración: Propia.

01.8.1.2. Sistema S_2 : Sistema en forma de tienda con estructura suspendida para puntos altos alineados

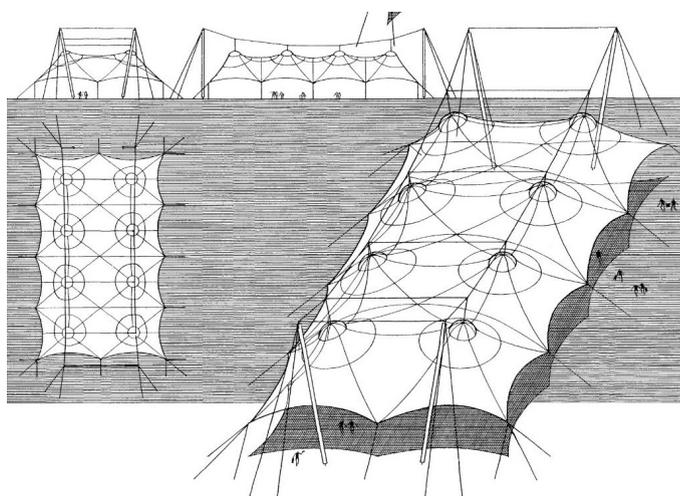


Figura I.1.5: Croquis estructura Sistema S_2 . Fuente: [Engel, 2001].

Este sistema estructural consiste en la sustentación de la membrana a través de dos filas de puntos altos interiores a la superficie. Estas filas de puntos altos se consiguen con dos cables suspendidos entre mástiles situados en los extremos de la superficie, y de estos cables cuelgan a su vez otros cables que los conectan con la membrana. La forma de trabajar de esta estructura sería análoga a la de un puente colgante; los mástiles de los extremos realizan la función de los pilonos, los cables que unen los mástiles serían los cables principales, y los cables que cuelgan de estos serían las péndolas. Además de estos elementos se tienen cables por debajo de la cota de la membrana que unen el perímetro de esta directamente de la cimentación, y otros cables que tienen la función de estabilizar las dos estructuras de sustentación, que son cables horizontales entre estas estructuras y cables de contraviento que unen las cabezas de los mástiles al terreno.

La membrana se refuerza con cables que siguen las direcciones de las crestas (unión entre dos puntos de sustentación), los valles (unión entre dos puntos bajos de lados opuestos) y relingas en los bordes.

En las fuentes consultadas no se encuentran ejemplos de aplicaciones de este sistema concreto. Una solución similar es la empleada en Goodwood Racecourse (Chichester, Reino Unido), mostrada en la Figura I.1.6, donde la membrana en los puntos altos no adopta la misma forma que la solución planteada, pero sí que se adopta una estructura de sustentación similar aunque dispuesta en una única fila en este caso.



Figura I.1.6: Cubierta del Goodwood Racecourse, Chichester. Fuente: [TensiNet Association].

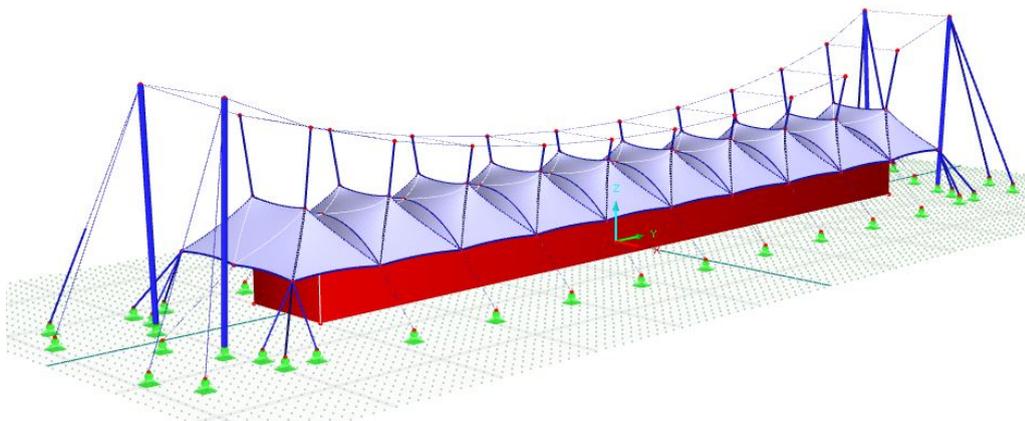


Figura I.1.7: Esquema estructural Sistema S_2 aplicado al caso de estudio. Elaboración: Propia.

01.8.1.3. Sistema S_3 : Composición de módulos en forma de tienda con soportes exteriores y superficies sencillas a dos aguas

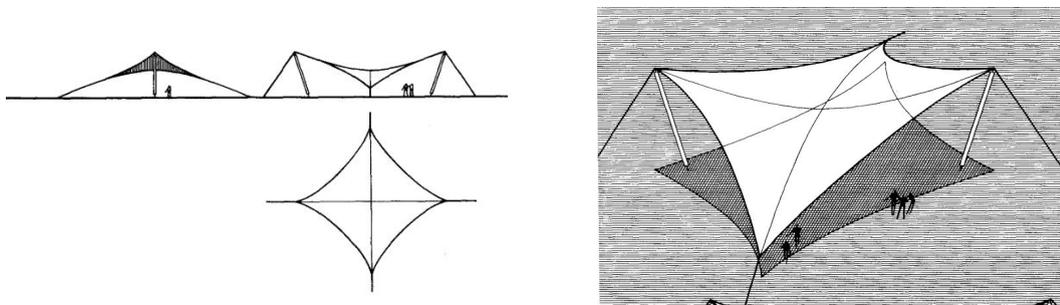


Figura I.1.8: Croquis módulo estructura Sistema S_3 . Fuente: [Engel, 2001].

Este sistema estructural parte de la estructura anticlástica simple formada por un paño de membrana de 4 lados apoyado en 2 puntos altos, situados en una de las diagonales del cuadrilátero, y 2 puntos bajos en la otra diagonal. Este módulo se replica siguiendo la dirección del lado mayor de la huella, entre dos módulos contiguos se tienen en común dos mástiles y uno de los bordes de la membrana.

Una solución similar a este sistema es la dispuesta en la cubierta de una pista de fútbol en Guatemala, mostrada en la Figura I.1.9.

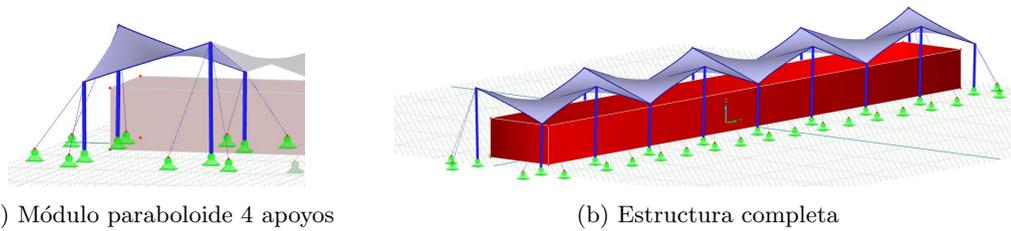


Figura I.1.9: Cubierta recinto fútbol, Guatemala. Fuente: [TensiNet Association].

También se utiliza una solución parecida en la cubierta de un espacio en el Hotel Sheraton (Estambul, Turquía), mostrada en la Figura I.1.10. Aunque la forma de la membrana es similar a la planteada como solución, en este caso la estabilización de los mástiles se realiza con barras a compresión entre las cabezas de los mástiles además de con cables anclados al terreno.



Figura I.1.10: Cubierta espacio Hotel Sheraton, Estambul. Fuente: [TensiNet Association].



(a) Módulo parabolóide 4 apoyos

(b) Estructura completa

Figura I.1.11: Esquema estructural Sistema S_3 aplicado al caso de estudio. Elaboración: Propia.

01.8.1.4. Sistema S_4 : Sistemas en forma de tienda para cubrir construcciones macizas rectilíneas con arcos paralelos de puntos altos sobre planta rectangular

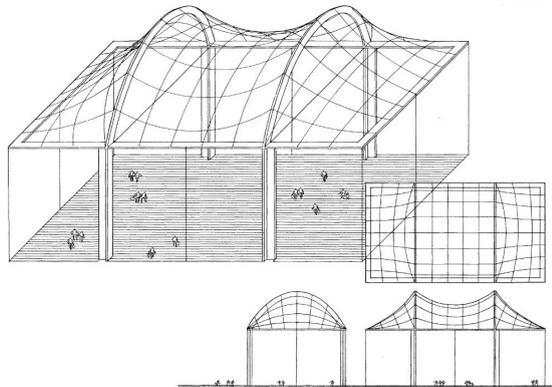


Figura I.1.12: Croquis estructura Sistema S_4 . Fuente: [Engel, 2001].

Se trata de un sistema estructural que difiere de los 3 anteriores debido a que los bordes de la membrana son rígidos. La forma de curvatura anticlástica, de silla de montar en este caso, se consigue con los apoyos en arco que forman apoyos altos lineales. La membrana está soportada por un estructura de pórticos perimetrales, los elementos horizontales de estos pórticos son también bordes de la membrana.

Como ejemplos de este sistema se pueden destacar la cubierta del parking de Buquebus (Montevideo, Uruguay), que se muestra en la Figura I.1.13, y la cubierta de una pista de tenis (Gorle, Italia), mostrada en la Figura I.1.14.



Figura I.1.13: Cubierta estación autobuses, Montevideo. Fuente: [TensiNet Association].



Figura I.1.14: Cubierta pista tenis, Gorle. Fuente: [TensiNet Association].

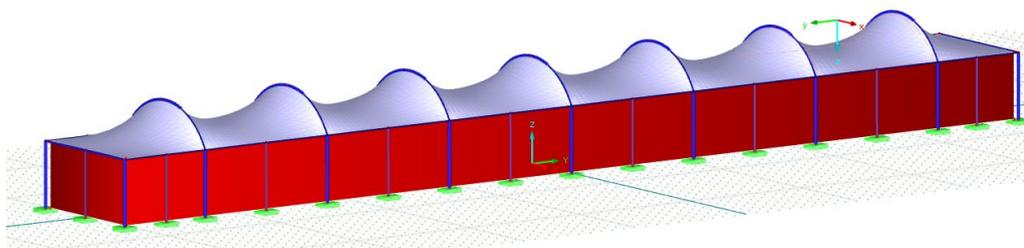


Figura I.1.15: Esquema estructural Sistema S_4 aplicado al caso de estudio. Elaboración: Propia.

01.8.2. Determinación de los criterios

Con el fin de evaluar cual de los 4 sistemas estructurales considerados sería más adecuado disponer, se definen 4 criterios con los que evaluar cada una de estos sistemas, que se detallan a continuación.

La escala utilizada para asignar las puntuaciones define 5 niveles correspondientes al grado de adecuación que se aprecia en cada sistema respecto al criterio evaluado. Esta escala se muestra en la Tabla I.1.13

Apreciación	Puntuación
Muy adecuado	10
Bastante adecuado	8
Adecuado	6
Poco adecuado	4
Nada adecuado	2

Tabla I.1.13: Escala valoración sistemas estructurales. Elaboración: Propia.

01.8.2.1. Criterio eficiencia

El primero de los criterios es similar al criterio C_2 utilizado en la elección de la tipología óptima. Se prioriza que el sistema estructural a disponer sea lo más ligero y emplee la

menor cantidad de material posible. También se valora que presente un bajo número de barras rígidas de acero y de elementos flectados.

El peso establecido para este criterio es $w_1 = 0,30$, las puntuaciones asignadas a cada sistema se muestran en la Tabla I.1.14.

Sistema	Puntuación
Sistema 1	8
Sistema 2	5
Sistema 3	8
Sistema 4	6

Tabla I.1.14: Puntuaciones criterio eficiencia. Elaboración: Propia.

Se penaliza en el Sistema S_2 la necesidad que se tendría de disponer mástiles de diámetro elevado y elevada altura en la estructura auxiliar de sustentación, también que la longitud total de los cables empleada sería mayor.

Se penaliza en el Sistema S_4 la presencia de un mayor número de barras rígidas de acero. Además las barras que forman los bordes rígidos de la membrana desarrollarían esfuerzos internos de flexión, que disminuyen la eficiencia de la estructura al hacer necesario disponer elementos estructurales de mayor sección transversal en comparación con los elementos que desarrollan únicamente esfuerzos normales.

A efectos de este criterio, los sistemas S_1 y S_3 se consideran idénticos pues la cantidad de material sería aproximadamente la misma, únicamente cambia la disposición de los puntos altos y bajos que se entiende que no supondría un cambio significativo en la cantidad de material utilizado, por ello se asigna la misma puntuación.

01.8.2.2. Criterio idoneidad

En este criterio se valora la capacidad de los sistemas estructurales de adaptarse a las dimensiones del caso. Se tienen en cuenta los si rangos de luces que se consideran apropiados para cada uno de los sistemas según [Engel, 2001], serían de fácil aplicación al caso en función de las disponibilidades en planta. Se considera también la facilidad que cada sistema tendría para acoplar los bordes del elemento textil al perímetro de la estructura existente, y que el espacio que se tendría entre los bordes de la membrana y el perímetro no sea elevado.

El peso establecido para este criterio es $w_2 = 0,23$, las puntuaciones asignadas a cada sistema se muestran en la Tabla I.1.15.

Se valora positivamente en el Sistema S_4 el hecho de que el perímetro de la membrana sea un borde rígido, lo que podría favorecer que se adaptara mejor al recinto existente.

Se valora negativamente en el Sistema S_2 que las luces que serían necesarias entre cada uno de los pares de mástiles de la estructura auxiliar tendrían un valor en torno a 85 m, lo que sería un valor en el límite del rango de luces recomendado para estos sistemas, que se limita a valores de 80 m.

Sistema	Puntuación
Sistema S_1	5
Sistema S_2	6
Sistema S_3	7
Sistema S_4	8

Tabla I.1.15: Puntuaciones criterio idoneidad al caso de estudio. Elaboración: Propia.

El Sistema S_3 se considera apto en cuanto a luces debido a que en la dirección del lado corto, la luz de aproximadamente 10 m que se requeriría es posible cubrir con el módulo simple que compone la estructura, que es una solución válida para luces cortas. En la dirección del lado largo los 85 m que se requerían no son una limitación pues se solucionan disponiendo tantos módulos simples como fueran necesarios hasta alcanzar la longitud necesaria. Este sistema se acoplaría mejor a la cota del perímetro de la estructura que el Sistema S_1 debido a que la altura de los postes altos que se requeriría sería menor, y con ello menor el espacio que se dejaría entre los bordes de la membrana y la estructura.

El Sistema S_1 se valora negativamente debido a que tanto si los cables de valles y crestas se alinearan con la dirección del lado corto, donde las luces serían de aproximadamente 10 m; como si se alinearan en la dirección del lado largo, donde las luces serían de aproximadamente 85 m. Serían valores fuera del rango que se considera adecuado para este sistema que es entre 30 y 70 m.

01.8.2.3. Criterio simplicidad constructiva

Con este criterio se tiene en cuenta la sencillez del proceso constructivo y las operaciones que serían necesarias para realizar la construcción. Como son las operaciones provisionales de sustentación de los mástiles o el desplazamiento de la membrana hasta su posición final.

También se tiene en consideración el valor estimado de la fuerza de tesado que sería necesario aplicar a los cables para conseguir la estabilidad de las estructuras.

El peso establecido para este criterio es $w_3 = 0,27$, las puntuaciones asignadas a cada sistema se muestran en la Tabla I.1.16.

Sistema	Puntuación
Sistema S_1	6
Sistema S_2	6
Sistema S_3	7
Sistema S_4	8

Tabla I.1.16: Puntuaciones criterio simplicidad proceso constructivo. Elaboración: Propia.

En el Sistema S_2 se penaliza el elevado valor de pretensado inicial que se estima que se debería disponer en los cables principales de la estructura auxiliar, ya que estos cables son casi horizontales y reciben todo el peso vertical de la membrana textil. También se

considera un aspecto negativo la complejidad de asegurar la estabilidad de los mástiles durante el proceso de construcción debido a su elevada altura.

El Sistema S_4 se considera bastante adecuado según este criterio debido a que no requiere de cables tensados para alcanzar la forma inicial. También porque construir la estructura de barras con menor número de apoyos auxiliares que en los otros sistemas.

Los sistemas S_1 y S_3 se consideran de similar complejidad en cuanto al proceso constructivo se refiere, pues requerirían trabajos similares de apoyos provisionales y sería también similar la complejidad de trasladar la membrana hasta su posición final. El Sistema S_1 recibe peor puntuación debido a que se presupone que los cables en este caso requerirían una fuerza de tesado más elevada que en el Sistema S_3 al fin de evitar la pérdida de tensión en los mismos. El Sistema S_3 presentaría la ventaja de estar compuesto de la estructura más sencilla y eficaz de doble curvatura anticlástica que se puede conseguir, que es el cuadrilátero apoyado en dos puntos altos opuestos entre sí, y dos puntos bajos también opuestos.

01.8.2.4. Criterio estético

Con este criterio se busca que el sistema adoptado destaque por su singularidad y sea visualmente llamativo.

El peso establecido para este criterio es $w_4 = 0,20$, las puntuaciones asignadas a cada sistema se muestran en la Tabla I.1.17. Los valores de las puntuaciones de los sistemas en este criterio responden únicamente a la apreciación subjetiva.

Sistema	Puntuación
Sistema S_1	6
Sistema S_2	8
Sistema S_3	7
Sistema S_4	5

Tabla I.1.17: Puntuaciones criterio estético. Elaboración: Propia.

01.8.3. Solución adoptada

En base a las puntuaciones asignadas a cada una de las alternativas según cada uno de los criterios, se obtiene la siguiente matriz de puntuaciones, en la que las filas corresponden con los sistemas, y las columnas con los criterios. Al multiplicar estas puntuaciones por el vector de pesos de cada uno de los criterios se obtiene el vector de las puntuaciones finales de cada sistema estructural:

$$\begin{bmatrix} 8 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 7 & 6 & 8 \\ 8 & 6 & 7 & 7 \\ 6 & 8 & 8 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,30 \\ 0,23 \\ 0,27 \\ 0,20 \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} 6,37 \\ 6,10 \\ 7,30 \\ 6,80 \end{Bmatrix}$$

Finalmente, se escoge el Sistema S_3 al ser el sistema que mejor responde en general a los criterios evaluados.

En el ANEJO 03. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN se definen las dimensiones de la estructura y los detalles constructivos, y en el ANEJO 04. ANÁLISIS ESTRUCTURAL se recoge el análisis seguido para la verificación de la estructura.

ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO

02.1. Objeto del anejo	2
02.2. Normativa	2
02.3. Acciones	3
02.3.1. G_1 Peso propio	3
02.3.2. P Pretensado	3
02.3.3. Q_1 Viento	4
02.3.4. Q_2 Nieve	4
02.3.5. Q_3 Sobrecarga de mantenimiento	4
02.3.6. Q_{el} Carga equivalente	5
02.3.7. A_1 Sismo	5
02.4. Coeficientes parciales de seguridad	6
02.4.1. Coeficientes parciales para los materiales	7
02.4.2. Coeficientes parciales de las acciones	8
02.5. Combinaciones de acciones consideradas	8
02.5.1. Combinaciones para la verificación de elementos hormigón armado y acero	9
02.5.2. Combinaciones para la verificación de membrana textil	10
02.6. Simulación acción del viento	11
02.6.1. Metodología	11
02.6.2. Direcciones de incidencia	12
02.6.3. Resultados	13
02.7. Características de los materiales	15
02.7.1. Hormigón	15
02.7.2. Acero para armado	16
02.7.3. Acero estructural	16
02.7.4. Acero para cables	17
02.7.5. Membrana PES/PVC	19
02.8. Características del terreno	24
APÉNDICE 01 ESTUDIO GEOTÉCNICO	25

02.1. Objeto del anejo

El objeto del presente anejo es definir las acciones externas que se tienen en cuenta en el diseño de la estructura, sus valores característicos y las combinaciones de estas que deben realizarse. También se establecen los aspectos que deben considerarse en el cálculo y verificación de la estructura, y se detallan las propiedades de los materiales utilizados.

02.2. Normativa

La normativa seguida para la definición de las acciones externas sobre la estructura y la obtención de los valores característicos; así como para la definición de las combinaciones necesarias para la verificación y dimensionamiento de los diferentes elementos estructurales es la siguiente:

- **Código Técnico de la Edificación (CTE)** Documento básico Seguridad estructural-Acciones en la edificación (DB-SE-AE) [Ministerio de Vivienda, 2009]
- **Código Estructural** [Ministerio de la Presidencia, 2021]
- **Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras.** UNE-EN 1990:2019 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2019]
- **Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón.** Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1992-1-1:2013 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013a]
- **Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero.**
Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1993-1-1:2013 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013b]
Parte 1-8: Uniones. UNE-EN 1993 1-8:2013 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013c]
Parte 1-11: Cables y tirantes. UNE-EN 1993 1-11:2015 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2015]
Parte 3-1: Torres, mástiles y chimeneas. Torres y chimeneas. UNE-EN 1993 3-1:2013 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013d]
- **Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico.** Parte 1: Reglas generales. UNE-EN 1997-1 [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016a]
- **Norma de Construcción Sismorresistente:** Parte general y edificación (NCSE-02). [Ministerio de Fomento, 2002]
- **Norma UNE-EN 13782: Estructuras temporales-Carpas-Seguridad** [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016b]

Para los aspectos no tratados en estas normas, se siguen las recomendaciones recogidas en la Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas [Forster and Mollaert, 2004].

02.3. Acciones

Las acciones consideradas en el cálculo son las especificadas en el CTE DB-SE-AE. En este Código se distinguen 3 tipos de acciones: permanentes (G_j y P), variables (Q_i) y accidentales (A).

02.3.1. G_1 Peso propio

Los valores característicos considerados de peso propio de los materiales empleados en la estructura, se recogen en la Tabla I.2.1. Para el acero estructural y el hormigón armado se toman los valores recomendados por el Anejo C del CTE DB-SE-AE. Para el acero de los cables se toma el valor del peso propio que indica el fabricante Redaelli, al ser mayor que el indicado en el CTE y considerarse más próximo al valor real. Para el material utilizado en la membrana textil (PES/PVC), en ausencia de valores recomendados para estos materiales en el CTE se toma el valor proporcionado por el fabricante Serge Ferrari.

Material	Peso propio
Acero estructural S275JOH	77 kN/m ³
Acero cables Grado 1670 N/mm ²	78 kN/m ³
Acero cables Grado 1770 N/mm ²	78 kN/m ³
Hormigón HA-25/B/20/XC2	24,5 kN/m ³
Poliéster (PES)/Policloruro de vinilo (PVC)	1,324 daN/m ²

Tabla I.2.1: Valores característicos peso propio. Fuentes: Catálogos de elementos estructurales.

02.3.2. P Pretensado

El pretensado es parte inherente del comportamiento estructural e imprescindible para definir la forma de la estructura, es una acción de tipo permanente. Los valores de pretensado se establecen en primer lugar como condiciones de contorno del proceso de “búsqueda de forma”, y se validan al analizar la estabilidad de la estructura bajo los diversos estados de carga. Tras haber realizado las verificaciones correspondientes de la estructura, los valores de fuerzas de tesado en los cables tomados como válidos se encuentran en un intervalo entre 51 y 406 kN. Sobre la membrana se considera un estado tensional inicial de 6,20 kN/m en la dirección de la trama y de 6,20 kN/m en la dirección de la urdimbre.

Esta acción y el proceso seguido para su determinación, se detallan en el apartado 04.2.2 del ANEJO 04. ANÁLISIS ESTRUCTURAL. Debe asegurarse que a largo plazo, a pesar de la fluencia y de los asentamientos en las cimentaciones, el valor de pretensado que se mantendría sería suficiente. Se detalla en el apartado 04.3.1 del ANEJO 04. ANÁLISIS ESTRUCTURAL los valores de pretensado iniciales en cada uno de los contravientos y relingas que forman la estructura.

02.3.3. Q_1 Viento

Debido a la forma e inclinación de la cubierta, no es sencillo determinar la presión estática equivalente del viento a aplicar según las indicaciones establecidas en el DB-SE-AE. De este código se extraen únicamente los parámetros de velocidad básica del viento (26 m/s), presión dinámica del viento ($q_b = 0,42 \text{ kN/m}^2$), correspondientes a estructuras ubicadas en la Zona A del mapa. Se define también el grado de aspereza del entorno como “IV: Zona urbana en general, industrial o forestal”.

A partir de estos parámetros, los coeficientes de presión c_p y la presión estática del viento q_e se determinan mediante una simulación CFD que se detalla en la sección 02.6 del presente Anejo.

02.3.4. Q_2 Nieve

Para representar la acción de una acumulación de nieve sobre la estructura se tiene en cuenta el valor de la sobrecarga recomendado en el DB-SE-AE para Valencia, y un coeficiente de forma igual a 1 al ser una cubierta con inclinación menor a 30° en la que no hay impedimento al deslizamiento de nieve. El valor característico considerado en los cálculos estructurales es de $0,20 \text{ kN/m}^2$ aplicados sobre cada unidad de superficie horizontal. Se asume que la acumulación de nieve es uniforme sobre la totalidad de la superficie de la cubierta.

La acumulación de nieve además de los efectos esperables que ocasiona como acción gravitatoria en forma de sollicitaciones de los elementos estructurales, se debe procurar que no llegue a provocar zonas de embolsamiento, que producirían grandes deformaciones de la membrana.

La Norma UNE-EN 13782 permite la omisión de esta acción en los casos: en que la estructura se ubique en áreas en que no exista probabilidad de nieve; la estructura sea temporal y se use en épocas del año que no sea probable la nieve; donde se impida la acumulación de nieve por cálculo o condiciones de funcionamiento; o donde la acción del funcionamiento de la estructura impida la acumulación de nieve, lo cual se puede obtener con la instalación de un equipo de calentamiento que se inicie antes de la nevada y consiga calentar la superficie exterior de la cubierta hasta una temperatura de al menos 2°C .

No se omite la acción, a pesar de que el litoral de la Comunidad Valenciana es una zona en la que no son habituales las nevadas, ya que no se prevé la instalación de sistemas de calentamiento.

02.3.5. Q_3 Sobrecarga de mantenimiento

La estructura se considera una cubierta no accesible, por lo que se asume que no puede gravitar sobre ella ninguna sobrecarga de uso superficial en las combinaciones utilizadas para las verificaciones. Se tiene en cuenta la aplicación de una carga vertical puntual de $Q_3 = 1,50 \text{ kN}$ indicada en la Norma UNE-EN 13782.

02.3.6. Q_{el} Carga equivalente

Se trata de una carga recogida en la Norma UNE-EN 13782 para comprobar la estabilidad, de tipo vertical distribuida uniformemente sobre la cubierta y valor $q_{el} = 0,1 \text{ kN/m}^2$. Se combina únicamente con el peso propio. Se utilizaría para tener en cuenta los efectos de posibles excentricidades de la carga permanente.

02.3.7. A_1 Sismo

Atendiendo a lo expuesto en la Norma de Construcción Sismorresistente, se considera que la estructura que se trata de proyectar como de importancia normal, por lo que es de aplicación esta norma.

Aunque sea una estructura que no sea un servicio primario o la probabilidad de causar víctimas no sea muy alta, al ser de uso deportivo no se conoce con exactitud la intensidad de uso y se opta de forma conservadora por realizar esta consideración en lugar de considerar una estructura de importancia moderada.

Aun así, no es esperable que el sismo sea una acción relevante en el proyecto de la estructura debido a la baja masa y elevada flexibilidad de las membranas.

02.3.7.1. Representación de la acción sísmica

La acción sísmica se caracteriza con el espectro de respuesta elástica horizontal, calculado según lo dispuesto en la NCSE-02. Para la obtención de este espectro, en primer lugar se obtienen del mapa de peligrosidad sísmica los parámetros de aceleración sísmica básica a_b y de coeficiente de contribución K propios de Real de Gandía. Estos son: $a_b = 0,07g$ y $K = 1,0$.

Posteriormente se obtiene la aceleración sísmica de cálculo a_c definida como $a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$, donde el coeficiente adimensional del riesgo ρ se toma igual a 1,0 al ser una construcción de importancia normal; y el coeficiente de amplificación del terreno S se toma como $S = C/1,25 = 1,6/1,25 = 1,28$, donde se toma un valor del coeficiente del terreno C de 1,6, correspondiente a un terreno del tipo III, que es el tipo en el que el estudio geotécnico consultado clasifica el terreno del emplazamiento, como se detalla en la sección 02.8. Se considera un coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 1$ al tratarse de una estructura desprovista de capacidad de disipación de energía en el rango plástico.

Por tanto se obtiene una aceleración sísmica de cálculo de:

$$a_c = 1,28 \cdot 1,0 \cdot 0,07g = 0,0896$$

Con esto se determina el espectro normalizado de respuesta elástica horizontal α en función del periodo propio del oscilador T , que se define de la forma:

$$\begin{aligned} \text{Si } T < T_A & \quad \alpha(T) = 1 + 1,5 \cdot T/T_A \\ \text{Si } T_A \leq T \leq T_B & \quad \alpha(T) = 2,5 \\ \text{Si } T > T_B & \quad \alpha(T) = K \cdot C/T \end{aligned} \tag{2.1}$$

Los periodos característicos del espectro se consideran: $T_A = K \cdot C/10 = 0,16$ s, y $T_B = K \cdot C/2,5 = 0,64$ s. Con lo que finalmente se obtiene el espectro representado en la Figura I.2.1.

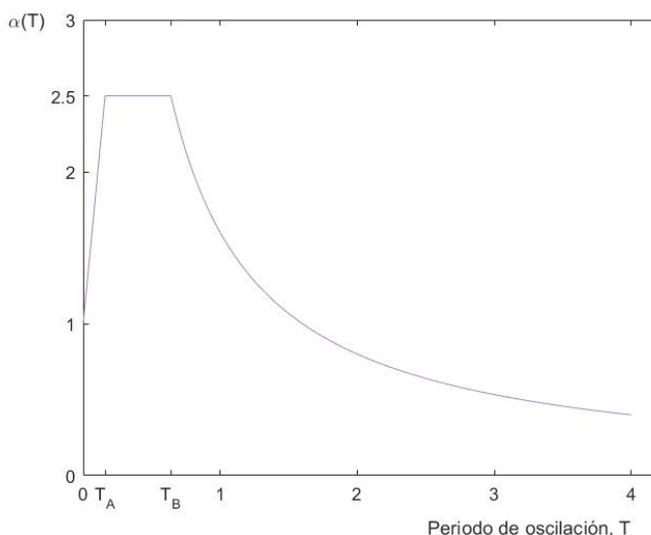


Figura I.2.1: Espectro normalizado de respuesta elástica. Elaboración: Propia.

Por último, multiplicando el espectro normalizado por la aceleración sísmica de cálculo, se obtiene el espectro de respuesta elástica, mostrado en la Figura I.2.2.

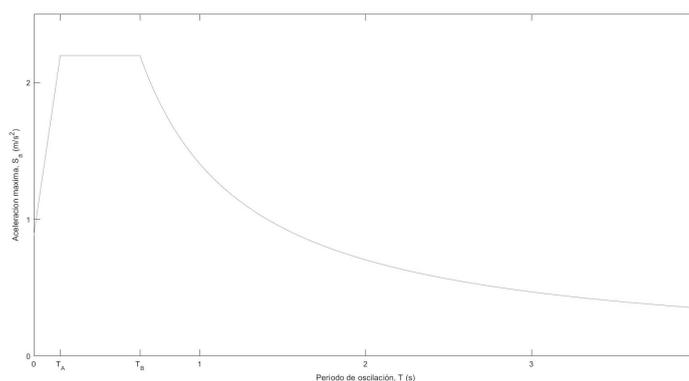


Figura I.2.2: Espectro de respuesta elástica. Elaboración: Propia.

02.4. Coeficientes parciales de seguridad

Se tienen en consideración tanto coeficientes parciales de seguridad que mayoran los valores característicos de las acciones, como coeficientes parciales de seguridad que minoran los valores de resistencias de los materiales.

02.4.1. Coeficientes parciales para los materiales

En cuanto a los coeficientes aplicados a los materiales, se atiende en primer lugar a los valores dispuestos en el Eurocódigo 2 y el Eurocódigo 3. De estas normas se extraen los coeficientes de los siguientes materiales:

- Coeficiente del hormigón en comprobaciones de Estado Límite Último: $\gamma_c = 1,50$.
- Coeficiente del acero para armadura pasiva en comprobaciones de Estado Límite Último: $\gamma_s = 1,15$.
- Coeficientes para el acero laminado: $\gamma_{M0} = 1,05$ para comprobaciones de plastificación, $\gamma_{M1} = 1,05$ para comprobaciones de inestabilidad, y $\gamma_{M2} = 1,25$ para la resistencia última y comprobaciones de uniones.
- Coeficiente para el acero en cables: $\gamma_R = 1,10$ para comprobaciones de rotura y situaciones transitorias durante la fase de montaje, y $\gamma_M = 2$ para la limitación de tensiones en condiciones de servicio.

Se incluyen también los coeficientes aplicados a los parámetros geotécnicos, según con lo dispuesto en el Eurocódigo , son los siguientes:

- Coeficiente del ángulo de rozamiento en efectivas aplicable a $\tan \phi'$: $\gamma_{\phi'} = 1,25$
- Coeficiente de la cohesión efectiva: $\gamma_{c'}$ = 1,25
- Coeficiente para la resistencia a corte sin drenaje: $\gamma_{cu} = 1,40$
- Coeficiente para la resistencia a compresión simple: $\gamma_{qu} = 1,40$
- Coeficiente para el peso específico: $\gamma_\gamma = 1,0$

Para los materiales utilizados en las membranas textiles, como es el caso del PES/PVC, no se tienen por el momento valores de coeficientes de seguridad definidos en los Eurocódigos. En la Norma UNE-EN 13782 se recomienda un coeficiente parcial de seguridad de 2.5 para los tejidos PES/PVC. Este es el único material para el cual se define un valor del coeficiente de seguridad en esta Norma, para el resto de materiales textiles no se especifica el valor de estos coeficientes y se indica que deben ser obtenidos tras realizar los ensayos oportunos. En la Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas se recomienda disponer coeficientes globales de seguridad para verificar las tensiones en la membrana de valores entre 5 y 7 para el PES/PVC. Se expone en esta Guía que se dispongan coeficientes de seguridad elevados debido a que la resistencia de la membrana depende de múltiples factores, como la edad, la degradación en la manipulación, el plegado, la fatiga, la fluencia o la temperatura.

Se opta por considerar las recomendaciones de ambos textos: en el caso de la Norma UNE se toma el coeficiente parcial de seguridad 2,5 y se verifica la rotura con una combinación de acciones que tiene en cuenta coeficientes parciales de seguridad en las cargas; en el caso de la Guía se toma el coeficiente global de seguridad de 6 y se verifica la rotura con una combinación de acciones que no tiene en cuenta la aplicación de coeficientes parciales de seguridad en las cargas.

02.4.2. Coeficientes parciales de las acciones

De igual manera que sucede con los materiales, los coeficientes parciales para las acciones a considerar no se encuentran unificados en una única normativa. Los Eurocódigos y la Norma UNE-EN 13782 definen unos coeficientes parciales prácticamente idénticos, mientras que en cambio en la Guía se desaconseja el uso de coeficientes parciales para las acciones y la consideración únicamente de los valores característicos, pero con un coeficiente global de seguridad mucho mayor.

Los coeficientes parciales de seguridad considerados siguiendo las recomendaciones del Eurocódigo de Bases de cálculo y la Norma UNE-EN 13782 son los recogidos en la Tabla I.2.2.

Acción	EC EQU	EC STR	UNE-EN 13782
Permanentes desfavorables	$\gamma_{G,j,sup} = 1,10$	$\gamma_{G,j,sup} = 1,35$	$\gamma_G = 1,35$
Permanentes favorables	$\gamma_{G,j,inf} = 0,90$	$\gamma_{G,j,inf} = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
Variable dominante	$\gamma_{Q,1} = 1,50$	$\gamma_{Q,1} = 1,50$	$\gamma_{Q,1} = 1,50$
Variable asociada	$\gamma_{Q,i} = 1,50$	$\gamma_{Q,i} = 1,50$	$\gamma_{Q,i} = 1,35$

Tabla I.2.2: Coeficientes parciales de seguridad de acciones. Fuentes: [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2019] [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016b].

Los valores de la columna “EC EQU” corresponden con los coeficientes utilizados en las combinaciones realizadas para la verificación del equilibrio estático de la estructura.

Los valores de la columna “EC STR” corresponden con los coeficientes utilizados en las combinaciones realizadas para la verificación de la resistencia de los elementos estructurales y las verificaciones geotécnicas.

Los valores de la columna “UNE-EN 13782” se recomiendan para las verificaciones de estabilidad, equilibrio y de capacidad de los textiles técnicos. Los coeficientes de Variable dominante se utilizan para las combinaciones que consideran una única acción variable; los coeficientes de Variable asociada se utilizan cuando se combinan dos o más acciones variables, y se aplica a todas las acciones. Esta norma no incluye el uso de coeficientes de combinación. Fija para las comprobaciones en cimentaciones de vuelco, deslizamiento y levantamiento, los coeficientes: $\gamma = 1,0$ para peso propio en caso favorable, $\gamma = 1,1$ para peso propio en caso desfavorable, $\gamma = 1,2$ para viento en caso desfavorable y $\gamma = 1,3$ para otras cargas variables en el caso desfavorable. Para estas comprobaciones geotécnicas se utilizan los coeficientes del Eurocódigo.

02.5. Combinaciones de acciones consideradas

Las combinaciones de acciones consideradas también difieren en función del elemento que se desea verificar y del tipo de verificación.

Se tienen por un lado un tipo de combinaciones aplicables a las comprobaciones de los

elementos estructurales de hormigón armado, acero laminado, cables y las comprobaciones geotécnicas. Por otro lado se tienen las combinaciones aplicables a las comprobaciones de la membrana textil.

02.5.1. Combinaciones para la verificación de elementos hormigón armado y acero

Las combinaciones de acciones consideradas para las verificaciones de los elementos de hormigón armado, acero laminado, cables y cimentaciones son las indicadas en el Eurocódigo de Bases de cálculo:

La ecuación 2.2 corresponde con la combinación de Estado Límite Último, utilizada en las verificaciones a rotura de los elementos estructurales.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.2)$$

Como se detalla en la sección 02.6.2, se definen 5 posibles sentidos de incidencia del viento, con lo que se tienen un total de 17 combinaciones de ELU. La combinación ELU1 considera únicamente el peso propio y el pretensado, la combinación ELU2 considera además la nieve como única acción variable, las combinaciones ELU3 a ELU7 consideran el viento como única acción variable y una combinación por sentido, las combinaciones ELU8 a ELU12 consideran la nieve como acción dominante en combinación con el viento como acción asociada, y las combinaciones ELU13 a ELU17 consideran el viento como acción dominante y la nieve como acción asociada.

Las siguientes 3 ecuaciones corresponden con las combinaciones de Estado Límite de Servicio. La ecuación 2.3 corresponde con la combinación característica o poco probable, la ecuación 2.4 corresponde con la combinación frecuente, y la ecuación 2.5 corresponde con la combinación casi-permanente.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.3)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (2.4)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (2.5)$$

Los factores de combinación considerados para las acciones de nieve y viento son los recogidos en la Tabla I.2.3.

Acción	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Carga nieve a alturas ≤ 1.000 msnm	0,50	0,20	0
Cargas de viento en edificios	0,60	0,50	0

Tabla I.2.3: Factores de combinación considerados. Fuente: [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2019].

Se tiene también un total de 17 combinaciones ELS. 10 combinaciones características, ELS-Car1 a ELS-Car5 que consideran la nieve como acción dominante en combinación con el viento y ELS-Car6 a ELS-Car10 que consideran el viento como acción dominante en combinación con la nieve; 7 combinaciones frecuentes, ELS-Fre1 que considera la nieve como única acción variable (debido a que $\psi_{2,V} = 0$) y ELS-Fre2 a ELS-Fre6 que consideran el viento como única acción variable (debido a que $\psi_{2,S} = 0$); y 1 combinación casi permanente, ELS-QP que considera únicamente el peso propio y pretensado (debido a que $\psi_{2,V} = 0$ y $\psi_{2,S} = 0$).

Por último se tiene la combinación de acciones para la situación de sísmica, que es la expresada en la ecuación 2.6.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (2.6)$$

02.5.2. Combinaciones para la verificación de membrana textil

Para la verificación de la membrana, como se menciona en el apartado 02.4.1, se realiza una comparación de las recomendaciones presentes tanto en la Norma UNE como en la Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas. La diferencia entre ambas es que el enfoque de la primera sí tiene en cuenta coeficientes parciales para las acciones y los coeficientes de seguridad globales resultantes son menores, mientras que en la Guía se recomienda un enfoque diferente de utilizar los valores característicos de las acciones con un coeficiente global de seguridad más elevados.

En la Guía Europea no se recomienda el enfoque de estados límite con coeficientes de seguridad parciales aplicables a las condiciones de carga y las resistencias de los materiales para las verificaciones de la membrana. Debido a que las tensoestructuras presentan una fuerte no linealidad geométrica: pues la geometría de la estructura depende no solamente de la magnitud de la carga, también de la distribución de la carga. Se aconseja tomar los valores característicos de las acciones como valores de cálculo y comprobar los componentes en base a la tensión admisible.

Las posibles combinaciones de acciones contempladas en la Norma UNE-EN 13782 se muestran en la ecuación 2.7. Contempla la acción de cada una de las acciones variables de forma aislada, la acción de todas de forma simultánea para las verificaciones de resistencia de los materiales, de estabilidad y de equilibrio; y la acción de únicamente la carga equivalente para la verificación de la estabilidad con $\gamma_{Q,el} = 1,35$.

$$E_d = \text{máx.} \left\{ \begin{array}{l} \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \\ \gamma_G G_k + \sum \gamma_{Q,i} Q_{k,i} \\ \gamma_G G_k + \gamma_{Q,el} Q_{k,el} \end{array} \right\} \quad (2.7)$$

Se tienen un total de 13 combinaciones según las indicaciones de esta norma. La combinación EN1 incluye únicamente las cargas permanentes, coincide con la ELU1; la combinación EN2 considera la nieve como única acción variable, coincide con la ELU2; las combinaciones EN3 a EN7 consideran únicamente las 5 posibles direcciones de incidencia del viento como acción variable, coinciden con las combinaciones ELU3 a ELU7, las combinaciones

EN8 a EN12 consideran la nieve y el viento como acciones variables, sin distinción entre acción dominante y acción asociada; por último la combinación EN13 es la que considera la acción de la carga equivalente para la verificación de la estabilidad.

Las combinaciones recogidas en la Guía Europea tienen en cuenta: la presencia de las cargas permanentes (peso propio y pretensado), que se combinen por separado cada una de las acciones variables con las permanentes, y la presencia simultánea de varias acciones variables. En el caso de incluir múltiples acciones variables, señala una posible reducción de los valores de una de las cargas variables, sin determinar la magnitud de la reducción. Para esta reducción se opta por considerar los coeficientes de combinación ψ_0 de la combinación característica. Las posibles combinaciones que se tienen según la Guía son las mostradas en la ecuación 2.8.

$$E_d = \left\{ \begin{array}{c} G_1 + P \\ G_1 + P + Q_1 \\ G_1 + P + Q_2 \\ G_1 + P + Q_1 + \psi_{0,2}Q_2 \\ G_1 + P + Q_2 + \psi_{0,1}Q_1 \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

Se tienen un total de 17 combinaciones según las indicaciones de esta guía. La combinación GE1 incluye únicamente las cargas permanentes, coincide con la ELS-QP; la combinación GE2 considera la nieve como única acción variable; las combinaciones GE3 a GE7 consideran únicamente las 5 posibles direcciones de incidencia del viento como acción variable, las combinaciones GE8 a GE12 consideran la nieve como acción variable dominante y el viento como acción variable asociada, coinciden con las combinaciones ELS-Car1 a ELS-Car5; y por último las combinaciones GE13 a GE17 que consideran el viento como acción dominante y la nieve como acción asociada, coinciden con las combinaciones ELS-Car6 a ELS-Car10.

Siguiendo la recomendación recogida en la Guía Europea, no se considera posible la superposición lineal de efectos de cada una de las cargas por separado en las combinaciones; tampoco en las combinaciones de la Norma UNE, ni en las del Eurocódigo. En los análisis realizados se suman primero todas las cargas y posteriormente se evalúan los efectos de la combinación, que es lo propio para cálculos no lineales como el que se aborda.

02.6. Simulación acción del viento

La determinación de las presiones que el viento produce sobre la estructura, en ausencia de indicaciones precisas en normativa para cubiertas de esta geometría, se realiza mediante un análisis computacional de flujo o Dinámica Computacional de Fluidos (CFD).

02.6.1. Metodología

El análisis se lleva a cabo con el software RWIND-SIMULATION [Dlupal, 2019], desarrollado por Dlupal y que permite la conexión con RFEM5, software utilizado para el análisis global de la estructura. El mismo modelo utilizado para discretizar las estructura (deta-

llado en la sección 04.2.1 del ANEJO 04. ANÁLISIS ESTRUCTURAL) se utiliza en el análisis CFD, y los resultados obtenidos en este análisis (distribución de la presión sobre la membrana y las barras debida a la acción del viento q_e) se importan como cargas en el software RFEM5.

Como datos de entrada en la simulación se introducen:

- Velocidad básica fundamental del viento $v_{b,0} = 26,0$ m/s, según lo dispuesto en el CTE.
- Categoría del terreno III según el Eurocódigo de Bases de Cálculo. Se atiende a lo expuesto en esta norma debido a que el programa no incluye la caracterización del CTE. Esta categoría corresponde con el grado de aspereza IV del terreno definido en el CTE.
- Direcciones del viento: se consideran 5 direcciones, se comenta más detalladamente este aspecto a continuación en la sección 02.6.2.

Con estos datos el software calcula el perfil de velocidades mostrado en la Figura I.2.3.

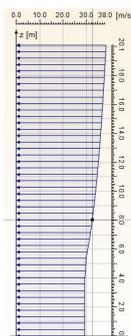


Figura I.2.3: Perfil de velocidades del viento considerado. Elaboración: Propia.

02.6.2. Direcciones de incidencia

En el CTE DB-SE-AE, se indica considerar al menos dos direcciones ortogonales cualesquiera y en ambos sentidos cada una de las direcciones.

Se tienen en cuenta en primer lugar las direcciones de incidencia normales a cada uno de los lados de la estructura. En la dirección normal al lado largo se considera la incidencia en ambos sentidos, 0° (incidiendo desde el N) y 180° (incidiendo desde el S); y en la dirección normal al lado corto se considera en un único sentido, 90° (incidiendo desde el E), al ser simétrica la estructura en esta dirección respecto del plano XZ que pasa por el centro geométrico. En el caso en que esta dirección fuera la más desfavorable en alguna barra o cable, se considera también la más desfavorable en la barra o cable ubicado en una posición simétrica a estos respecto del plano de simetría de la estructura.

Adicionalmente, se consideran otras dos direcciones que forman 45° con las dos primeras (45° incidiendo desde el NE, y 135° desde el SE), en un único sentido ya que los sentidos

desde el SW y NW, al ser simétrica la estructura, producen los mismos efectos. Se tienen en consideración también que si estas direcciones NE o SE son las más desfavorables en alguna de las barras o cables, también lo es en la barra o cable que ocupa la posición simétrica respecto al plano XZ .

Se muestra en la Tabla I.2.4 las combinaciones de acciones del Eurocódigo en las que se incluye cada uno de los sentidos de incidencia del viento.

Sentido	Estado Límite Último			Estado Límite Servicio		
	V	S+ ψ_0 V	V+ ψ_0 S	Fre	Car-S+ ψ_0 V	Car-V+ ψ_0 S
0°	ELU3	ELU8	ELU13	ELS-Fre2	ELS-Car1	ELS-Car6
45°	ELU4	ELU9	ELU14	ELS-Fre3	ELS-Car2	ELS-Car7
90°	ELU5	ELU10	ELU15	ELS-Fre4	ELS-Car3	ELS-Car8
135°	ELU6	ELU11	ELU16	ELS-Fre5	ELS-Car4	ELS-Car9
180°	ELU7	ELU12	ELU17	ELS-Fre6	ELS-Car5	ELS-Car10

Tabla I.2.4: Combinaciones de acciones EC según sentido de viento. Elaboración: Propia.

Se muestra en la Tabla I.2.5 las combinaciones de la Norma UNE-EN 13782 y de la Guía Europea según la dirección de incidencia del viento que consideran.

Sentido	UNE-EN 13782		Guía Europea		
	V	S+V	V	S+ ψ_0 V	V+ ψ_0 S
0°	EN3≡ELU3	EN8	GE3	GE8≡ELS-Car1	GE13≡ELS-Car6
45°	EN4≡ELU4	EN9	GE4	GE9≡ELS-Car2	GE14≡ELS-Car7
90°	EN5≡ELU5	EN10	GE5	GE10≡ELS-Car3	GE15≡ELS-Car8
135°	EN6≡ELU6	EN11	GE6	GE11≡ELS-Car4	GE16≡ELS-Car9
180°	EN7≡ELU7	EN12	GE7	GE12≡ELS-Car5	GE17≡ELS-Car10

Tabla I.2.5: Combinaciones de acciones UNE y GE según sentido de viento. Elaboración: Propia.

02.6.3. Resultados

Tras el análisis, el software produce diversos resultados que permiten conocer los efectos que el flujo del viento produce en la membrana. Se presta especial atención por su mayor relevancia en el diseño, a las distribuciones de presión sobre la membrana. En las Figuras I.2.4 a I.2.8 se muestran estas distribuciones según cada una de las direcciones de incidencia analizadas.

Estas presiones llevan dirección perpendicular a la membrana, es decir, la dirección del eje z del sistema local de cada uno de los elementos finitos en los que se discretiza la membrana. El sentido de estos ejes z en el centro del módulo, formando los otros dos un plano paralelo al suelo, lleva la dirección de la gravedad y sentido opuesto a esta. Por lo que los valores positivos de carga representan presiones sobre la membrana (tienden a hundir la membrana), y los valores negativos representan succiones (tienden a levantar la membrana).

La escala de colores de todas las figuras es la misma para facilitar la identificación de las diferencias en la magnitud de la carga según las distintas direcciones.

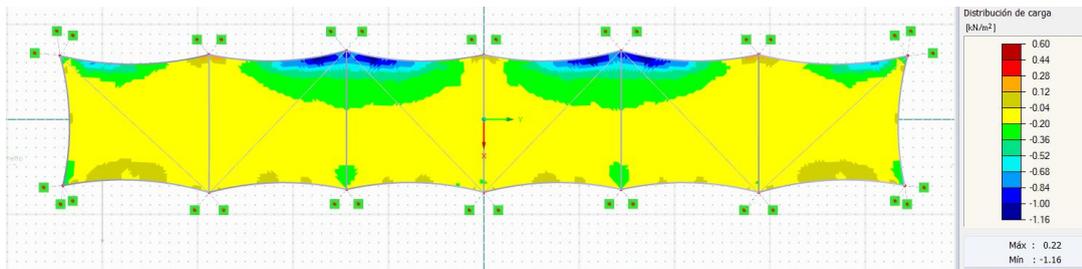


Figura I.2.4: Distribución de carga de viento sobre membrana para dirección 0°. Elaboración: Propia.

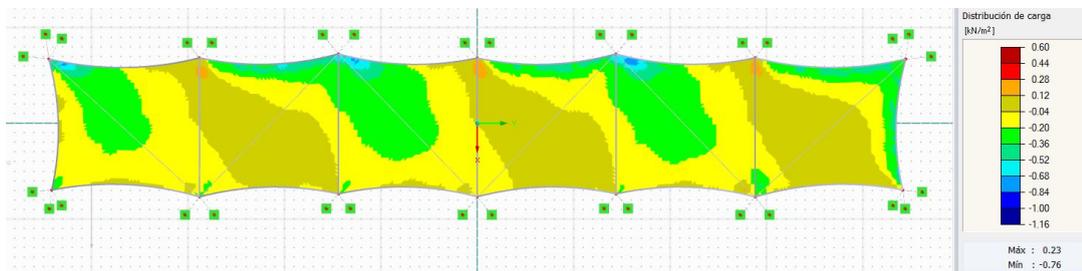


Figura I.2.5: Distribución de carga de viento sobre membrana para dirección 45°. Elaboración: Propia.

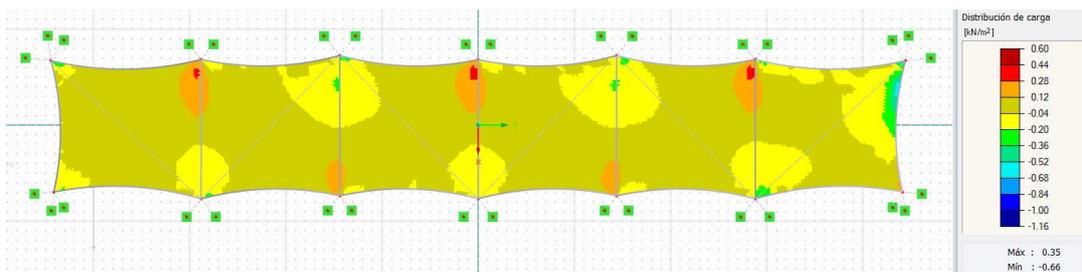


Figura I.2.6: Distribución de carga de viento sobre membrana para dirección 90°. Elaboración: Propia.

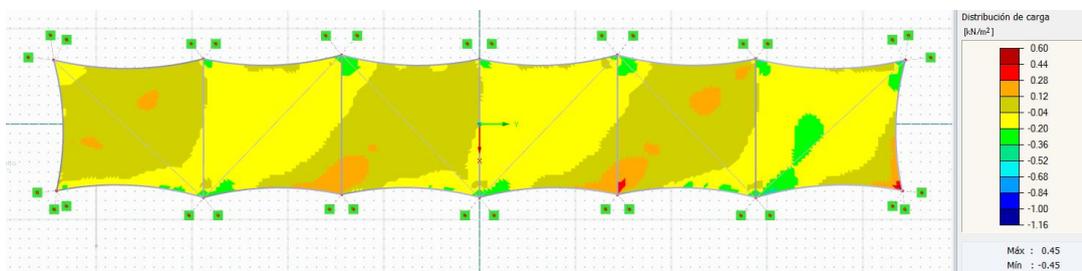


Figura I.2.7: Distribución de carga de viento sobre membrana para dirección 135°. Elaboración: Propia.

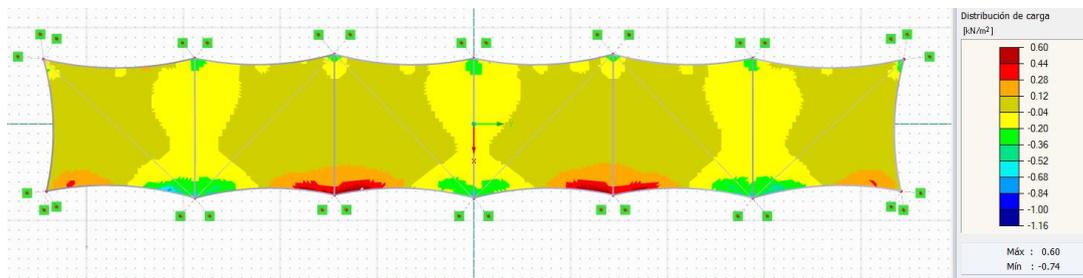


Figura I.2.8: Distribución de carga de viento sobre membrana para dirección 180°. Elaboración: Propia.

02.7. Características de los materiales

En el presente apartado se detallan las propiedades de los distintos materiales utilizados en la estructura.

02.7.1. Hormigón

Se utiliza hormigón del tipo HA-25/B/20/XC2 en las cimentaciones. Las características del material utilizadas en los cálculos son las siguientes:

- Resistencia característica f_{ck} : 25 MPa
- Consistencia: Blanda
- Tamaño máximo del árido: 20 mm
- Clase de exposición: XC2
- Peso propio γ_c : 25 kN/m³
- Diagrama de cálculo: Parábola-rectángulo
- Ecuación del diagrama:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{para } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (2.9)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{para } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

- Deformación de rotura a compresión simple ε_{c0} : 0,002
- Deformación última o de rotura a flexión ε_{cu} : 0,0035
- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 25 + 8 = 33$ MPa
- Módulo de deformación longitudinal secante E_c : $E_c = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} = 27.264$ MPa
- Coeficiente de Poisson ν : 0,2
- Coeficiente de dilatación térmica α : 10^{-5} [°C]⁻¹

02.7.2. Acero para armado

Se utiliza este material en el armado de los elementos de cimentación. Las características del material utilizadas en el cálculo son las siguientes:

- Tipo: B-500S
- Limite elástico f_{yk} : 500 MPa
- Módulo de elasticidad E : 200.000 MPa
- Diagrama de cálculo: se considera una ley trilineal con un tramo inicial A de pendiente E entre los umbrales $-f_{yd} < \sigma < f_{yd}$, y con la hipótesis de no superar la tensión máxima, comportamiento según el tramo B horizontal ($k = 1$). Se adopta una deformación máxima del acero igual a $\varepsilon_{uk} = 0,01$

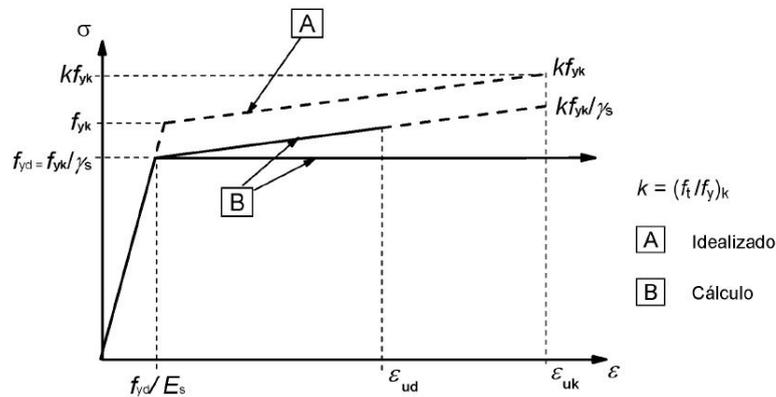


Figura I.2.9: Diagrama tensión-deformación acero armaduras pasivas. Fuente: [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013a].

02.7.3. Acero estructural

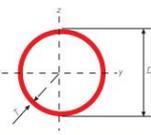
Se utiliza este material en los mástiles que sustentan la membrana, en forma de barras circulares huecas conformadas en caliente. Se tienen en cuenta las propiedades mecánicas y las dimensiones disponibles presentes en el catálogo del fabricante Condesa [Grupo Condesa].

En la Figura I.2.10 se muestra el catálogo publicado por el fabricante de las distintas combinaciones de diámetro y espesor disponibles. Según se recoge en el catálogo, las características del material del cual están fabricados estos tubos son las siguientes:

- Tipo: S275JOH
- Tensión límite elástico f_{yk} : 275 MPa
- Tensión de rotura f_u : 430 MPa

- Módulo de elasticidad E: 210.000 MPa
- Módulo de elasticidad transversal G: 81.000 MPa
- Deformación correspondiente al límite elástico ε_y : $\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} = 1,30952E - 3$
- Deformación última a tracción ε_u : $\varepsilon_u = 15 \cdot \varepsilon_y = 0,019643$
- Coeficiente de Poisson ν : 0,30
- Coeficiente de dilatación térmica α : $1,2 \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$

GAMA DE TUBO ACABADO EN CALIENTE. Medidas en milímetros



Gama perfil tubular en caliente - redondo

DIÁMETRO EXTERIOR ESPECÍFICO	ESPESOR T (mm)								
	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	14,2	16
D (mm)									
48,3									
51									
57									
60,3									
76,1									
82,5									
88,9									
101,6									
114,3									
121									
127									
133									
139,7									
159									
168,3									
177,8									
193,7									
219,1									
244,5									
273									
323,9									
355,6									
406,4									

Figura I.2.10: Catálogo tubos estructurales circulares conformados en caliente. Fuente: [Condesa](#).

02.7.4. Acero para cables

Se utiliza este material en los contravientos y relingas. En el primer caso se utiliza en forma de cables cerrados “Full Locked Coil strands” con alambres recubiertos de zinc-aluminio (Zn95Al5), en el segundo caso se utiliza en forma de cables en espiral abiertos “Open Spiral Strands”, recubiertos también de zinc-aluminio (Zn95Al5). Se tienen en cuenta las propiedades de estos cables proporcionadas por el fabricante Redaelli [[Redaelli Tecna S.P.A.](#)].

En la Figura I.2.11 se muestra el catálogo publicado por el fabricante de los distintos cables cerrados disponibles según su diámetro. El grado de este tipo de cable es 1.670 N/mm^2 . En la Figura I.2.12 se muestra el catálogo publicado por el fabricante de los distintos cables abiertos de espiral disponibles según su diámetro. El grado de este tipo de cable es 1.770 N/mm^2 .

De estos catálogos se tienen en consideración las correspondientes cargas de rotura F_{uk} , cargas de tracción de diseño F_{Rd} , secciones transversales metálicas A , rigidez elástica EA y masa del cable por unidad de longitud.

02.7. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Para el cálculo se considera adicionalmente un módulo de elasticidad $E=165.000$ MPa y un coeficiente de Poisson $\nu=0,30$.

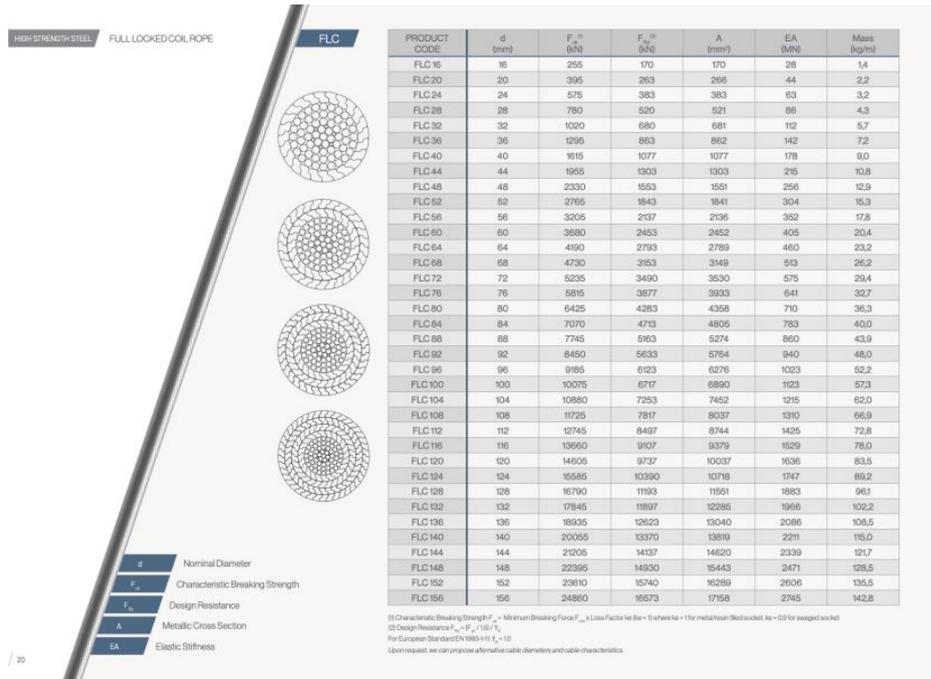


Figura I.2.11: Catálogo cables cerrados. Fuente: [FLC Redaelli](#).

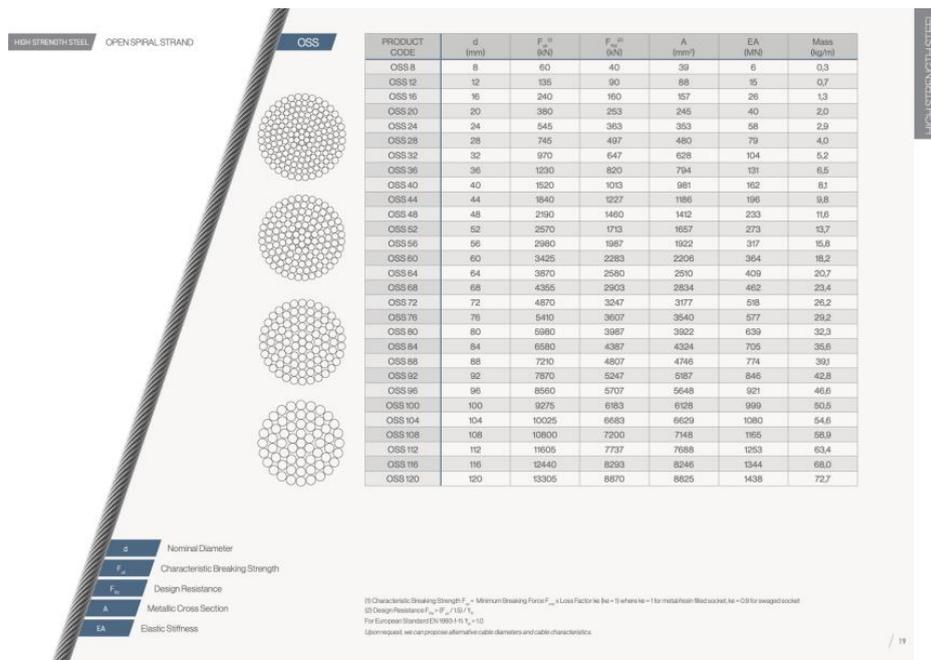


Figura I.2.12: Catálogo cables espiral. Fuente: [OSS Redaelli](#).

02.7.5. Membrana PES/PVC

Para la membrana textil se utiliza un tejido de poliéster (PES) recubierto con policloruro de vinilo (PVC). Se toman las características del producto Flexlight Advanced 1302 S2 producido por el fabricante Serge Ferrari, equivalente a una membrana de PES/PVC Tipo IV.

En la Figura I.2.13 se muestra la ficha del producto publicada por el fabricante.

	■ Características técnicas	Normas
Tratamiento de superficie (derecho/revés)	S2 PVDF / PVDF	
Hilo	Poliéster de alta tenacidad 1100/2200 Dtex Tratamiento anti-capilaridad Low-wick	
Peso	1350 g/m ²	EN ISO 2286-2
Ancho	267 cm	
■ Propiedades físicas		
Resistencia a la tracción (urdimbre/trama)	800 / 700 daN/5 cm	EN ISO 1421
Resistencia al desgarro (urdimbre/trama)	120 / 110 daN	DIN 53.363
Adherencia	13 daN/5 cm	EN ISO 2411
> Las características técnicas indicadas son valores medios, con una tolerancia de +/- 5%		
■ Reacción al fuego		
Euroclase	C-s2,d0	EN 13501-1
Clasificación	B1	DIN 4102-1
> Otros certificados de incendio disponibles bajo demanda		
■ Espesor y estabilidad dimensional		
Espesor total	1,02 mm	
Alargamiento 24 h -10 daN/5 cm (urdimbre/trama)	< 1.2% / < 1.2%	EN 15977
Alargamiento residual	< 0.5% / < 0.5%	EN 15977
■ Prestaciones térmicas y acústicas		
Coefficiente de transferencia de calor (vertical/horizontal)	U = 5.6 / 6.4 W / sqm / °C	Calculado
Índice de atenuación acústica	15 dBA	ISO 140-3 & ISO 717-1
■ Propiedades óptico-solares		
Transmisión de luz visible (Tv)	6%	NFP 38511
Reflexión de luz visible (Rv)	2.5%	EN 410
Transmisión Solar (Ts)	4%	EN 410
Reflexión Solar (Rs)	82%	
Factor Solar (g)	8.5%	
Transmisión UV	0%	
Índice de reflectancia solar (SRI)	90.3%	ASTME1980-01 (Approach II)

Figura I.2.13: Ficha membrana Flexlight Advanced 1302 S2. Fuente: [Serge Ferrari](#).

Las propiedades mecánicas del material utilizadas en el cálculo son las siguientes:

- Módulo elástico E_u urdimbre: 2.040 kN/m
- Módulo elástico E_t trama: 2.500 kN/m
- Coeficiente de Poisson urdimbre-trama ν_{ut} : 0,35
- Coeficiente de Poisson trama-urdimbre ν_{tu} : El software empleado no permite que el parámetro sea introducido por el usuario, lo toma automáticamente de la relación $E_u \nu_{tu} = E_t \nu_{ut}$ para asegurar la simetría de la matriz elástica.
- Resistencia última a tracción $f_{t,u}$ urdimbre: 160 kN/m
- Resistencia última a tracción $f_{t,t}$ trama: 140 kN/m

Los valores adoptados para el módulo elástico se justifican en un apartado posterior.

02.7.5.1. Consideración del comportamiento mecánico del material

El material empleado presenta un comportamiento notablemente no lineal, en primer lugar al ser un material que trabaja únicamente a tracción. Por otro lado, la relación tensión-deformación varía en función de factores como la temperatura; o la duración, valor e historia de las cargas. El comportamiento es además ortótropo, pues varían sus características entre las direcciones de urdimbre y trama.

Varían también las características a lo largo del tiempo: a lo largo de su vida útil el material sufre los efectos de la fluencia y la relajación que modifican notablemente el estado tensional, lo que supone también una modificación de la rigidez global de la estructura y la respuesta de ésta ante las cargas externas. [Seidel, 2009]

Para determinar el comportamiento del material, en la mayoría de textos y normativas consultados se indica que los tejidos deben ser sometidos a ensayos previamente a su uso. Complementariamente a estos ensayos, en el caso real el propio fabricante suministraría fichas de los productos en las cuales se detallaría el comportamiento del material de un modo más preciso, y el modo en el que debería realizarse el montaje y aplicarse la carga para alcanzar un comportamiento mecánico más estable. Debido a la falta de medios para caracterizar el material de este modo, se atiende para ello a lo recogido en resultados de ensayos publicados y se realiza una estimación del comportamiento mecánico.

Se observan en primer lugar los resultados mostrados en [Ambroziak, 2015] y [Ambroziak, 2020], en los cuales el autor trata de determinar las propiedades mecánicas de diferentes membranas de PES/PVC. En el primer artículo se analiza una membrana de Tipo III, y en el segundo una de Tipo IV. Se observa en ambos casos que el comportamiento es idéntico, variando únicamente los valores obtenidos, al ser la membrana de Tipo IV de mayor espesor, con lo que las características de esta son mejores.

Se presta atención a los resultados mostrados en este segundo artículo, al analizarse en él un material idéntico al empleado en este trabajo. En la Figura I.2.14 se muestra la relación esfuerzo-deformación que se produce en el material en un ensayo biaxial de carga hasta la rotura, para distintos ratios de tensiones en las direcciones de urdimbre y trama. Se pueden observar dos puntos de cambio de la respuesta del material, que diferencian tres tramos en la curva. Un primer tramo lineal hasta un punto en el que el material pierde rigidez, en el segundo tramo disminuye la pendiente, y en el tercer tramo se produce un endurecimiento hasta la rotura. La aplicación instantánea de la carga no permite que se puedan observar la fluencia o la relajación en el tejido.

En este primer tramo de la respuesta en el ensayo de carga hasta la rotura, se observan unos módulos elásticos longitudinales de 1.600 kN/m en la dirección de la urdimbre y de 1.950 kN/m en la dirección de la trama.

El comportamiento de relajación del material se puede observar en los resultados de [Meng and Wu, 2016], donde se estudia el comportamiento viscoelástico del material. Se estudia la magnitud de la pérdida de tensión de las superficies tras la aplicación del pretensado. En la Figura I.2.15 se puede observar cómo en un tejido PVC-coated disminuyen las tensiones internas rápidamente tras la aplicación de la tensión, este efecto es más significativo en la dirección de la trama (fill) que de la urdimbre (warp). En la dirección de la urdimbre se observa una pérdida de tensión en torno al 24 % en las primeras 4 horas, del 30 % al cabo de 1 día y del 33 % al cabo de los 4 días; del mismo modo en la dirección de la trama se

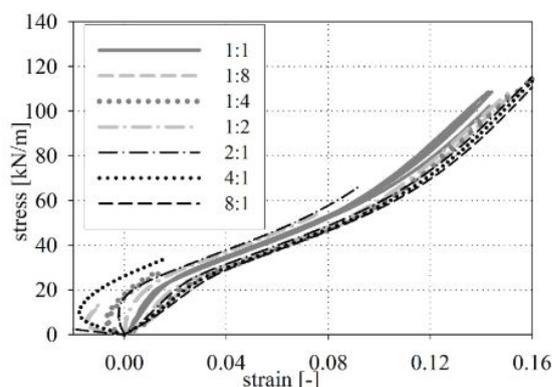


Figura I.2.14: Diagrama esfuerzo-deformación en las direcciones principales del material Precontraint 1302. Fuente: [Ambroziak, 2020].

observa una pérdida del 33 % en las primeras 4 horas, del 40 % al cabo de 1 día y del 45 % a los 4 días. Se concluye en el estudio que la principal caída de la tensión se produce en las 4 primeras horas tras la aplicación de la carga, y a partir de los 3 días apenas se produce pérdida de la tensión.

Se apunta en este estudio que en obra, los efectos de este comportamiento de relajación se anularían aplicando elevados niveles de pretensado inicial y con las compensaciones de la geometría de la membrana.

Se atiende de nuevo a los resultados de [Ambroziak, 2015] y [Ambroziak, 2020] para observar el comportamiento de los tejidos frente a situaciones cíclicas de carga-descarga. Se observa en la Figura I.2.16, cómo con varios ciclos de carga hasta los valores del final del segundo tramo de respuesta, se produce un cambio significativo en el comportamiento mecánico. Para el caso de los 20 ciclos se concluye que el módulo elástico a tiempo infinito se estabiliza y la respuesta del material es más próxima a un comportamiento lineal. Tampoco varía la deformación permanente que se produce entre cada ciclo.

Se cuantifica también en estos textos el endurecimiento que se produce a consecuencia de la aplicación cíclica de las cargas. Se establece que el módulo elástico longitudinal en el ciclo 20 de carga es en torno a un 30 % mayor que el observado en la primera carga.

En la Figura I.2.17 se observan los mismos resultados para ciclos en los que la carga es diferente entre ambas direcciones. Cuando la carga es 4 veces superior, la deformación permanente en la dirección de la carga es mucho mayor que cuando la razón es de 2; la dirección permanente en la otra dirección principal es menor, se “encoge”.

Por último se atiende a los resultados recogidos en [Hsieh and Tseng, 2008], donde se puede observar cómo la temperatura influye de manera importante en la relación constitutiva de tejido de PES/PVC. Con elevadas temperaturas el material pierde rigidez (mayores deformaciones para iguales valores de tensiones) y se ve reducido también su esfuerzo de rotura.

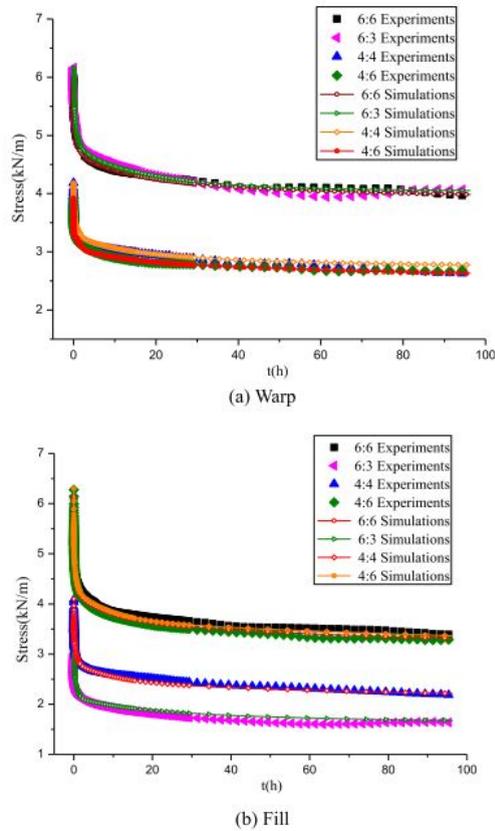


Figura I.2.15: Relajación de tejido PVC-coated en ensayo biaxial. Fuente: [Meng and Wu, 2016].

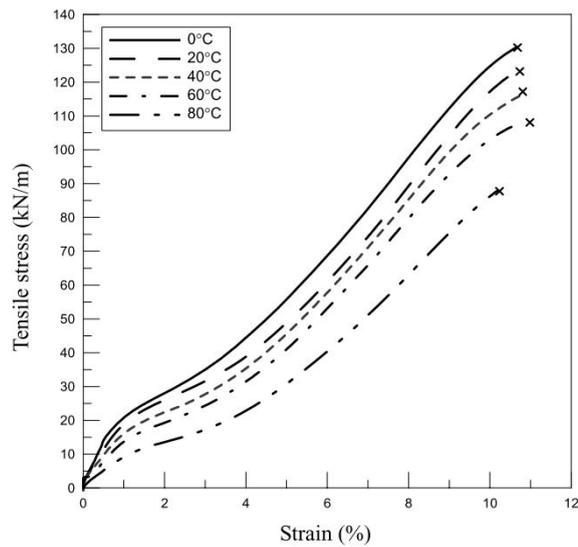


Figura I.2.18: Influencia de la temperatura en el comportamiento del material. Fuente: [Hsieh and Tseng, 2008].

Se asume la hipótesis de que las propiedades del material consideradas en el cálculo corresponden con un tejido que respecto al material destensado tras varios ciclos de pretensado-

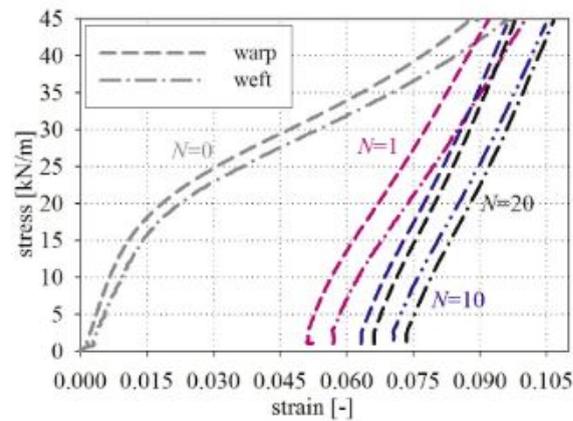


Figura I.2.16: Variación ramas tensión-deformación en cargas cíclicas con ratio 1:1 de tensiones. Fuente: [Ambroziak, 2015].

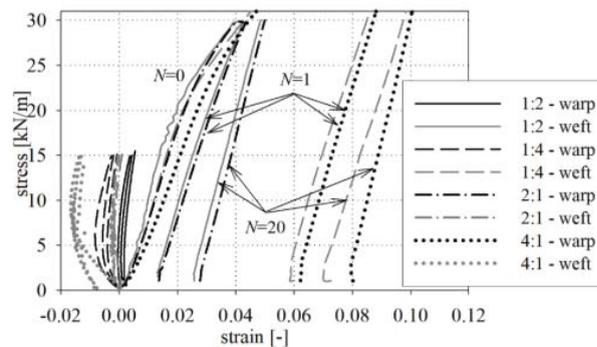


Figura I.2.17: Variación ramas tensión-deformación en cargas cíclicas con diferentes ratios de tensiones. Fuente: [Ambroziak, 2020].

descarga: ha perdido la fluencia, se ha rigidizado, se han producido las deformaciones permanentes, y se comporta de una forma más lineal al menos en el rango de esfuerzos que se estima que se alcanzan durante la vida útil de la estructura. La magnitud de estos ciclos de carga-descarga deberían ser indicados por el fabricante del tejido. Tras esto, se considera en el análisis estructural un módulo de elasticidad longitudinal de $E_u = 2.040 \text{ kN/m}$ en la dirección de la urdimbre, y $E_t = 2.400 \text{ kN/m}$ en la de la trama, que corresponden con los valores numéricos indicados en [Ambroziak, 2015].

02.8. Características del terreno

Para la caracterización geotécnica del terreno, se hace uso de los resultados obtenidos en el estudio geotécnico realizado en el proyecto de construcción “Pabellón deportivo en Av. de la Pau N°10” [G2G Consultores, 2018]. Dicho pabellón se localiza en la misma avenida que el recinto objeto de este trabajo. Los aspectos del estudio relevantes para el cálculo se recogen en el APÉNDICE 01 ESTUDIO GEOTÉCNICO.

Según el Mapa Geológico Nacional, hoja 796 Gandía, la zona se encuentra sobre un depósito del Cuaternario, formada por arcillas pardas con algunos cantos.

En este estudio se diferencian dos unidades geotécnicas. Una primera unidad hasta los 1,4 m de profundidad formada por un relleno natural con consistencia blanda. Una segunda unidad a partir de los 1,4 m y al menos hasta el final del sondeo (6 m), formada por limos y arcillas, “arcilla de baja plasticidad con arena (CL)” según la clasificación de la USCS.

Los valores de los parámetros geotécnicos que se obtienen del proyecto mencionado y se emplean en el diseño de las cimentaciones, son los mostrados en la Tabla I.2.6.

Parámetro	Valor
Cohesión efectiva c'	0,26 kp/cm ²
Resistencia corte no drenada c_u	1 kp/cm ²
Ángulo de rozamiento efectivo ϕ'	20°
Peso específico seco γ_{seco}	1,8 kp/dm ³
Módulo de elasticidad de suelos E	20 MPa
Coefficiente de Poisson ν	0,3

Tabla I.2.6: Parámetros geotécnicos. Fuente: [G2G Consultores, 2018].

Se recogen además en este estudio dos consideraciones: en primer lugar una profundidad del nivel freático que no se espera alcanzar, y un terreno de tipo III según la clasificación de la NCSE para el cálculo del Espectro Elástico de Respuesta.

APÉNDICE 01. ESTUDIO GEOTÉCNICO

Profundidad	Material	Tipo de muestra	Ensayos
S-1 a 1,4 mts	Limo y arcilla	MI	Análisis granulométrico de suelos por tamizado según UNE 103-101:1995
			Determinación de los Límites de Atterberg según UNE 103-103:1994/UNE 103-104:11994
			Ensayo de compresión simple en probetas de suelo UNE 130-400:1993
			Contenido de Sulfatos en suelos. Anejo 5 EHE

Los resultados de los ensayos realizados se reflejan en la descripción litológica incluida en el anejo 2 del presente informe.

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN GEOTÉCNICA DEL TERRENO.

4.1. Definición de unidades geotécnicas

A continuación se definen las unidades geotécnicas diferenciadas, sus espesores, extensión e identificación litológica, hasta la profundidad establecida en los reconocimientos, así como los parámetros esenciales para determinar las resistencias de cada una de ellas.

Las unidades geotécnicas definidas a partir de los testigos de muestra obtenidos del sondeo realizado, han sido las siguientes:

Unidad geotécnica 0: Suelo/Relleno.

De 0,0 m hasta una profundidad máxima observada en el sondeo de 0,5 metros con respecto a la boca del sondeo. Relleno, y suelo arcilloso de color marrón rojizo.

En los ensayos de penetración DPSH efectuados, se interpreta la existencia de un suelo o terreno natural con una consistencia blanda hasta una profundidad de 1,2/1,4 metros.

Los parámetros geotécnicos obtenidos a partir de las recomendaciones propuestas en el "CTE, 2006" para este tipo de materiales, se muestran en la tabla siguiente:

Parámetros geotécnicos	Valor
Peso específico (γ) (KN/m ³)	18
Ángulo rozamiento efectivo (Φ')	15
Cohesión efectiva (c') (KN/m ²)	--

Unidad geotécnica 1: Limos y arcillas

A partir de 0,5 metros y hasta 6,0 metros de profundidad (se da por terminado el sondeo). Se detectan los siguientes tramos:

- Tramo 1 (entre 0,5 y 1,8 metros de profundidad). Arcillas de color marrón rojizo, con algunos nódulos calcáreos en su interior. Según se observa en los ensayos de penetración DPSH efectuados, hasta una profundidad de 1,2/1,4 metros este tramo presenta una consistencia baja. A partir de dicha profundidad, la consistencia es de media a firme. Tramo de plasticidad baja y totalmente seco.
- Tramo 2 (entre 1,8 y 2,1 metros de profundidad). Costra o gravas calcáreas, de color marrón claro. Solo se detecta dicha costra/gravas en el sondeo efectuado, y de forma parcial en el ensayo DPSH nº 1, entre 1,8 y 2,0 metros. Tramo de compacidad muy densa, no plástico y seco.
- Tramo 3 (entre 2,1 y 6,0 metros de profundidad). Limo y limo arcilloso de color marrón claro, con algunos nódulos calcáreos diseminados en su interior. Tramo de consistencia firme, plasticidad baja, y seco. En el ensayo de penetración DPSH nº 3, este tramo aparece ligeramente más blando de lo que se observa en su entorno.

La muestra analizada en laboratorio se clasifica como **arcilla de baja plasticidad con arena (CL)** según la clasificación de la USCS.

Los valores de golpeo promedios de los materiales de esta unidad geotécnica, que han resultado en los ensayos de campo realizados, han sido los siguientes:

Unidad geotécnica	N ₃₀ (promedio)	N ₂₀ (promedio)
1	28	17

Se ha realizado un ensayo de compresión simple en probetas de suelo UNE 103-400:1993, que arrojó un valor de resistencia de $q_u=233$ Kpa.

En función de los datos obtenidos en los ensayos de campo y laboratorio efectuados, así como de las recomendaciones propuestas en el "CTE, 2006" para este tipo de materiales, y teniendo en cuenta los valores más flojos obtenidos con el ensayo de penetración DPSH nº 3, se pueden establecer los siguientes parámetros geotécnicos para esta unidad:

Parámetros geotécnicos	Valor
Densidad húmeda (γ_n) (KN/m ³)	20
Densidad seca (γ_s) (KN/m ³)	18
Límite líquido	26,3
Índice de plasticidad	7,5
Ángulo rozamiento (Φ')	20°
Cohesión efectiva estimada (c') (KN/m ²)	26
Cohesión total (c_u) (KN/m ²)	100
Módulo de elasticidad de suelos (E) (MN/m ²)	20
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3
Coefficiente de permeabilidad (Kz) (m/s)	10 ⁻⁷
Agresividad del suelo por sulfatos	No

Se ha tomado una muestra de suelo en el sondeo, a una profundidad de 1,4 metros con respecto a la boca del sondeo, en el que se obtuvo un resultado del ion sulfato de **300 mg/kg**, por lo que **esta unidad geotécnica no presenta agresividad por sulfatos para el hormigón.**

4.1.1. Nivel freático

No se detectado la presencia del nivel freático en los trabajos de campo realizados, por lo que, de no variar de forma importante las condiciones existentes el día de la visita al solar, la cimentación no se verá afectada por la presencia de agua en el subsuelo.

4.2. Análisis de cimentación

4.2.1. Soluciones de cimentación.

Analizando todos los resultados obtenidos con los ensayos realizados, se ha considerado la siguiente opción de cimentación para el caso que nos ocupa:

- Cimentación mediante **Zapatas aisladas arriostradas.**

Cota de cimentación: **Unidad geotécnica 1 (Limos y arcillas).** Se recomienda una profundidad de cimentación a partir de 1,4* metros con respecto a la superficie del solar.

*En cualquier caso, el suelo/relleno superficial, que puede presentar un espesor variable a lo largo de todo el solar, debe ser convenientemente eliminado de la base de cimentación.

4.2.2. Determinación de presión vertical de hundimiento y admisible.

Presión vertical admisible:

Para la determinación de la presión vertical admisible y de hundimiento, se ha utilizado (de cara a la seguridad) la formulación indicada por el 'CTE' para materiales cohesivos (limos y arcillas), saturados y de permeabilidad baja.

Los cálculos se han realizado en situaciones de dimensionado a corto plazo de carga con drenaje, y por tanto la resistencia al corte del terreno se expresa en términos de tensiones efectivas.

La Presión vertical admisible calculada para el caso de unas **zapatas aisladas arriostradas** con cualquier dimensión, y teniendo en cuenta los tramos más blandos detectados en el ensayo de penetración DPSH nº 3, ha resultado de **150 KN/m²**.

4.2.3. Asiento de las cimentaciones directas.

Considerando las presiones admisibles obtenidas para zapatas apoyadas sobre el terreno descrito, se han calculado los siguientes asientos (ver anejo cálculos para metodología y cálculos detallados).

Lado menor, b (m):	1.00	1.50	2.00
Lado mayor, a (m):	1.00	1.50	2.00
Asientos (cm):	0.66	0.93	1.18

A la hora de efectuar una cimentación mediante elementos aislados (zapatas) también es necesario el **cálculo de los asientos diferenciales y la distorsión angular**.

Suponiendo dos zapatas cuadradas con unas dimensiones de 1,5 x 1,5 y 2,0 x 2,0 metros respectivamente, se ha procedido a efectuar el cálculo de asientos diferenciales y distorsión angular para distintos valores de L (luces entre pilares).

A partir de los parámetros calculados, y las citadas dimensiones de zapatas, se han obtenido unos asientos máximos de 0.93 y 1.18 cm, cifrándose el asiento diferencial (Δ) en 0.25 cm.

Los valores de distorsión angular obtenidos en función de las luces entre pilares, para las dimensiones de zapatas anteriormente indicadas, son:

L (cm)	Distorsión angular (β)	Límite admisible 1/500= 0,002
100	0,0025	No admisible
150	0,0016	Admisible

Por tanto, considerando las dimensiones de zapatas seleccionadas y para valores de L (luces entre pilares) superiores o iguales a 1,3 metros, se obtiene una distorsión angular admisible para la tipología de estructura proyectada.

Los valores límites según el CTE son:

Tabla 2.2. Valores límite basados en la distorsión angular

Tipo de estructura	Límite
Estructuras isostáticas y muros de contención	1/300
Estructuras reticuladas con tabiquería de separación	1/500
Estructuras de paneles prefabricados	1/700
Muros de carga sin amar con flexión cóncava hacia arriba	1/1000
Muros de carga sin amar con flexión cóncava hacia abajo	1/2000

4.2.4. Módulo de balasto.

Para obtener un coeficiente de balasto K_{30} (placa de 0,3 x 0,3 m), se atiende a las recomendaciones propuestas por el "CTE, 2006", que para un material de estas características asigna un $K_{30} = 45 \text{ MN/m}^3$.

4.3. Excavabilidad y excavación.

El suelo/relleno superficial, unidad geotécnica 0, así como los limos y arcillas de la unidad geotécnica 1, serán fácilmente excavables mediante métodos mecánicos convencionales, excepto en el caso de que aparezca alguna costra calcárea (se observa en el sondeo 1 entre 1,8 y 2,1 metros de profundidad).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El EXMO. AJUNTAMENT DEL REAL DE GANDÍA, ha solicitado la realización de un estudio geotécnico para el proyecto de construcción de un Pabellón Deportivo que constará de planta baja, en un solar situado en la Avenida de la Pau nº 10, perteneciente al término municipal del Real de Gandía (Valencia).

Según el "CTE, 2006", el perfil de terreno identificado se clasifica en el grupo T-1, y la edificación proyectada se encuadra en el tipo C-1.

Unidades geotécnicas:

- Unidad geotécnica 0. Suelo/Rellenos.
- Unidad geotécnica 1. Limos y arcillas.

Los espesores y las características geotécnicas de cada unidad se describen en el apartado 4 del presente informe.

Nivel freático:

No se ha detectado la presencia del nivel freático en los ensayos de campo realizados.

Agresividad del terreno:

El contenido de sulfatos solubles determinado en laboratorio para los suelos analizados es de 300 mg/kg de SO₄, por lo que este material se clasifica como no agresivo al hormigón según la norma EHE-08. Con este contenido en sulfatos, no se hace necesario el uso de cemento sulfo-resistente (SR) en todo elemento estructural en contacto con el terreno.

Sismicidad:

Según la norma sismorresistente NCSE-02, la aceleración sísmica básica en el término municipal de Real de Gandía es de $a_b = 0,07$ g.

Para construcciones de importancia normal y una aceleración sísmica básica (a_b) superior a 0,04 g (como en este caso), la norma NCSE-02 es de obligado

cumplimiento excepto en las construcciones con pórticos bien arriostrados entre sí en todas las direcciones cuando la aceleración sísmica básica a_b sea inferior a 0,08 g.

La aceleración sísmica de cálculo obtenida es $a_c = 0,0896$ g.

Excavabilidad del terreno:

El suelo/relleno superficial, unidad geotécnica 0, así como los limos y arcillas de la unidad geotécnica 1, serán fácilmente excavables mediante métodos mecánicos convencionales, excepto en el caso de que aparezca alguna costra calcárea.

Cimentación y presión admisible:

Analizando todos los resultados obtenidos con los ensayos realizados, se ha considerado la siguiente opción de cimentación:

Tipo de cimentación	Profundidad de cimentación	Presión vertical admisible de servicio	Coficiente de balasto K_{30}
Zapatas aisladas arriostradas	<p>Unidad Geotécnica 1.</p> <p>Limo y arcilla</p> <p>A partir de 1,4* metros respecto a la superficie del solar</p>	150 KN/m ²	45 MN/m ³

*En cualquier caso, el suelo/relleno superficial, que puede presentar un espesor variable a lo largo de todo el solar, debe ser convenientemente eliminado de la base de cimentación.

Aplicando los valores obtenidos en el estudio, se obtienen unos asientos totales y diferenciales por debajo de los admitidos según Norma para este tipo de terreno y para los tipos de cimentación anteriormente descritos.

Las columnas litológicas elaboradas a partir de los ensayos de penetración DPSH efectuados, son meras interpretaciones relacionadas con la perforación realizada.

1. Determinación de la presión de hundimiento mediante métodos analíticos para suelos cohesivos.

Según el "CTE, 2006", la presión de hundimiento de una cimentación directa viene definida por la siguiente ecuación, que podrá expresarse en presiones totales o efectivas, brutas o netas.

$$q_h = c_k N_c d_c s_c i_c t_c + q_{0k} N_q d_q s_q i_q t_q + 1/2 B^* \gamma_k N_\gamma d_\gamma s_\gamma i_\gamma t_\gamma$$

siendo:

q_h presión vertical de hundimiento o resistencia característica del terreno R_k .

q_{0k} presión vertical característica debida a la sobrecarga de tierras existentes al nivel de la base de la cimentación, alrededor de ésta.

c_k valor característico de la cohesión del terreno.

B^* ancho equivalente de la cimentación.

γ_k peso específico característico representativo del terreno por debajo de la base de cimentación.

$N_c N_q N_\gamma$ factores de capacidad de carga. Son adimensionales y dependen exclusivamente del valor característico del ángulo de rozamiento interno del terreno (Φ_k). Se denomina respectivamente factor de cohesión, sobrecarga y de peso específico.

$d_c d_q d_\gamma$ coeficientes correctores o de influencia para considerar la resistencia al corte del terreno situado por encima y alrededor de la base de cimentación. Se denominan factores de profundidad.

$s_c s_q s_\gamma$ coeficientes correctores de influencia para considerar la forma en planta de la cimentación.

$i_c i_q i_\gamma$ coeficientes correctores de influencia para considerar el efecto de la inclinación de la resultante de las acciones con respecto a la vertical.

$t_c t_q t_\gamma$ coeficientes correctores de influencia para considerar la proximidad de la cimentación a un talud.

Aplicando los valores obtenidos en el presente estudio, y realizando los cálculos en condiciones drenadas, se han obtenido los siguientes resultados:

Cimentación mediante zapatas aisladas arriostradas y/o continuas

Condiciones de carga con drenaje	x
Zapatas aisladas	x
Ángulo rozamiento	20°
Cohesión efectiva (KN/m ²) c´	26
Peso específico (KN/m ³) g _k	20

Considerando un factor de seguridad de 3, la presión admisible obtenida para zapatas aisladas arriostradas, ha sido la siguiente:

Ancho cimentación (metros) B	1.50	1.50	2.0
Largo cimentación (metros) L	1.50	3.00	2.0
Presión hundimiento(KN/m²) qh	164	150	167

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda **una presión admisible de servicio de 150 (KN/m²)**, para una cimentación mediante **zapatas aisladas arriostradas**, con cualquier dimensión.

2. Asientos de las cimentaciones directas.

Los cálculos de los asientos se han realizado utilizando la fórmula de Steinbrenner según el método elástico multicapa.

$$s_{(z)} = \frac{q \cdot b}{2 \cdot E} \cdot (A \cdot \phi_{1(A,B,Z)} - B \cdot \phi_{2(A,B,Z)})$$

$$A = 1 - \nu^2$$

$$B = 1 - \nu - 2 \cdot \nu^2$$

$$\phi_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\text{Ln} \frac{\sqrt{1+n^2+m^2} + n}{\sqrt{1+n^2+m^2} - n} + n \cdot \text{Ln} \frac{\sqrt{1+n^2+m^2} + 1}{\sqrt{1+n^2+m^2} - 1} \right]$$

$$\phi_2 = \frac{m}{\pi} \cdot \text{arctag} \frac{n}{m \cdot \sqrt{1+n^2+m^2}}$$

$m = z/b$
 $n = a/b$
 $a =$ largo cimentación
 $b =$ ancho cimentación
 $q =$ presión unitaria aplicada
 $E =$ módulo elástico

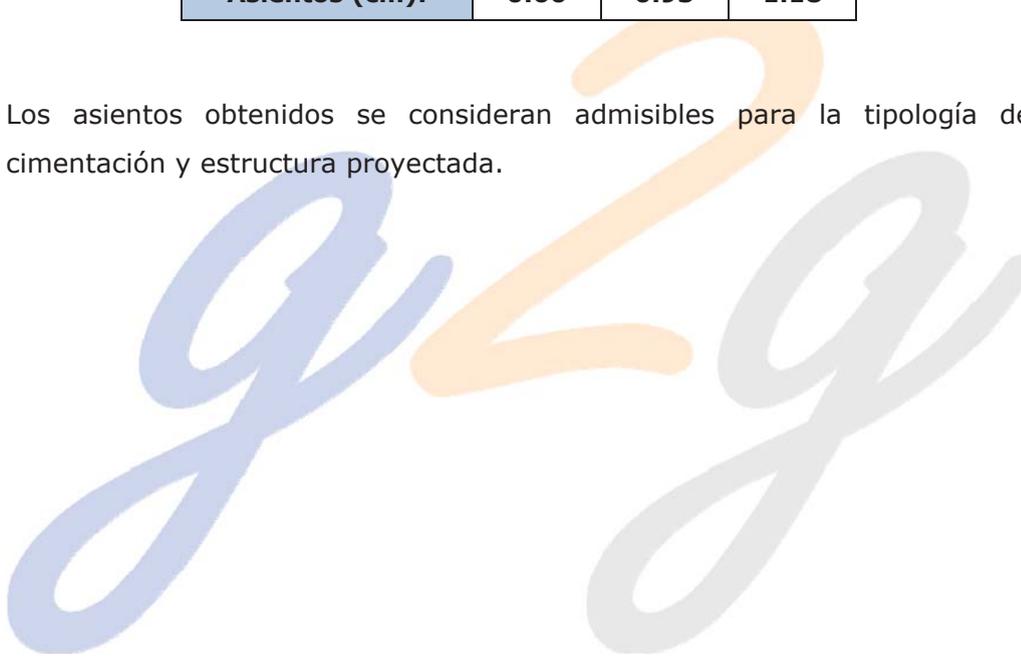
Considerando el valor de carga de hundimiento calculado en el apartado anterior, se han obtenido los siguientes asientos:

Carga neta, q:	1,50	kg/cm ²
----------------	------	--------------------

Nivel	Z _{final} (m)	E (kg/cm ²)	Coef. Poisson
I	5	200	0,30

Lado menor, b (m):	1.00	1.50	2.00
Lado mayor, a (m):	1.00	1.50	2.00
Asientos (cm):	0.66	0.93	1.18

Los asientos obtenidos se consideran admisibles para la tipología de cimentación y estructura proyectada.



ANEJO 03. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

03.1. Objeto del anejo	2
03.2. Justificación dimensiones	2
03.2.1. Alturas de los mástiles	2
03.2.2. Desplomes de los mástiles	3
03.2.3. Posición del perímetro de la membrana	4
03.2.4. Dimensiones de los módulos	5
03.2.5. Posiciones de los apoyos	6
03.3. Parametrización de la estructura	8

03.1. Objeto del anejo

El objeto del presente anejo es recopilar los diferentes condicionantes presentes en el proceso de definición de la geometría y las dimensiones de la estructura, así como mostrar los valores considerados finalmente en la definición de la geometría.

03.2. Justificación dimensiones

La forma en las tensoestructuras es un aspecto directamente relacionado con el comportamiento estructural. Se debe buscar una forma que, cumpliendo con los distintos condicionantes, pueda soportar la cargas externas de la forma más eficiente. Se observa cómo los condicionantes pueden influir de manera directa en uno de los aspectos, pero indirectamente acaban repercutiendo en el resto, siendo la geometría de la estructura el resultado de la consideración de todos ellos conjuntamente.

Las posibilidades de forma de la membrana son infinitas, es por lo que estos condicionantes en primer lugar, y las cargas exteriores en segundo lugar, acotan esta infinidad de soluciones y dan lugar a la geometría final de la estructura. En la presente sección se describen los 6 aspectos que definen la forma y dimensiones de la estructura, junto con los condicionantes que se consideran en cada uno.

03.2.1. Alturas de los mástiles

El primero de los aspectos que define la forma de la estructura es la altura de los mástiles, que debe situarse en un rango concreto de valores. La altura máxima de los mástiles altos, viene limitada en primer lugar a un valor máximo de 10 m según las normas urbanísticas. Por otro lado, la altura de los mástiles bajos, viene limitada a un valor mínimo de 7 m por las necesidades del propio juego que se practica.

Entre este rango posible de alturas, se atiende también a la diferencia de cotas entre las cabezas de los mástiles bajos y de los mástiles altos.

Diferencias de cotas muy altas, presentan la ventaja de crear una estructura de elevada curvatura, que conlleva que el pretensado inicial de la membrana pueda ser más bajo, o resista de un modo más sencillo los efectos de las acciones externas. Por el contrario, presenta la desventaja de crear una mayor superficie “lateral” sobre la cual incide el viento y que actúa como vela ante el flujo del mismo, aumentando los valores de succiones y propiciando que a igualdad de valores de pretensado inicial, se produzcan arrugas (“wrinkling”) y zonas de pérdida de tensión con mayor facilidad. Además, una altura más alta supone que la presión sobre la membrana sea mayor debido a la tendencia creciente con la altura del perfil de velocidades que se define en el CTE.

Diferencias de cota muy bajas, presentan la ventaja de oponer menor resistencia al flujo del viento, las succiones generadas son menores, con lo que solucionan los problemas que

presentan las diferencias de cotas altas. En cambio, presentan el problema de requerir mayores valores de pretensado para ser estables ante las cargas externas (principalmente las gravitacionales), y mayor facilidad de presentar zonas de inversión de la curvatura, en las que la curvatura convexa pasa a ser cóncava. Esto conlleva a la formación de zonas de embolsamiento (“ponding”) en las que se produce la acumulación de agua (aumento de peso sobre la membrana y una posible expansión progresiva del fallo) o suciedad.

Teniendo en cuenta todo esto, las alturas de los mástiles dispuestas deben proporcionar como resultado una forma de la estructura adecuada y que sea solución de equilibrio entre los problemas que presentan diferencias de cotas muy bajas o muy altas. Se atiende también, de forma subjetiva, al aspecto estético y formal de la estructura.

03.2.2. Desplomes de los mástiles

Además de por su altura, las posiciones de los mástiles también se definen por su desplome. Considerado el desplome (*desp*) como $desp = \Delta h_i / Z_i$ (en tanto por ciento): donde Δh_i representa la desviación en horizontal entre la base del mástil y la proyección de la cabeza sobre el plano horizontal que contiene la base del mástil; y Z_i es la altura vertical de cada mástil, diferencia entre la cota cabeza del mástil y la cota del plano de la base del mástil.

En primer lugar se limita el valor mínimo de estos desplomes a un 5 %, que corresponde con una rotación de 2,9° respecto del eje *Z* global. Este valor no tiene ninguna justificación, sino que se considera después de haber realizado varios dimensionamientos y observar que por debajo de estos valores las fuerzas desarrolladas en los cables son elevadas, y a partir de este valor no lo son tanto.

Con bajos desplomes sucede también que los axiles (de compresión) en los mástiles son bajos, llegando a producirse el caso de tener axiles de tracción en algunos mástiles bajos. Con desplomes más altos aumentan las compresiones en los mástiles, y las tracciones de la membrana se transmiten al suelo en mayor medida como compresiones de los mástiles y no tanto como tracciones de los cables, que pueden llegar a producir la pérdida de tensión.

Por otro lado, como valor máximo se toma un 33 %, que corresponde con una inclinación de 18,3° respecto del eje *Z* global. Se justifica este valor con la capacidad frente a deslizamiento del terreno en el que se apoyan las zapatas.

Se considera que las fuerzas transmitidas a los apoyos son únicamente los axiles de los mástiles. Estos axiles se descomponen en R_H y R_V , que guardan la misma proporción entre sí que la inclinación de la directrices de los mástiles, definidas por las proyecciones Δh_i y Z_i , es decir: $R_H / R_V = \Delta h_i / Z_i = desp$ (en %).

De manera simplificada se asume que esta inclinación debe cumplir que $R_H / R_V < (\tan \delta_k) / \gamma_{\varphi'}$, para que las cimentaciones de los mástiles pudieran resistir el deslizamiento.

Con esta consideración se obtiene que $\tan(\delta_k) / \gamma_{R,h} = \tan(20) / 1,1 < 0,33$, que supone adoptar este desplome máximo del 33 %.

La inclinación de los mástiles influye significativamente en las cimentaciones, antes de alcanzar este valor límite de 33 % se observa que inclinaciones superiores al 20 % producen una fuerza horizontal considerable en los apoyos, que se convierten en un elevado momento volcador en la base de la cimentación.

En los mástiles internos de la alineación, el desplome horizontal se considera solamente en la dirección perpendicular a esta alineación; en los mástiles de esquina el desplome se considera en ambas direcciones del plano horizontal, y el desplome en cada una de estas direcciones resulta $\Delta x_i = \Delta y_i = Z_i \cdot \text{desp} \cdot \sqrt{2}/2$, tal que $\Delta h_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} = Z_i \cdot \text{desp}$.

03.2.3. Posición del perímetro de la membrana

Las posiciones de las cabezas de los mástiles, vienen definidas por las alturas y los desplomes de estos. Estos puntos se unen con las relingas, siendo las relingas los elementos que delimitan el perímetro de la membrana. La posición de este perímetro es otro aspecto que define la forma de la estructura, y también se obtiene como resultado de la consideración de varios condicionantes.

En primer lugar, en el lado sur, debido a que es el lado por el cual incide la radiación solar, se tiene el condicionante funcional de proporcionar sombra al espacio de juego. La posición del perímetro de la membrana determina en este lado si durante todo el año se mantendrá este espacio en condiciones de sombra o si en algún momento parte del espacio recibirá radiación solar.

Para ello se realiza un breve estudio de sombras en el que se busca definir cual sería la posición adecuada de la cubierta para que ante cualquier inclinación de incidencia del Sol posible, la práctica totalidad del espacio de juego se encuentre en sombra. Ya sea esta sombra producida por la fachada sur existente o por la cubierta que trata de proyectar. Se muestra en la Figura I.3.1 un esquema del estudio de sombras realizado.

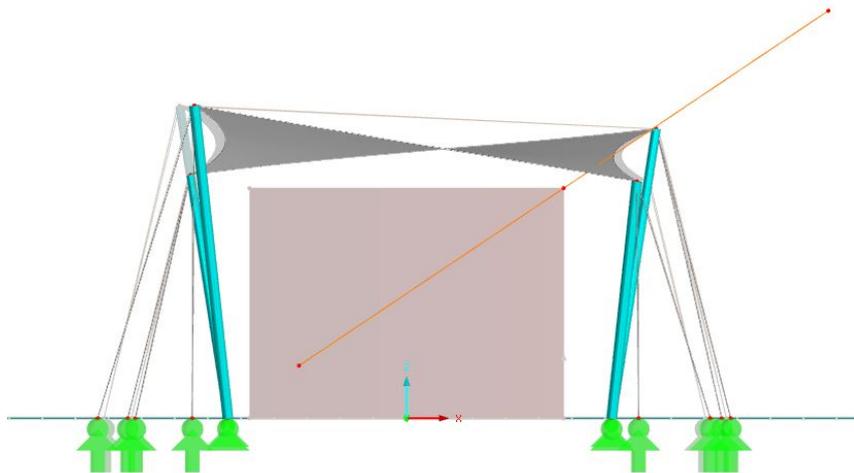


Figura I.3.1: Vista lateral estudio sombras. Elaboración: Propia.

En el estudio de sombras se llega a la conclusión que el perímetro sur de la estructura debe situarse por debajo del plano (representado en la vista por el rayo de color naranja) que forman la arista superior de la fachada sur existente (representada por el punto intermedio del rayo) y una arista imaginaria paralela a la arista inferior de la fachada norte, a una distancia en horizontal de 1,5 metros hacia el sur, y de 1,60 m en vertical, fijando este

valor como representativo de la altura de una persona situada a 1,5 m del muro norte. Esta segunda arista se representa en la vista por el punto del extremo izquierdo del rayo. Esta condición de la posición del perímetro sur de la membrana se considera únicamente para la geometría de la estructura resultante del proceso de búsqueda de forma, no se tiene en cuenta para las configuraciones finales de la estructura tras la aplicación de las cargas, debido a que estas configuraciones representarían situaciones puntuales de la estructura a lo largo de su vida útil, y no situaciones permanentes.

La posición del perímetro de la membrana en el lado norte no está condicionada por el Sol, ya que en ningún caso la estructura recibirá radiación solar desde el norte. Pero tiene el condicionante de la acción del viento 0° , del mismo modo que influye en las alturas de los mástiles; y un menor espacio disponible para ubicar los anclajes de los cables, por lo que en este lado los mástiles se encuentran más próximos a la estructura existente. Por la presencia de la acera, deben ubicarse los apoyos de los mástiles a una distancia inferior a 5 m desde la fachada norte. En este lado además, se trata de disponer una especie de marquesina que sobresalga en horizontal entre 2,5 y 3 m respecto de la estructura existente, y sirva como cobertura del espacio delimitado entre la acera y la instalación deportiva.

La orientación dada de la estructura, en la que las dos alineaciones mayores están alineadas prácticamente en la dirección Este-Oeste, provoca que el Sol incida perpendicularmente a uno de los lados de la misma. Esto lleva a la asimetría de la estructura, en el lado sur se desplazan las bases de los mástiles hacia el exterior (el espacio disponible es mayor), se bajan las cotas de los mástiles y se da un mayor desplome a los mástiles. Mientras que en el lado norte la altura de los mástiles es mayor y se encuentran más próximos a la fachada existente.

Se observa que la zona de los fondos del espacio de juego está formada únicamente por vallas de alambres, las cuales no impiden el paso de la radiación solar por estas zonas que se produciría en las primeras horas de Sol por el extremo Este de la estructura, y en las últimas horas de Sol de cada día por el extremo Oeste. Para ello se propone la instalación de un cerramiento formado por paneles de aluminio perforados con el fin de cubrir la parte de perímetro de la estructura que actualmente no está realizada con paredes de ladrillo, se excluye el cálculo de este cerramiento del presente trabajo al considerarse parte de la estructura existente y no de la nueva cubierta.

03.2.4. Dimensiones de los módulos

La dimensión de los módulos en la dirección del lado corto de la planta, se obtiene tras un primer ajuste para cubrir el criterio de sombras. Con lo que viene condicionada en parte por la necesidad de dar sombra al espacio de juego, y se obtiene tras fijar los desplomes, alturas y posiciones de los puntos de apoyo de los mástiles.

A partir de las dimensiones planteadas en esta dirección, se establecen las longitudes de los módulos en la dirección perpendicular, controladas con la separación (*sep*) entre puntos de apoyo contiguos de una alineación. Se busca respetar que se obtengan módulos en los que la proporción entre cada lado sea lo más próxima a 1 posible, y se cubra la longitud necesaria con un número entero de módulos, sin necesidad de disponer módulos de longitud variable por motivos de simplicidad.

03.2.5. Posiciones de los apoyos

El resto de posiciones de nodos restantes por determinar son los apoyos en el terreno tanto de los mástiles como de los contravientos. Ambos tipos de apoyos vienen condicionados por las posiciones de las cabezas de los mástiles, definidas previamente en función de la incidencia del Sol, el comportamiento óptimo de la membrana y la oposición al flujo del viento de la superficie.

Las posiciones de los apoyos de los mástiles se obtienen a partir de las posiciones de las cabezas de los mástiles una vez determinados las alturas y desplomes de éstos.

Las posiciones de los apoyos de los contravientos, se definen en función de la inclinación de estos cables respecto de la dirección vertical y de la desviación en planta respecto de un plano vertical paralelo al plano XZ . Se ubican estos apoyos en el punto de intersección entre el plano de cota 0 y la recta que pasa por la cabeza del mástil y sigue las inclinaciones y direcciones fijadas. Se representa un ejemplo en la Figura I.3.2 donde se representan esta inclinación (B) y desviación (A) simétrica.

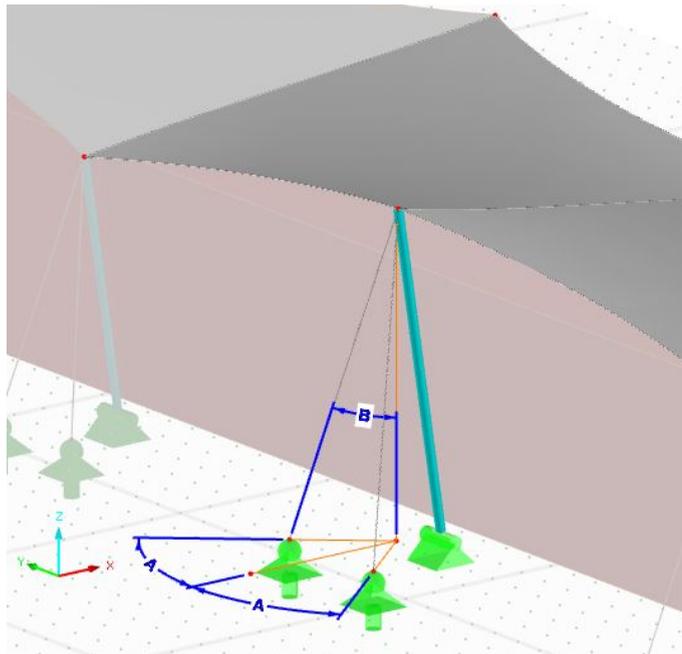


Figura I.3.2: Posiciones cables respecto de cabezas de mástiles. Elaboración: Propia.

En los mástiles de esquina, se aplica además una rotación C de los cables hacia el exterior del plano de simetría a partir del cuál se define la desviación A simétrica, medida desde el plano vertical XZ . Esto se realiza con el objetivo de orientar el plano de simetría de los cables con la resultante de fuerzas en la cabeza del mástil, lo que permite que las fuerzas de pretensado en ambos contravientos de un mástil de esquina tengan valores lo más iguales posible, minimizando por tanto la tensión del cable más solicitado. Se representa en la Figura I.3.3 un ejemplo de las posiciones de estos apoyos.

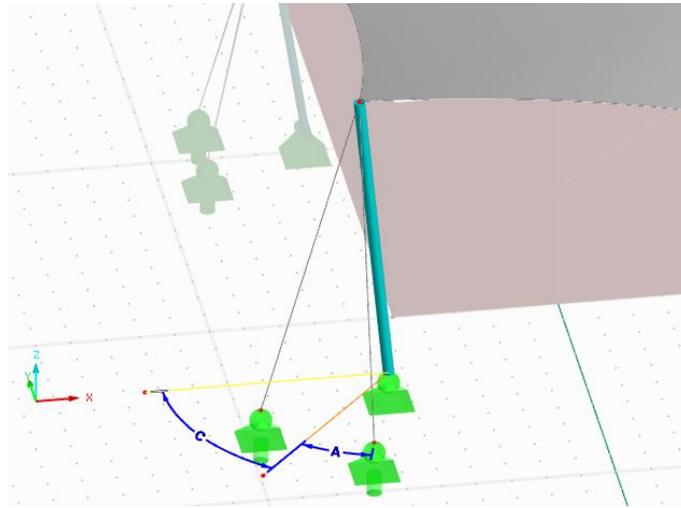


Figura I.3.3: Posiciones cables respecto de cabezas de mástiles en esquina. Elaboración: Propia.

Se controla que estas posiciones se ubiquen dentro del perímetro de la parcela. Para ello se consultan los datos del Catastro de la parcela, de los que se concluye que el espacio disponible dentro del cual deben disponerse estos apoyos es una banda de 5 m de ancho en el lado norte de la estructura, y otra banda de 10 m en el lado sur; en los lados este y oeste el espacio disponible es elevado y no llega a suponer una limitación para los apoyos de las esquinas. El polígono de 5 lados del perímetro está definido por la posición relativa de los 5 vértices respecto de las esquinas de la estructura existente. En la Figura I.3.4 se muestra un croquis acotado del espacio disponible para ubicar los anclajes.

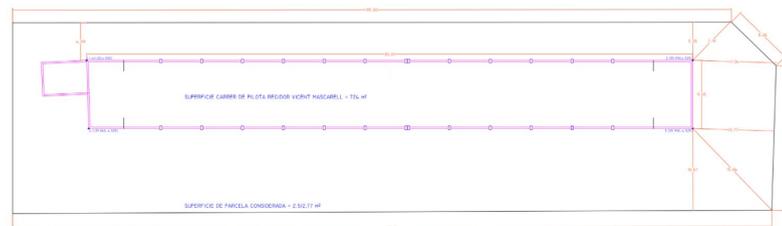


Figura I.3.4: Posición de la estructura existente en el interior de la parcela. Elaboración: Propia.

03.3. Parametrización de la estructura

La geometría de equilibrio de la estructura se obtiene como resultado del proceso de búsqueda de forma, como se comenta en el ANEJO 04. ANÁLISIS ESTRUCTURAL. Previamente a este proceso, debe introducirse una geometría inicial que sirve como condición de contorno del proceso, y se define en función de una serie de parámetros que controlan la posición y forma de todos los elementos.

Los parámetros utilizados para definir las posiciones de los nodos de la estructura en esta geometría inicial, y los valores considerados para cada uno son:

Altura de mástiles altos	Z_{sup}	9,5	[m]
Altura de mástiles bajos	Z_{inf}	7,4	[m]
Rebaje de mástiles altos lado sur	ΔZ_{sup}	0,7	[m]
Rebaje de mástiles bajos lado sur	ΔZ_{inf}	0,2	[m]
Separación entre apoyos de alineación	sep	14,4	[m]
Posición alineación bases mástiles	X_{al}	5,4	[m]
Desfase exterior alineación lado sur	ΔX_{sur}	0,80	[m]
Desplome pilares	$desp$	16	[%]
Desviación contravientos	A	40	[°]
Inclinación contravientos	B	17	[°]
Rotación contravientos esquina	C	50	[°]

Con Z_{sup} y Z_{inf} se definen las alturas de las cabezas de los mástiles altos y bajos respecto de la cota 0. Se introducen los rebajes ΔZ_{sup} y ΔZ_{inf} en los mástiles de la alineación sur, que se restan a las cotas de los mástiles de la alineación norte y dan como resultado las cotas de los mástiles de la alineación sur. En iteraciones iniciales este rebaje se considera nulo, la estructura es simétrica pero no cumple el criterio de sombras, se aumenta gradualmente este rebaje hasta alcanzar los valores finales que permiten que la geometría obtenida cumpla con todos los condicionantes presentes.

Con X_{al} se define la distancia entre las alineaciones de los mástiles y el eje global Y (paralelo a estas alineaciones). Se introduce el desfase ΔX_{sur} en la alineación sur, que se corresponde con la distancia en que esta alineación se desplaza hacia el sur. Como sucede con las alturas, inicialmente se consideran ambas alineaciones situadas a la misma distancia del eje Y , siendo nulo este desfase, pero la estructura no cumple con todos los condicionantes considerados. Con el fin de encontrar una geometría válida que cumpla todos los condicionantes, se aumenta progresivamente el valor de este desfase. Se obtiene así como resultado una geometría ligeramente inclinada hacia el sur, con este giro se trata de mantener en sombra el espacio de juego con la menor superficie de cubierta posible.

El resto de parámetros representan las dimensiones comentadas en las secciones anteriores.

Los parámetros utilizados para definir la condición de estado tensional en la geometría final del proceso de búsqueda de forma, y los valores considerados son:

Tensión en la dirección de la urdimbre	n_x	6,2	[kN/m]
Tensión en la dirección de la trama	n_y	6,2	[kN/m]
Flecha relativa cables	s_{rel}	6,4	[%]

La flecha relativa de los cables corresponde con el porcentaje entre el máximo desplazamiento de uno de sus puntos y la longitud de los cables. A mayor valor de este parámetro, los cables están sometidos a menores tracciones y se distribuye de mejor manera la tracción de los cables a la membrana.

A estos valores de parámetros se llega tras realizar unas pocas decenas de dimensionamientos durante los cuales se modifican los valores con el fin de asegurar la estabilidad de la estructura y las resistencias de los elementos estructurales, y alcanzar geometrías que supongan un menor uso de materiales y menores secciones transversales de los elementos.

Durante el proceso de búsqueda de forma se observa que a un nivel más avanzado la parametrización permite solucionar la búsqueda de forma de un modo más automático. Para ello sería necesario determinar la función objetivo e iterativamente modificar los valores de búsqueda de forma hasta alcanzar esta geometría que optimizara la función objetivo. Este tipo de técnicas son ya usadas actualmente en el diseño de estructuras, pero no se lleva a cabo por falta de medios y no ser uno de los objetivos del trabajo.

ANEJO 04. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

04.1. Objeto del anejo	2
04.2. Metodología análisis de la estructura	2
04.2.1. Modelización de la estructura	2
04.2.2. Búsqueda de forma	7
04.2.3. Análisis estructural	13
04.2.4. Verificaciones	16
04.3. Resultados	18
04.3.1. Resultados de la búsqueda de forma	18
04.3.2. Resultados del análisis estructural	27
04.3.3. Resultados de las verificaciones	42
04.4. Análisis simplificados	54
04.4.1. Análisis acción sísmica	54
04.4.2. Análisis operaciones de mantenimiento	58
04.4.3. Análisis carga equivalente	63
04.5. Diseño de cimentaciones	68
04.5.1. Bases de cálculo	69
04.5.2. Comprobaciones geotécnicas en zapatas	72
04.5.3. Comprobaciones estructurales en zapatas	77
04.5.4. Comprobaciones en anclajes	81
04.6. Cálculo de uniones	86
04.6.1. Unión tipo pasador	86
04.6.2. Unión tipo rótula	90
04.6.3. Uniones de cables	91
APÉNDICE 01 RESULTADOS EN MÁSTILES	93
APÉNDICE 02 RESULTADOS EN CABLES	101
APÉNDICE 03 RESULTADOS EN MEMBRANA	110
APÉNDICE 04 REACCIONES EN APOYOS	133

04.1. Objeto del anejo

El objeto del presente anejo es mostrar el modelo utilizado para el análisis estructural de la cubierta, los procedimientos seguidos para determinar la forma de la membrana y las condiciones de estado tensional de la estructura, y las comprobaciones efectuadas para verificar el cumplimiento de los requisitos estructurales de la estructura proyectada, así como de cada uno de los elementos que la conforman.

04.2. Metodología análisis de la estructura

En el procedimiento seguido pueden diferenciarse tres etapas: la búsqueda de la forma inicial de la estructura, el análisis de la respuesta de la estructura ante las acciones externas, y la verificación de los elementos estructurales. Se trata de un procedimiento iterativo en el cual se van modificando los parámetros de entrada de la etapa inicial hasta que se obtiene en la última etapa la validación de la estructura. Esta validación supone la obtención de un resultado positivo en todas las verificaciones de los elementos estructurales.

Estos cálculos son llevados a cabo haciendo uso del software RFEM5 [Dhubal, 2021], desarrollado por Dhubal. Este software, además de ser útil para muchas otras tipologías estructurales, resulta particularmente útil para el cálculo de tensoestructuras al permitir realizar las tres partes del análisis desarrollando un único modelo de la estructura. Este modelo generado sirve también para la posterior generación de los patrones de corte de la membrana.

04.2.1. Modelización de la estructura

Con el software mencionado se realiza el modelado de la estructura mediante una discretización por elementos finitos. En comparación con otros software de cálculo de elementos finitos, en RFEM5 no es posible la elección del tipo de elemento finito a utilizar de forma explícita. El software dispone automáticamente el tipo de EF en función del tipo de barra, superficie o volumen dispuesto, y en función del tipo de análisis definido.

Según lo dispuesto en el manual del software, se observa que para los elementos 1D (vigas, cerchas, nervios, piezas comprimidas, piezas traccionadas, cables...) se utilizan elementos finitos de 2 nodos con 6 GDL en cada nodo, las 3 traslaciones y las 3 rotaciones. Utiliza polinomios de tercer grado como funciones de interpolación.

En la discretización de los mástiles se utiliza el elemento finito 1D descrito en el manual. Para los cables no viene especificado explícitamente el tipo de elemento, a la vista de los resultados obtenidos se observa como el elemento utilizado incluye únicamente los efectos de deformación axial (tracción) y omite las deformaciones de flexión y torsión, asemejándose el comportamiento al de una cadena de barras articuladas.

Para los elementos 2D, el software permite únicamente la elección de la forma de los elementos finitos; el número de GDL por nodo y las funciones base son escogidos implícitamente

al elegir el tipo de superficie. En placas planas permitiría la elección elementos de 3 nodos o de 4 nodos, con 6 GDL por nodo. En el caso de membranas curvas, el software dispone automáticamente elementos finitos basados en el EF de [Bergan and Felippa, 1985], es decir, elementos triangulares de 3 nodos y 3 GDL (u_X , u_Y y φ_Z), para evitar el efecto de alabeo del elemento (“warping”) que se produciría con los elementos cuadrangulares. Las funciones base se dividen en tres desplazamientos de sólido rígido, tres condiciones constantes de deformación, y tres gradientes lineales de tensión y deformación. El campo de desplazamientos es cuadrático y el campo de tensiones es lineal.

La malla es generada automáticamente por el programa, no se pueden definir por el usuario las coordenadas de los nodos. Únicamente se pueden controlar las dimensiones máximas de los elementos finitos, número de divisiones en barras, distorsión de elementos superficiales, y el refinamiento de la malla en torno a nudos, líneas o superficies. Se impone que la longitud de los elementos finitos sea menor que 0,4 m en superficies y menor que 0,8 m en barras, y un número máximo de 500.000 nodos.

El modelo está formado por un total de 8.451 nodos, 896 elementos finitos 1D y 15.984 elementos finitos 2D.

Se fija un sistema de coordenadas global con origen en el centro geométrico del espacio rectangular de juego. El eje X de este sistema se orienta según la dirección del lado corto del espacio de juego, el eje Y se encuentra contenido en el plano del terreno y perpendicular al eje X , y el eje Z está orientado según la vertical y con sentido opuesto al de la gravedad.

Se consideran tres tipos de condiciones de contorno en los nudos de la estructura: en los nudos de base de los mástiles que no se encuentran en las esquinas, se consideran restringidas las 3 traslaciones, la rotación de torsión (rotación según el eje Z global), y la rotación según el eje X global, modelando así el comportamiento de un pasador; en los nudos de base de los mástiles de las esquinas se consideran restringidas las 3 traslaciones y la rotación de torsión, modelando así el comportamiento de la rótula, más apropiada esta condición de contorno ya que en este tipo de apoyos se producen rotaciones según ambos ejes contenidos en el plano horizontal; y en los anclajes de los cables se consideran restringidas las 3 traslaciones.

En la Figura I.4.1 se muestra un ejemplo del modelo de la estructura, donde pueden distinguirse los EF con los que se discretiza la estructura y las condiciones de apoyo. En la Figura I.4.2 se muestra la malla con la que se discretiza uno de los módulos, los nodos en rojo corresponden con los apoyos bajos y los amarillos con los apoyos altos.

En el modelo realizado, las principales variables que definen la geometría de la estructura (coordenadas de los nudos y fuerzas de tesado) están parametrizadas, lo que permite que a partir de un número reducido de parámetros de entrada puedan definirse y modificarse de modo automático todas las principales dimensiones, coordenadas de los nudos y propiedades de la estructura. Se detalla este aspecto en la sección 03.3 del ANEJO 03. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.

Para la introducción de las secciones transversales de los mástiles, el software lleva incluida una biblioteca de secciones según diferentes tipos de materiales, normativas y fabricantes, como es el caso de la serie de tubos estructurales redondos conformados en caliente del

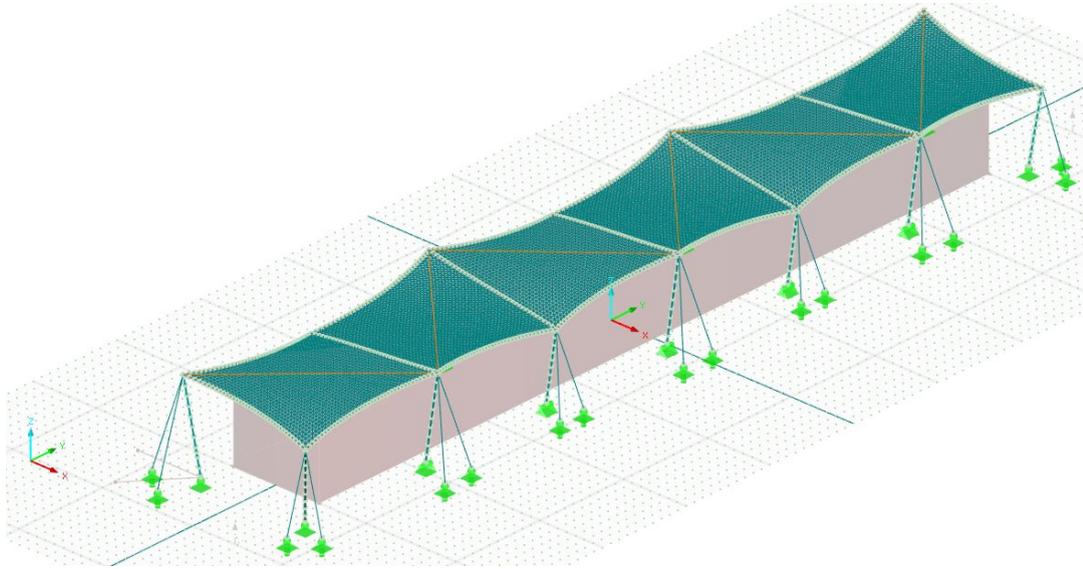


Figura I.4.1: Modelo Elementos Finitos estructura. Elaboración: Propia.

fabricante Condesa. Al inicio de la creación del modelo se definen 6 grupos de barras, (mástiles altos lado sur, mástiles bajos lado sur, mástiles bajos esquina sur, mástiles altos lado norte, mástiles bajos lado norte y mástiles altos esquina norte) y se indica únicamente la serie de secciones transversales utilizada en cada uno de los grupos y una sección como solución inicial.

Con el módulo RF-STEEL que incorpora el software, es posible calcular cuál es la sección óptima para cada grupo de barras entre las disponibles de la serie escogida, según las condiciones de diversas normativas entre las que se incluye el EC3 con el anejo español. Se utiliza este módulo para conocer la sección óptima, entre las de la serie escogida, en cada grupo de barras. Aunque no en todos los casos se dispone finalmente la sección cuyo rendimiento sea más próximo a 1 para no agotar la resistencia de la sección. En la Tabla I.4.1 se muestra la sección asignada a cada uno de los grupos de barras definidos.

Los ejes locales de la sección se orientan: eje x en la dirección de la directriz de la barra, eje y paralelo al eje Y global del modelo y el eje z normal a los otros dos ejes locales. Al tratarse de una sección circular (simétrica respecto al centro), la orientación dispuesta es un aspecto irrelevante en el cálculo, se aclara únicamente para facilitar la interpretación de los resultados.

Grupo de mástiles	Número de barras: (barras)	Sección
Mástiles altos sur	3: (AL/S/1, AL/S/2 y AL/S/3)	273x10
Mástiles bajos sur	2: (BA/S/2 y BA/S/3)	219,1x6,3
Mástiles bajo esquina sur	2: (BA/S/1 y BA/S/4)	244,5x8
Mástiles altos norte	2: (AL/N/2 y AL/N/3)	273x12,5
Mástiles bajos norte	3: (BA/N/1, BA/N/2 y BA/N/3)	244,5x6,3
Mástiles altos esquina norte	2: (AL/N/1 y AL/N/4)	323,9x10

Tabla I.4.1: Secciones transversales mástiles. Elaboración: Propia.

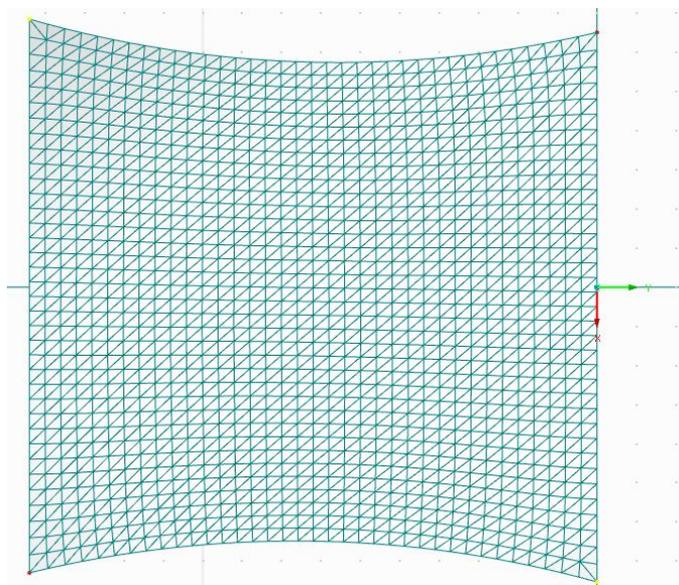


Figura I.4.2: Malla Elementos Finitos módulo. Elaboración: Propia.

En la Figura I.4.3 se muestra la posición de cada una de las barras junto con los nombres asignados para identificar cada una de ellas. En el primer término de los nombres de los mástiles se define el tipo de mástil: “AL” corresponde con los mástiles altos y “BA” con los mástiles bajos. En el segundo término se define la posición de los mástiles: se distinguen con “N” los mástiles situados en la alineación norte de la estructura, y con “S” los mástiles de la alineación sur. Por último en el tercer término, se numeran de 1 a 4 los mástiles del mismo tipo y misma alineación, el mástil 1 corresponde con el situado más al oeste y el 4 más al este.

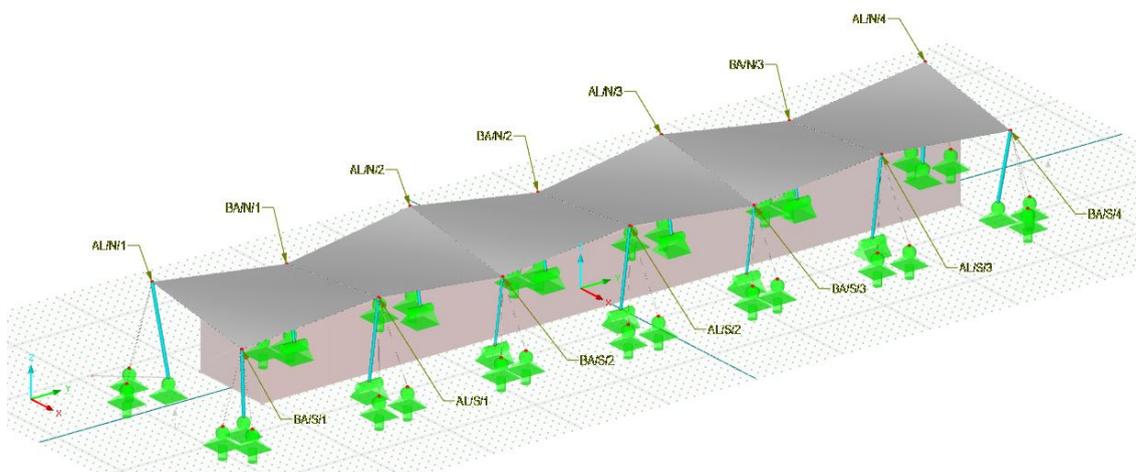


Figura I.4.3: Identificación y posición mástiles. Elaboración: Propia.

En los cables, se define la sección de estos a partir de una sección redonda genérica, introduciendo como único parámetro de entrada el diámetro. El valor del diámetro utilizado en el cálculo (\varnothing_{eq}) no corresponde con el valor del diámetro real del cable, sino que se obtiene a partir de los valores de la sección transversal metálica de los cables presentes

en el catálogo del fabricante. Se disponen 7 tipos de cables, según los rangos de fuerza de tesado considerada, como se muestra en la Tabla I.4.2. Las series de cables utilizadas son las mostradas en la sección 02.7.4 del ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO, Full locked coil strands (FLC) y Open spiral strands (OSS) del fabricante Redaelli.

Tipo de cable	Número de cables: (cables)	$\varnothing_{eq.}$ (mm)
FLC36	4: (ba/s/1-a, ba/s/4-a, al/n/1-a, al/n/4-a)	33,13
FLC32	8: (ba/s/1-b, al/s/1-a, al/s/1-b, al/s/3-a, al/s/3-b, ba/s/4-b, al/n/1-b, al/n/4-b)	29,45
FLC28	8: (ba/s/2-a, ba/s/2-b, ba/s/3-a, ba/s/3-b, ba/n/1-a, ba/n/1-b, ba/n/3-a, ba/n/3-b, al/n/4-b)	25,76
FLC24	8: (al/s/2-a, al/s/2-b, al/n/2-a, al/n/2-b, ba/n/2-a, ba/n/2-b, al/n/3-a, al/n/3-b)	22,08
OSS24	14: (r/mod1/s, r/mod2/s, r/mod3/s, r/mod4/s, r/mod5/s, r/mod6/s, r/mod1/n, r/mod2/n, r/mod3/n, r/mod4/n, r/mod5/n, r/mod6/n, r/int/1, r/int/7)	21,20
OSS20	5: (r/int/2, r/int/3, r/int/4, r/int/5, r/int/6)	17,66

Tabla I.4.2: Secciones transversales cables. Elaboración: Propia.

De igual manera que para los mástiles, se establece una serie de nombres para identificar cada uno de los tipos de cables:

- Para los contravientos, se toma el mismo nombre designado a los mástiles que estabilizan en minúscula y se añade una letra al final a/b. En los cables de los mástiles interiores se añade la letra “a” para el cable del par situado más al oeste (menor valor de la coordenada Y según el sistema de referencia del modelo), y la letra “b” para el cable situado más al este (mayor valor de la coordenada Y). En las esquinas se designa con la letra “a” al cable situado más hacia el exterior de la estructura (mayor valor absoluto de la coordenada Y), y con la letra “b” al situado más hacia el centro (menor valor absoluto de la coordenada Y). Por ejemplo, el cable al/n/2-b sería situado más hacia el este de los dos que estabilizan el mástil AL/N/2. En la figura I.4.4 se señalan en rojo los cables que siguen esta denominación.

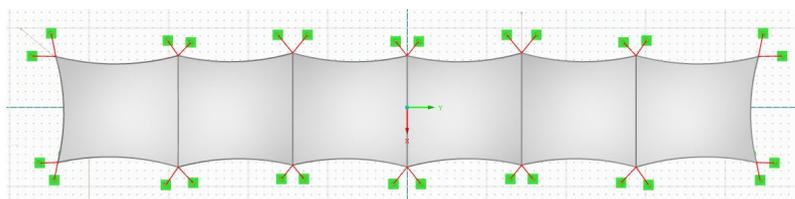


Figura I.4.4: Cables de tipo contraviento. Elaboración: Propia.

- En las relingas se definen 2 tipos diferentes, en primer lugar se tienen las relingas de los bordes laterales de los 6 módulos principales. Se numeran los módulos de mod1 a mod6 siendo el mod1 el situado más al oeste, y el mod6 más al este. Estos tipos de

cables se nombran la letra “r” de inicio, seguido del módulo al que pertenecen y las letras “n” o “s” en función de si están situados en el lado norte o sur. Un ejemplo sería el cable r/mod3/n, que correspondería con la relinga del módulo 3 situada en el lado norte. En la figura I.4.5 se señalan en rojo los cables que pertenecen a este tipo.

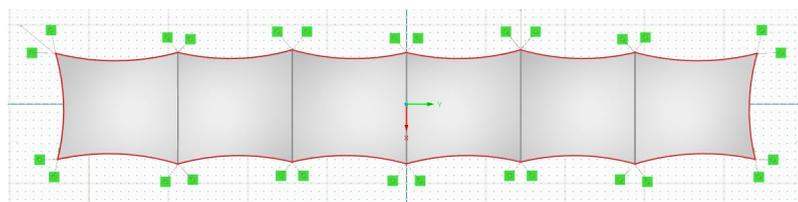


Figura I.4.5: Cables de tipo relingas laterales módulos principales. Elaboración: Propia.

- El segundo tipo de relingas son aquellas que unen los mástiles altos y bajos enfrentados. Las correspondientes a los otros dos bordes principales de cada módulo no incluidas en el tipo anterior. Se nombran con la letra “r”, seguido de “int” en referencia a su situación en el interior de la estructura, y una numeración de 2 a 6, empezando en la situada más al oeste (los cables 1 y 7 corresponden con el tipo anterior). Un ejemplo sería el cable r/int/4, que correspondería con el cuarto cable de este tipo empezando a contar desde el oeste, sería el situado en el centro de la estructura. En la figura I.4.6 se señalan en rojo los cables que pertenecen a este tipo.

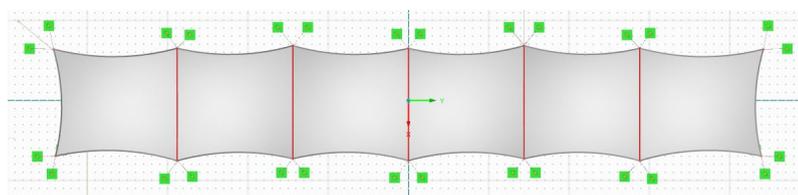


Figura I.4.6: Cables de tipo relingas interiores módulos principales. Elaboración: Propia.

04.2.2. Búsqueda de forma

“La determinación de una forma de equilibrio apropiada, es un requisito previo esencial en el diseño de una estructura de membrana. Esta forma adoptada debe satisfacer distintos requisitos: estéticos, prestaciones técnicas e idoneidad funcional. La forma de cualquier membrana viene controlada por la distribución de pretensado sobre la superficie y por la geometría de los contornos, que pueden ser rígidos (arcos, vigas) o flexibles (cables).” [Koch and Habermann, 2004]

“Se trata de un proceso iterativo en el se modifican y ajustan los parámetros de entrada hasta obtener la forma idónea. La forma de la superficie es en definitiva, el resultado de la elección de unas condiciones de contorno determinadas.” [Forster and Mollaert, 2004]
Estos parámetros son: los valores de pretensado inicial, las dimensiones y posiciones de los mástiles, y las dimensiones y posiciones de los cables.

Para la realización de esta etapa del análisis se hace uso del módulo add-on RF-FORM-FINDING presente en RFEM5.

04.2.2.1. Consideraciones previas

Previamente a la realización del proceso de búsqueda de forma de la membrana se atiende a una serie de recomendaciones que tratan de optimizar las propiedades de la geometría de equilibrio conseguida y de los materiales empleados, que son las recogidas a continuación:

- En cuanto a los valores de pretensado a disponer en la membrana, se recomienda en [Forster and Mollaert, 2004] disponer un pretensado de al menos el 1,3% de la resistencia a tracción en cada una de las direcciones. En el caso del material escogido supone un pretensado de 2,08 kN/m en la dirección de la urdimbre, y de 1,82 kN/m en la dirección de la trama. Se aconseja la posibilidad de disponer mayores valores de pretensado a costa de reducir el rango de tensiones de trabajo admisibles, para evitar la pérdida de tensión bajo la acción de las cargas.

Como valor máximo, se tiene la indicación en la Norma UNE-EN 13782 de disponer un pretensado que no exceda el 5% de la resistencia del tejido, lo que equivale a un pretensado máximo de 8,0 kN/m en la dirección de la urdimbre, y de 7,0 kN/m en la dirección de la trama.

Se especifica también en la Guía un valor orientativo de pretensado (T) que puede ser utilizado como punto de partida en el diseño, que es: $T = p \times R$ donde R es el radio de curvatura y p la carga aplicada. El radio de curvatura se calcula según:

$$R = \frac{\left[1 + \left(\frac{df}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{\left| \frac{d^2f}{dx^2} \right|} \quad (4.1)$$

Donde para la definición de la ecuación de las secciones transversales ($f(x)$), intersecciones de planos verticales que contienen a las diagonales de los módulos con la membrana, se considera que la geometría de la membrana adopta la forma de un paraboloides hiperbólico. Con lo que las secciones transversales que contienen a las curvaturas principales adquirirían la forma de una parábola de segundo grado, que se define por la posición de 3 puntos, los de dos mástiles bajos y el punto central de cada módulo. Se estima en primer lugar la posición del centro de gravedad de cada módulo, proporcionada por el software. A partir de estos datos se calculan las distancias a cada uno de los mástiles bajos (coordenadas locales x de la ecuación de la sección transversal), y la diferencia de cota entre el centro y los extremos (valores $f(x)$ de la ecuación de la sección transversal). En el centro se obtiene una cota de 8,227 m, que coincide prácticamente con el promedio de las cotas de los mástiles $((9,5 + 7,4 + 8,8 + 7,2)/4 = 8,225)$, a partir de estos datos se calculan las posiciones de los puntos que definen la ecuación de la sección transversal, que son los mostrados en la Tabla I.4.3. A partir de las coordenadas de estos puntos se extrae la ecuación 4.2 que describe la sección transversal, tomando como origen el punto resultante de la proyección del centro de gravedad del módulo sobre la diagonal que une los mástiles bajos.

Punto	x	f(x)
Mástil Bajo Norte	10,01	-0,825
Centro	0	0
Mástil Bajo Sur	-10,00	-1,025

Tabla I.4.3: Posición de los puntos de la sección transversal convexa de módulos. Elaboración: Propia.

$$f(x) = -0,0092x^2 + 0,01x \quad (4.2)$$

Se obtiene un radio de curvatura en el centro de 54,3 m y en los extremos de 56,8 m, suponiendo esta aproximación con la aplicación de la carga de nieve ($0,1 \text{ kN/m}^2$), el valor de pretensado que se toma como punto de partida es de $5,4 \text{ kN/m}$ en ambas direcciones. Es un valor que se va modificando hasta el valor finalmente considerado que garantiza la estabilidad de la estructura frente a las acciones externas, como se recoge en la sección 04.2.2.2.

- En referencia al modo en que debe orientarse la membrana, se recomienda en [Koch and Habermann, 2004] hacer coincidir las direcciones de la urdimbre (warp) y de la trama (weft) del tejido con las direcciones de las principales curvaturas de la superficie.

En el caso de un hiperboloide de 4 puntos, esto supone orientar una de las direcciones de ortotropía según la dirección de la curvatura principal cóncava, que se alinea con la línea imaginaria que une los puntos altos; y orientar la otra dirección de ortotropía según la dirección de la curvatura principal convexa, que se alinea con la línea que une los puntos bajos.

Con esto se consigue optimizar la rigidez de la estructura, disminuir los valores de pretensado iniciales que se deben disponer, y reducir los desplazamientos de la membrana bajo la acción de las cargas externas.

- En cuanto a los valores de tensiones en los cables producidas por el pretensado, en [Forster and Mollaert, 2004] se recomienda que sea superior a los 100 MPa. Esto supone una fuerza de pretensado en torno al 6 % de la carga de rotura de los cables. En cuanto a los valores máximos de pretensados en los cables, no se ha observado en ningún texto ninguna indicación al respecto. Se controla que en la geometría inicial las tensiones de equilibrio no sean superiores al 40 % de la tensión del límite elástico, al fin de disponer un margen suficiente hasta esta tensión límite para el aumento de tensiones que las acciones externas producirían.
- Evaluación pérdidas de fluencia y relajación: la Guía recomienda considerar estos efectos y asegurar que se mantendrá un nivel de pretensado suficiente. En este análisis se asume la hipótesis de que las propiedades del material consideradas son las que adquiriría la membrana tras varios ciclos de carga en los que se consigue modificar la rigidez del material y se alcanza un comportamiento más lineal. En un caso real este comportamiento del material sería indicado por el fabricante, hecho que no es posible en el presente trabajo.

- La forma de la membrana a partir de la cual se inicia el análisis es poco relevante en la geometría de equilibrio que se obtiene. La geometría final de la membrana depende principalmente de las condiciones de contorno del problema: bordes de la membrana, ratio entre las tensiones warp/weft, y ratio entre pretensado de la membrana y de los cables. [Koch and Habermann, 2004]
Por ello se presta atención especialmente a los cables de borde de la membrana, para que se dispongan desde el inicio del cálculo en posiciones cuyo resultado del proceso de búsqueda de forma sea el más cercano posible al esperado.
- El valor del pretensado no influye en la geometría pero sí influye de forma directa en el comportamiento de la estructura, un mayor o menor pretensado proporcionará a la estructura una mayor o menor rigidez.

04.2.2.2. Variables de entrada

En el presente apartado se detallan las variables que se introducen en el software como condiciones de contorno en el proceso de búsqueda de forma, y cuyos valores influyen de forma principal en la geometría de equilibrio. Son las variables que se modifican en el caso que el comportamiento de la geometría obtenida bajo la aplicación de las cargas no sea apto. Estas variables son:

- Tipo de barra: como cable o como pieza traccionada. La diferencia entre ambos tipos de barra es que los cables son los elementos en los cuales es necesario definir un cierto número de condiciones o restricciones para que el modelo no sea inestable, mientras que en las piezas traccionadas no es posible introducir condición de contorno alguna y el modelo utiliza la fuerza en el elemento como una incógnita del problema.
- Tipos de condiciones de contorno en cables: longitud prevista (en m), longitud relativa prevista (en % respecto de la longitud inicial del cable), flecha absoluta prevista (en m), flecha relativa prevista (en % respecto de la longitud inicial del cable), esfuerzo medio del cable (en kN) o densidad de fuerza (en kN/m).
- Pretensado de la membrana y orientación de las direcciones principales del tejido: tras haber evaluado la influencia de las dos posibles orientaciones de la membrana (urdimbre orientada con la curvatura convexa o según la curvatura cóncava) y de diversos ratios de los valores de pretensado de urdimbre y trama, se adopta una orientación de la dirección de la urdimbre (eje X local de los módulos) según la línea que une los puntos altos y un pretensado de 6,20 kN/m en esta dirección, y una orientación de la dirección de la trama (eje Y local de los módulos) según la línea que une los mástiles bajos con un pretensado de 6,20 kN/m.

Se consideran como tipo cable únicamente los cables de relingas, el programa no permite la posibilidad de considerar como piezas traccionadas los cables de borde de las membranas debido a incompatibilidades de estos elementos, y se consideran como piezas traccionadas los contravientos. Tras analizar diversos valores de las condiciones de contorno, en los cables $r/\text{int}/2$ a $r/\text{int}/6$ se considera una flecha relativa prevista del 0%, y en los cables del perímetro una flecha relativa prevista del 6,40%. Cuanto mayor es la flecha relativa

prevista, mejor trabaja la tensoestructura y facilita en mayor medida las operaciones de montaje. Cuanto menor es la flecha relativa, más ineficientes son los cables y la aplicación de cualquier fuerza en los extremos con el fin de tensar la membrana es absorbida en mayor medida por los cables y no se trasladan los efectos a la membrana.

A estas condiciones de contorno se añade además la condición de pretensado de la membrana.

Las condiciones de contorno establecidas en cada uno de los cables que conducen a la obtención de la geometría de equilibrio definitiva, son las mostradas en la Tabla I.4.4. En la membrana se considera una fuerza de pretensado inicial de 6, 20 kN/m a lo largo de la dirección de la trama y de 6, 20 kN/m a lo largo de la dirección de la urdimbre.

Cable	Condición
ba/s/1-a	Pieza traccionada [-]
ba/s/1-b	Pieza traccionada [-]
al/s/1-a	Pieza traccionada [-]
al/s/1-b	Pieza traccionada [-]
ba/s/2-a	Pieza traccionada [-]
ba/s/2-b	Pieza traccionada [-]
al/s/2-a	Pieza traccionada [-]
al/s/2-b	Pieza traccionada [-]
ba/s/3-a	Pieza traccionada [-]
ba/s/3-b	Pieza traccionada [-]
al/s/3-a	Pieza traccionada [-]
al/s/3-b	Pieza traccionada [-]
ba/s/4-b	Pieza traccionada [-]
ba/s/4-a	Pieza traccionada [-]
al/n/1-a	Pieza traccionada [-]
al/n/1-b	Pieza traccionada [-]
ba/n/1-a	Pieza traccionada [-]
ba/n/1-b	Pieza traccionada [-]
al/n/2-a	Pieza traccionada [-]
al/n/2-b	Pieza traccionada [-]
ba/n/2-a	Pieza traccionada [-]
ba/n/2-b	Pieza traccionada [-]
al/n/3-a	Pieza traccionada [-]
al/n/3-b	Pieza traccionada [-]
ba/n/3-a	Pieza traccionada [-]
ba/n/3-b	Pieza traccionada [-]
al/n/4-b	Pieza traccionada [-]
al/n/4-a	Pieza traccionada [-]

r/mod1/s	Flecha relativa	6,4 %
r/mod1/n	Flecha relativa	6,4 %
r/mod2/s	Flecha relativa	6,4 %
r/mod2/n	Flecha relativa	6,4 %
r/mod3/s	Flecha relativa	6,4 %
r/mod3/n	Flecha relativa	6,4 %
r/mod4/s	Flecha relativa	6,4 %
r/mod4/n	Flecha relativa	6,4 %
r/mod5/s	Flecha relativa	6,4 %
r/mod5/n	Flecha relativa	6,4 %
r/mod6/s	Flecha relativa	6,4 %
r/mod6/n	Flecha relativa	6,4 %
r/int/1	Flecha relativa	6,4 %
r/int/2	Flecha relativa	0 %
r/int/3	Flecha relativa	0 %
r/int/4	Flecha relativa	0 %
r/int/5	Flecha relativa	0 %
r/int/6	Flecha relativa	0 %
r/int/7	Flecha relativa	6,4 %

Tabla I.4.4: Condiciones iniciales en cables para búsqueda de forma. Elaboración: Propia.

04.2.2.3. Variables de control

Tras realizar la búsqueda de la forma, se observan una serie de variables del resultado con el fin de decidir si la geometría de equilibrio y condiciones tensionales iniciales de la estructura obtenidas se aceptan como válidas y se toman como punto de partida del análisis estructural o en cambio deben modificarse algunos de los valores de las variables de entrada y hacer una búsqueda de forma de nuevo, antes de pasar al análisis estructural. Estas variables que se observan son:

- Distribución del pretensado en la membrana. Se acepta como válido el resultado si la membrana adopta el valor deseado en la totalidad de su superficie y no se producen concentraciones puntuales de valores distantes del deseado.
- Pendiente de la membrana. Se acepta como válido el resultado si la forma obtenida no presenta zonas extensas donde la pendiente sea demasiado baja o plana, en las que sea evidente a simple vista que la aplicación posterior de la carga produciría la inversión de la curvatura, con los problemas que ello conlleva durante la vida útil de la estructura de acumulación de suciedad y agua.
- Desplomes de las barras. Se acepta como válido el resultado si los desplazamientos de las cabezas de los mástiles no son excesivos y se obtiene unas posiciones de los

mástiles cercanas a las iniciales, que mantienen la regularidad de la estructura.

- Valores de tensión en los cables. Se acepta como válido el resultado si los axiles en los cables se encuentran dentro del rango definido del 6-25 % de la carga de rotura. En los cables (contravientos) cuyo criterio de búsqueda de forma es la fuerza de tesado la variación respecto del valor definido como entrada es de unos pocos kN con lo cual no suponen un problema, se presta mayor atención a las relingas cuyo criterio de búsqueda de forma es la flecha relativa prevista y previamente al análisis se conoce con menor exactitud los valores de tensiones que se producirían.

Que la geometría obtenida en este cálculo valide estas 4 observaciones no significa en ningún caso que sea esta la geometría final de la estructura. Solo significa que a priori puede ser apta como solución y no es evidente que en el análisis estructural se obtendría el fallo de alguno de los elementos o el fallo global. En las etapas sucesivas del análisis se valida definitivamente la geometría y se redimensiona en caso de que no se obtenga un resultado positivo.

04.2.2.4. Método de cálculo

Para la obtención de la geometría de equilibrio, el software utiliza el método de la actualización de la configuración de referencia, Updated Reference Strategy (URS) [Bletzinger and Ramm, 1999]. Este método parte de una formulación alternativa del trabajo virtual de la membrana (fórmula 4.3) en la cuál se utilizan las 2^{as} tensiones de Piola-Kirchhoff \mathbf{S} (fuerzas en la configuración inicial por unidad de superficie en la configuración inicial) en lugar de las tensiones de Cauchy $\boldsymbol{\sigma}$, y donde \mathbf{F} corresponde con el gradiente de deformación.

$$\delta w_\lambda = \lambda t \int_A \det \mathbf{F} (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{F}^{-T}) : \delta \mathbf{F} dA + (1 - \lambda) t \int_A (\mathbf{F} \cdot \mathbf{S}) : \delta \mathbf{F} dA = 0 \quad (4.3)$$

Se utiliza una solución con un determinado valor del factor de continuidad λ como configuración de referencia para la siguiente aproximación. La configuración de referencia se adapta iterativamente hacia la solución estable óptima hasta que se alcanzan en la superficie los valores de pretensado indicados y la diferencia entre soluciones consecutivas es suficiente baja, y con ello se acepta que la aproximación ha terminado. Es un procedimiento robusto que converge con mucha rapidez.

04.2.3. Análisis estructural

Al finalizar el proceso de búsqueda de forma que da como resultado la geometría de equilibrio con el pretensado inicial, se realiza el análisis estructural que toma como dato de partida esta geometría, utilizando el mismo modelo en ambas fases. Se analizan los efectos que la aplicación de las distintas cargas y combinaciones de ellas producen en el comportamiento de la estructura.

04.2.3.1. Bases de cálculo

La normativa seguida en el cálculo, las acciones y combinaciones de ellas consideradas, y los materiales dispuestos, son los detallados en el ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO.

04.2.3.2. Método de análisis

El cálculo realizado para obtener los efectos que las cargas externas producen en la estructura es un análisis de tercer orden o análisis en grandes deformaciones.

Al tratarse de un análisis no lineal, se considera una aplicación gradual de las cargas, se define que la aplicación de las cargas se produzca en 10 incrementos. Siguiendo el método de Newton-Raphson, en cada una de las fracciones de carga se realizan diversas iteraciones hasta llegar a la configuración de equilibrio del incremento, se recalcula la matriz de rigidez global tras cada una de estas iteraciones.

Este tipo de análisis es el escogido por defecto en el software de cálculo para este tipo de estructuras, de manera que no permite la aplicación de los otros dos métodos disponibles (análisis geoméricamente lineal y análisis de segundo orden P- Δ) para el resto de tipos de estructuras.

Se debe al marcado comportamiento no lineal de la estructura, que presenta no linealidad geométrica y no linealidad de las cargas.

La no linealidad geométrica de la estructura, se debe a que los valores de los desplazamientos son muy grandes. Estos cambios de la geometría de la membrana también provocan cambios en la rigidez de la estructura y los resultados dejan de ser proporcionales a las acciones.

Y la no linealidad de las cargas, ya que acciones como la nieve o el viento dependen de la forma de la superficie. Cuando cambia la geometría, también cambian las magnitudes de las cargas, las direcciones o la forma de la superficie sobre las que se aplican. En las cargas definidas según los ejes locales de la membrana, como en el caso del viento, el software modifica la dirección de las cargas con la modificación de los ejes locales en la configuración deformada; en las cargas definidas según los ejes globales, como en el caso de la nieve, el software mantiene la dirección de la carga y modifica el área de aplicación en función del área de la superficie en la configuración deformada, aunque en este caso la variación de la geometría no es significativa.

El software no tiene en cuenta el cambio de los coeficientes c_p de la acción viento que se producirían con el cambio de la geometría de la membrana entre las distintas configuraciones de equilibrio intermedias.

El comportamiento de la estructura también presentaría una no linealidad mecánica o constitutiva. Por una parte, el acero, tanto el utilizado en los tubos como el utilizado en los cables, es un material no lineal. Se asume la hipótesis de un comportamiento elástico lineal perfectamente plástico y se proyecta la estructura para que las tensiones de los elementos no alcancen el límite elástico. Por otra parte, en el caso del PES recubierto de PVC también se tiene una no linealidad mecánica más acusada ya que, además de ser un material elastoplástico, la rigidez de este material varía significativamente con la historia de cargas. Para conocer realmente el comportamiento del material deberían hacerse ensayos

para los que no se tienen medios, y ante la falta de resultados del fabricante que permitan conocer mejor el comportamiento constitutivo, se asume que en el rango de esfuerzos internos que se obtienen en la membrana, el comportamiento es lineal con los parámetros mecánicos correspondientes a un enésimo ciclo de carga en el cual se considera que ya no varían estas propiedades.

Se analiza en un primer lugar la estructura bajo la acción de la carga de nieve, al considerarse menos desfavorable debido a su magnitud y su distribución sobre la membrana (aplicada de forma regular sobre toda la superficie, sin variaciones de los valores de carga entre zonas ni asimetrías). Y si la geometría analizada resiste esta carga, se introduce la carga de viento, que se considera más desfavorable.

04.2.3.3. Variables de control

Las variables que se controlan en esta etapa del proceso son aquellas que se utilizan posteriormente en las verificaciones de la estructura; estas variables son:

- Esfuerzos internos de la membrana. Se presta atención a los esfuerzos internos de la membrana según las direcciones de ortotropía del material en cada una de las combinaciones de carga establecidas para la verificación de este elemento, y a los esfuerzos internos principales. Los primeros se observan con el fin de verificar que no superen ciertos umbrales máximos, ni se produzca una pérdida de tensión; los segundos se observan con el fin de confirmar que las direcciones principales de esfuerzos se alinean con los ejes locales (direcciones de ortotropía) y optimizar así las propiedades de la membrana.
- Esfuerzos en elementos lineales. Se presta atención a los valores de axiles en los cables en cada una de las combinaciones de cargas con el fin de controlar que no excedan la carga máxima de diseño ni se produzca la pérdida de tensión.
En los tubos se recogen además los esfuerzos cortantes y momentos flectores, a pesar de no tener estos esfuerzos unos valores significantes que puedan condicionar el diseño. Se verifica que en ninguna de las combinaciones se llegue a producir la plastificación de los tubos ni el pandeo.
- Desplazamientos y deformaciones de la superficie. Se presta atención a estos resultados con el fin de controlar que no se produzcan zonas de elevados desplazamientos en las que la geometría deformada de la membrana tenga una pendiente demasiado plana, ni tampoco zonas de deformaciones excesivas.
- Reacciones en apoyos. Se recogen estos resultados con el fin de tener una primera aproximación para el diseño de las cimentaciones, descartando las geometrías en que estas reacciones se consideren excesivas.
- Flechas de los cables internos. Con estos resultados se obtienen las posiciones finales de los cables a fin de comprobar que estos elementos no lleguen a estar en contacto con el perímetro de la estructura existente.

04.2.4. Verificaciones

El último paso a realizar en el análisis global de la estructura son las verificaciones de los diferentes elementos estructurales para poder tomar como válida la geometría calculada, u optimizarla. Las verificaciones a realizar según las distintas normativa aplicadas son:

- Comprobación de plastificación en barras comprimidas: debe cumplirse en los mástiles que $\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$. Se utiliza la fórmula (6.9) del Eurocódigo 3 Parte 3-1, considerando el $N_{c,Rd}$ de la fórmula (6.10): $N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}$. Los esfuerzos de diseño considerados son los obtenidos bajo la combinación de cargas de Estado Límite Último.
- Comprobación de resistencia a pandeo en elementos uniformes en compresión: debe cumplirse en los mástiles que $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$. Se utiliza la fórmula (6.46) del Eurocódigo 3 Parte 3-1, considerando el $N_{b,Rd}$ de la fórmula (6.47): $N_{b,Rd} = \frac{\chi Af_y}{\gamma_{M1}}$. El coeficiente χ de reducción para el pandeo se calcula como

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$$

Al tratarse de tubos circulares conformados en caliente se toma la curva de pandeo a , por lo que el coeficiente de imperfección α es igual a 0,21. Se trata de una sección de clase 1, por lo que la esbeltez normalizada se calcula con la fórmula

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}$$

Los esfuerzos de diseño considerados son los obtenidos bajo la combinación de cargas de Estado Límite Último.

- Comprobación de desplomes horizontales: se realiza esta verificación únicamente a modo orientativo, sin ser una restricción para el dimensionamiento al no haber una normativa expresa para este tipo de estructuras. Se toma como referencia el límite de flechas horizontales en edificios de 1/500 la altura total del edificio, altura total de los mástiles en este caso.
- Comprobación resistencia a tracción en cables: debe cumplirse en todos los cables que $\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1$. Se utiliza la fórmula (6.1) del Eurocódigo 3 Parte 3-11, considerando la F_{Rd} de la fórmula (6.2): $F_{Rd} = \min \left\{ \frac{F_{uk}}{1,5\gamma_R}; \frac{F_k}{\gamma_R} \right\}$. Los esfuerzos de diseño considerados son los obtenidos bajo la combinación de cargas de Estado Límite Último.
- Comprobación de limitación tensional en cables: debe cumplirse en todos los cables que $\sigma_{Ed} \leq 0,45\sigma_{uk}$. Se utiliza la fórmula recogida en la Tabla 7.2 del Eurocódigo 3 Parte 3-11, considerando la σ_{uk} de la fórmula (7.1): $\sigma_{uk} = \frac{F_{uk}}{A_m}$. Las tensiones consideradas son las obtenidas bajo la combinación de cargas característica o poco probable.
- Comprobación tensional de la membrana: se verifica este requisito según el planteamiento descrito en la Norma UNE-EN 13782 y según el descrito en la Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas. Ambos textos difieren entre

sí en las combinaciones de acciones y los coeficientes de seguridad a considerar. Se comprueba el valor de tensión máxima producida, para asegurar que no se produciría la rotura del tejido; y se comprueba el valor de tensión mínima con los valores de característicos de las acciones para asegurar que no se produce la pérdida de la tensión en ninguna de las direcciones principales del tejido, lo que podría dar lugar a inestabilidades de formaciones de arrugas, “wrinkling”. Para esta comprobación de tensión mínima se utilizan las cargas con sus valores característicos debido a que los efectos de esta inestabilidad son únicamente estéticos y no estructurales, pues la estructura mantiene su estabilidad aún con la pérdida de tensión de alguna zona de la superficie.

- Según las indicaciones presentes en la Norma UNE-EN 13782: se consideran las combinaciones de acciones con unos coeficientes parciales $\gamma_G = 1,35$, $\gamma_{Q,1} = 1,50$ y $\gamma_{Q,i} = 1,35$; se comparan los esfuerzos internos obtenidos bajo estas combinaciones de acciones con la resistencia a tracción proporcionada con el fabricante disminuida según un coeficiente de seguridad parcial $\gamma_M = 2,50$. Se tienen unos valores de resistencia de cálculo en este caso de 64 kN/m en la dirección de la urdimbre y de 56 kN/m en la dirección de la trama.
 - Según las indicaciones presentes en la Guía: se consideran los valores característicos de las cargas y los esfuerzos internos obtenidos se comparan con la resistencia a tracción proporcionada por el fabricante disminuida según un coeficiente de seguridad global $\gamma = 6$. Se tienen unos valores de resistencia de cálculo en este caso de 26,66 kN/m en la dirección de la urdimbre y de 23,33 kN/m en la dirección de la trama.
- Comprobación de geometría de la membrana: se analiza la geometría deformada de la membrana para detectar que no se produzca una inversión de la curvatura. En este caso no se trata de una comprobación numérica como el resto, sino que se realiza visualizando las líneas de nivel de la superficie en la geometría deformada. Debe cumplirse que las curvas de nivel no sean cerradas, sino que sean concéntricas en torno a cada uno de los mástiles e intersecten los bordes de la membrana a cada uno de los lados del mástil.

En los casos en que se produce el incumplimiento de alguna de estas verificaciones, se procede a redimensionar la estructura, modificando las posiciones de los nudos de la misma o las variables de entrada del proceso de búsqueda de forma.

04.2.4.1. Procedimiento de análisis

Las verificaciones correspondientes a los mástiles son realizadas por los módulos RF-STEEL EC3 que incorpora el software, que calcula las barras de acero según el Eurocódigo 3, y RF-KAPPA que realiza las comprobaciones de pandeo. En estas verificaciones no se realiza ningún tipo de cálculo por parte del usuario, únicamente se controla que los esfuerzos últimos proporcionados sean calculados según lo descrito en el EC3, y el cumplimiento de estos.

Las verificaciones correspondientes a los cables no se permite que sean realizadas en el propio software ya que el procedimiento anterior solo es posible para elementos de acero

estructural, aunque no deja de ser un procedimiento igualmente sencillo. Se exportan las tablas de resultados correspondientes a los esfuerzos internos de los cables, se calculan los esfuerzos últimos de cada uno de los cables y se verifica que no se superen en ningún cable, en ninguna de las combinaciones.

Las verificaciones de la membrana se realizan únicamente tomando el mayor esfuerzo y el menor esfuerzo producidos en cada una de las direcciones principales del tejido, se comprueba que no se superen los valores de rotura con el correspondiente coeficiente de seguridad y que no se produzca una pérdida de tensión.

Por consideraciones constructivas, el espesor de la membrana no es un parámetro que se fija tratando de disponer el mínimo posible en función de los valores de tensiones de cada zona de la membrana. Así pues, se fija el espesor de toda la membrana ($> 1.300 \text{ m}^2$) en función de las tensiones máximas alcanzadas en un número reducido de puntos de la misma que son los que condicionan el dimensionamiento.

El bajo rango de espesores comerciales y la ausencia de casos reales de este tipo de dimensionamiento en los textos consultados, hace que no se llegue a considerar este procedimiento como una posibilidad de “optimización” que en cambio sí se realiza comúnmente en la mayoría de elementos estructurales de otros sistemas.

04.3. Resultados

Tras haber realizado los procedimientos descritos en la metodología, se obtienen los resultados que se muestran en la presente sección.

04.3.1. Resultados de la búsqueda de forma

Se muestran en primer lugar los resultados del proceso de búsqueda de forma. En la Figura I.4.7a se muestra la geometría que se introduce en el software como solución inicial del cálculo; y en la Figura I.4.7b se muestra la geometría que se obtiene como resultado de este proceso. Esta primera geometría no representa ninguna situación real de la estructura, únicamente se trata de la geometría que se toma como inicio del proceso URS, que junto con las condiciones de contorno de los cables (esfuerzos y curvaturas) y de la membrana produce la geometría de equilibrio.

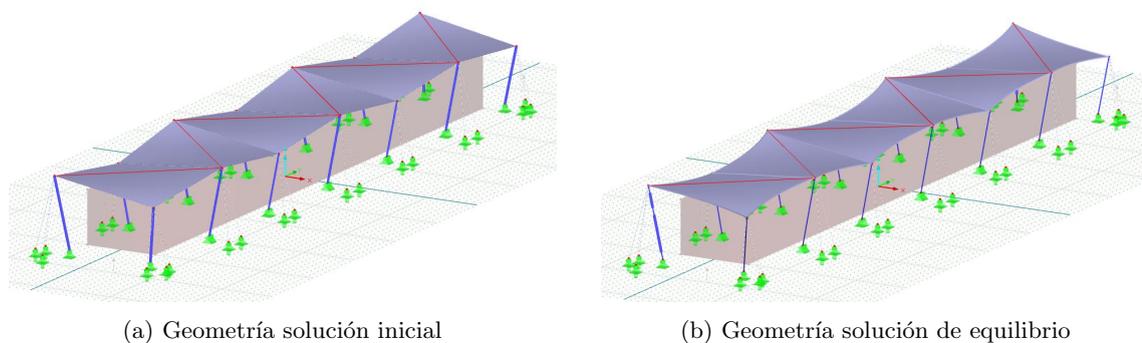


Figura I.4.7: Geometrías inicial y final del proceso de búsqueda de forma. Elaboración: Propia.

El hecho de disponer como geometría de inicio una superficie anticlástica como es el sector de paraboloides de bordes rectos, hace que la forma obtenida como solución de este proceso sea muy próxima a la forma inicial. Aunque se disponga una geometría de la superficie inicial diferente pero con las mismas condiciones de contorno, el resultado de la forma final habría sido idéntica.

Los elementos cuya posición en la configuración de equilibrio dista más de la situación inicial son las relingas del perímetro, donde se aprecia claramente la curvatura que adquieren hasta lograr la flecha relativa introducida como condición de contorno. Esta curvatura que adquieren los cables es más eficiente que si fueran rectos, a mayor curvatura en los cables de bordes se hace necesaria una menor tensión para transmitir las tensiones a la membrana y alcanzar la forma de equilibrio.

Se muestran también los esfuerzos internos que se producen en la membrana en esta geometría de equilibrio previa a la acción de las cargas. Se observa en la Figura I.4.8a como en la dirección de la urdimbre (curvatura cóncava) los esfuerzos de la superficie n_x toman valores de 6,20 kN/m en toda la superficie; en la Figura I.4.8b se observa el mismo hecho para la dirección de la trama (curvatura convexa) y los esfuerzos n_y .

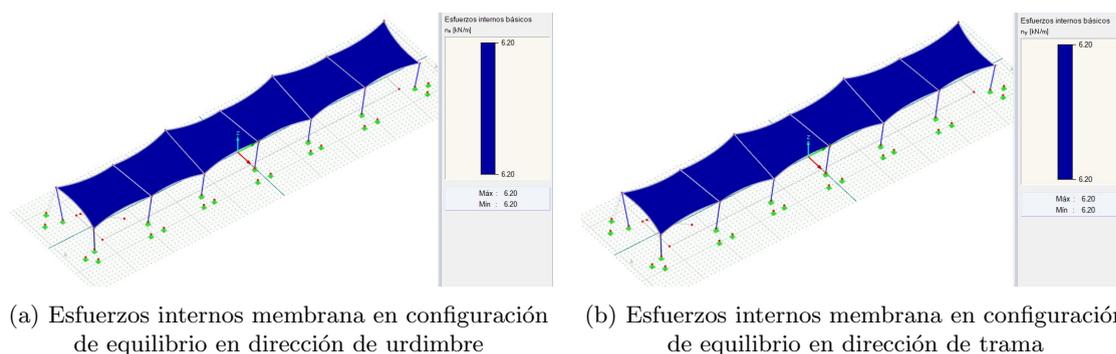


Figura I.4.8: Estado tensional membrana en configuración de equilibrio. Elaboración: Propia.

En la membrana, se presta atención a la geometría de los módulos además de a su estado tensional. En la Tabla I.4.5 se muestran las dimensiones de cada uno de los módulos en la geometría de equilibrio: área de material textil y masa.

Estos valores corresponden con la geometría ideal de la estructura. En la materialización de la estructura, el área de material y consecuentemente el peso, serían mayores con el fin de disponer superficies adicionales para realizar los detalles constructivos que permiten unir entre sí los módulos, y los módulos a los cables.

Módulo	Área [m ²]	Masa [kg]
Módulo 1	182,632	241,80
Módulo 2	186,503	249,92
Módulo 3	186,216	246,54
Módulo 4	186,216	246,54
Módulo 5	186,503	249,92
Módulo 6	182,632	241,80
Total:	1.110,702	1.488,52

Tabla I.4.5: Áreas y masas de material textil. Elaboración: Propia.

Otro de los resultados relevantes del análisis es la posición final de los mástiles. Para la definición de estos elementos en la geometría inicial se introduce dos tipos de variables de entrada. Las cotas de los extremos de las barras, y el desplome de estos elementos. Las direcciones en la que se consideran estos desplomes son: dirección horizontal y perpendicular a la alineación mayor del perímetro, para los mástiles internos (AL/S/1 a AL/S/3, BA/S/2 a BA/S/3, AL/N/2 a AL/N/3 y BA/N/1 a BA/N/3); y en ambas direcciones horizontales (según X e Y) para los mástiles de las esquinas (BA/S/1, BA/S/4, AL/N/1 y AL/N/4).

Inicialmente se asumen unos valores de 9,5 m como cota de los mástiles altos y 7,4 m en los mástiles bajos de la alineación norte; 8,8 m como cota de los mástiles altos y 7,2 m en los mástiles bajos de la alineación sur; y un desplome del 16%. Por lo que la diferencia entre los nudos de inicio y final de los mástiles, según los ejes globales del modelo son los mostrados en la Tabla I.4.12.

Mástil	ΔX_i [m]	ΔY_i [m]	ΔZ_i [m]
Alto interno lado norte	-1,52	0	9,5
Bajo interno lado norte	-1,184	0	7,4
Alto interno lado sur	1,408	0	8,8
Bajo interno lado sur	1,152	0	7,2
Altos esquina (lado norte)	-1,075	$\pm 1,075$	9,5
Bajos esquina (lado sur)	0,815	$\pm 0,815$	7,2

Tabla I.4.6: Posiciones de cabezas de mástiles en geometría inicial de búsqueda forma. Elaboración: Propia.

Como resultado de la búsqueda de forma, se modifican las posiciones de los nudos libres de los mástiles hasta alcanzar la posición de equilibrio. En la Tabla I.4.7 se muestran los desplazamientos de cada uno de los nodos entre las configuraciones inicial y final (d_X , d_Y , d_Z), las distancias entre los extremos de cada mástil y su base en la geometría final (ΔX , ΔY , ΔZ), y la longitud de cada mástil en la geometría final ($L = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$).

Mástil	Sección	d_x [mm]	d_y [mm]	d_z [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔZ [mm]	L [m]
BA/S/1	244,5x8	-50,8	59,5	9,6	763,8	-755,1	7.209,6	7,289
AL/S/1	273x10	-60,3	-2,7	6,9	1.347,7	-2,7	8.806,9	8,909
BA/S/2	219,1x6,3	-53,2	-0,2	5,6	1.098,8	-0,2	7.205,6	7,289
AL/S/2	273x10	-76,9	0	9,9	1.331,1	0	8.809,9	8,91
BA/S/3	219,1x6,3	-53,2	0,2	5,6	1.098,8	0,2	7.205,6	7,289
AL/S/3	273x10	-60,3	2,7	6,9	1.347,7	2,7	8.806,9	8,909
BA/S/4	244,5x8	-50,8	-59,5	9,6	763,8	755,1	7.209,6	7,289
AL/N/1	323,9x10	61,6	76	13,1	-1.013,2	-998,8	9.513,1	9,619
BA/N/1	244,5x6,3	54,3	-4,5	5,5	-1.129,7	-4,5	7.405,5	7,491
AL/N/2	273x12,5	63,7	-0,3	8	-1.456,3	-0,3	9.508	9,619
BA/N/2	244,5x6,3	67,3	0	8,1	-1.116,7	0	7.408,1	7,492
AL/N/3	273x12,5	63,7	0,3	8	-1.456,3	0,3	9.508	9,619
BA/N/3	244,5x6,3	54,3	4,5	5,5	-1.129,7	4,5	7.405,5	7,491
AL/N/4	323,9x10	61,6	-76	13,1	-1.013,2	998,8	9.513,1	9,619

Tabla I.4.7: Comparación de posiciones de nodos mástiles entre el proceso búsqueda de forma. Elaboración: Propia.

A partir de las longitudes de cada uno de los mástiles, se obtiene la longitud de cada sección de barra necesaria y el peso total de acero estructural necesario. Se muestra en la Tabla I.4.8.

Sección	l_{tot} [m]	Masa lineal [kg/m]	Masa sección [kg]
219,1x6,3	14,578	33,06	481,93
244,5x6,3	22,474	37,00	831,64
244,5x8	14,578	46,65	680,13
273x10	26,728	64,85	1.733,38
273x12,5	19,238	80,30	1.544,72
323,9x10	19,238	77,40	1.489,10
Total:			6.760,89

Tabla I.4.8: Longitudes y masas totales según sección de mástil. Elaboración: Propia.

En los cables, el resultado que supone interés para el diseño es la longitud de estos en la geometría de equilibrio. El software proporciona como resultado una geometría “tensionada” de la estructura en la que los cables tienen una determinada longitud (l_{tens}) y están sometidos a un determinado esfuerzo de tracción (F) que asegura este equilibrio. Para la fabricación de los cables es conveniente conocer la longitud que deben tener sin estar sometidos a ninguna tensión. Esta longitud (l_{des}) viene también proporcionada por el propio software, que la calcula utilizando la ley de Hooke, con lo que ambas longitudes

se relacionan según la fórmula 4.4. En la Tabla I.4.9 se muestran los valores de ambas longitudes para cada uno de los cables de la estructura, así como el esfuerzo de tracción al que debe estar sometido cada cable para lograr la geometría de equilibrio.

$$l_{des} = l_{tens} \cdot \left(1 - \frac{F}{E \cdot A}\right) \quad (4.4)$$

Cable	Tipo	l_{des} [m]	l_{tens} [m]	F [kN]
ba/s/1-a	FLC36	7,529	7,556	402,84
ba/s/1-b	FLC32	7,529	7,556	406,39
al/s/1-a	FLC32	9,202	9,223	252,51
al/s/1-b	FLC32	9,202	9,222	242,98
ba/s/2-a	FLC28	7,529	7,546	198,89
ba/s/2-b	FLC28	7,529	7,546	199,8
al/s/2-a	FLC24	9,202	9,229	185,13
al/s/2-b	FLC24	9,202	9,229	185,13
ba/s/3-a	FLC28	7,529	7,546	199,8
ba/s/3-b	FLC28	7,529	7,546	198,89
al/s/3-a	FLC32	9,202	9,222	242,98
al/s/3-b	FLC32	9,202	9,223	252,51
ba/s/4-b	FLC32	7,529	7,556	406,39
ba/s/4-a	FLC36	7,529	7,556	402,84
al/n/1-a	FLC36	9,934	9,969	397,46
al/n/1-b	FLC32	9,934	9,969	390,37
ba/n/1-a	FLC28	7,738	7,756	255,64
ba/n/1-b	FLC28	7,738	7,756	256,64
al/n/2-a	FLC24	9,934	9,956	190,93
al/n/2-b	FLC24	9,934	9,956	191,93
ba/n/2-a	FLC24	7,738	7,761	188,81
ba/n/2-b	FLC24	7,738	7,761	188,81
al/n/3-a	FLC24	9,934	9,956	191,93
al/n/3-b	FLC24	9,934	9,956	190,93
ba/n/3-a	FLC28	7,738	7,756	256,64
ba/n/3-b	FLC28	7,738	7,756	255,64
al/n/4-b	FLC32	9,934	9,969	390,37
al/n/4-a	FLC36	9,934	9,969	397,46
r/mod1/s	OSS24	15,366	15,415	186,49
r/mod1/n	OSS24	15,658	15,709	189,85
r/mod2/s	OSS24	14,606	14,651	178,07
r/mod2/n	OSS24	14,674	14,719	178,82

Cable	Tipo	l_{des} [m]	l_{tens} [m]	F [kN]
r/mod3/s	OSS24	14,604	14,649	177,93
r/mod3/n	OSS24	14,67	14,715	178,64
r/mod4/s	OSS24	14,604	14,649	177,93
r/mod4/n	OSS24	14,67	14,715	178,64
r/mod5/s	OSS24	14,606	14,651	178,07
r/mod5/n	OSS24	14,674	14,719	178,82
r/mod6/s	OSS24	15,366	15,415	186,49
r/mod6/n	OSS24	15,658	15,709	189,85
r/int/1	OSS24	13,687	13,726	165,55
r/int/2	OSS20	14,116	14,148	92,82
r/int/3	OSS20	14,323	14,344	58,8
r/int/4	OSS20	14,103	14,121	51,63
r/int/5	OSS20	14,323	14,344	58,8
r/int/6	OSS20	14,116	14,148	92,82
r/int/7	OSS24	13,687	13,726	165,55

Tabla I.4.9: Estado de cables en geometría de equilibrio. Elaboración: Propia.

A partir de las longitudes destensadas de cada uno de los cables, se obtiene la longitud de cada tipo de cable necesaria y el peso total de acero de cables necesario. Se muestra en la Tabla I.4.10.

Tipo	l_{tot} [m]	Masa lineal [kg/m]	Masa tipo [kg]
FLC36	34,926	7,2	251,467
FLC32	51,866	5,7	295,636
FLC28	80,936	4,3	348,025
FLC24	73,616	3,2	235,571
OSS24	206,53	2,9	598,937
OSS20	70,981	2	141,962
Total:			1.871,598

Tabla I.4.10: Longitudes y masas totales según tipo de cable. Elaboración: Propia.

En los cables se presta atención además al estado tensional de estos elementos en la configuración de equilibrio. En la Tabla I.4.11 se muestra a tensión de cada cable y la proporción de estas tensiones con las tensiones de rotura, 1.670 MPa en los cables FLC y 1.770 MPa en los OSS.

Cable	Tipo	A (mm²) [mm ²]	F_{FF} (kN) [kN]	σ_{FF} (MPa) [MPa]	σ_{FF}/σ_{uk} [-]
ba/s/1-a	FLC36	862	402,84	467,33	0,28
ba/s/1-b	FLC32	681	406,39	596,75	0,36
al/s/1-a	FLC32	681	252,51	370,79	0,22
al/s/1-b	FLC32	681	242,98	356,8	0,21
ba/s/2-a	FLC28	521	198,89	381,75	0,23
ba/s/2-b	FLC28	521	199,8	383,49	0,23
al/s/2-a	FLC24	383	185,13	483,37	0,29
al/s/2-b	FLC24	383	185,13	483,37	0,29
ba/s/3-a	FLC28	521	199,8	383,49	0,23
ba/s/3-b	FLC28	521	198,89	381,75	0,23
al/s/3-a	FLC32	681	242,98	356,8	0,21
al/s/3-b	FLC32	681	252,51	370,79	0,22
ba/s/4-b	FLC32	681	406,39	596,75	0,36
ba/s/4-a	FLC36	862	402,84	467,33	0,28
al/n/1-a	FLC36	862	397,46	461,09	0,28
al/n/1-b	FLC32	681	390,37	573,23	0,34
ba/n/1-a	FLC28	521	255,64	490,67	0,29
ba/n/1-b	FLC28	521	256,64	492,59	0,29
al/n/2-a	FLC24	383	190,93	498,51	0,3
al/n/2-b	FLC24	383	191,93	501,12	0,3
ba/n/2-a	FLC24	383	188,81	492,98	0,3
ba/n/2-b	FLC24	383	188,81	492,98	0,3
al/n/3-a	FLC24	383	191,93	501,12	0,3
al/n/3-b	FLC24	383	190,93	498,51	0,3
ba/n/3-a	FLC28	521	256,64	492,59	0,29
ba/n/3-b	FLC28	521	255,64	490,67	0,29
al/n/4-b	FLC32	681	390,37	573,23	0,34
al/n/4-a	FLC36	862	397,46	461,09	0,28
r/mod1/s	OSS24	353	186,49	528,3	0,32
r/mod1/n	OSS24	353	189,85	537,82	0,32
r/mod2/s	OSS24	353	178,07	504,45	0,3
r/mod2/n	OSS24	353	178,82	506,57	0,3
r/mod3/s	OSS24	353	177,93	504,05	0,3
r/mod3/n	OSS24	353	178,64	506,06	0,3
r/mod4/s	OSS24	353	177,93	504,05	0,3
r/mod4/n	OSS24	353	178,64	506,06	0,3
r/mod5/s	OSS24	353	178,07	504,45	0,3
r/mod5/n	OSS24	353	178,82	506,57	0,3

Cable	Tipo	A (mm ²) [mm ²]	F _{FF} (kN) [kN]	σ _{FF} (MPa) [MPa]	σ _{FF} /σ _{uk} [-]
r/mod6/s	OSS24	353	186,49	528,3	0,32
r/mod6/n	OSS24	353	189,85	537,82	0,32
r/int/1	OSS24	353	165,55	468,98	0,28
r/int/2	OSS20	245	92,82	378,86	0,23
r/int/3	OSS20	245	58,8	240	0,14
r/int/4	OSS20	245	51,63	210,73	0,13
r/int/5	OSS20	245	58,8	240	0,14
r/int/6	OSS20	245	92,82	378,86	0,23
r/int/7	OSS24	353	165,55	468,98	0,28

Tabla I.4.11: Tensiones de cables en geometría de equilibrio. Elaboración: Propia.

Los únicos elementos del modelo que no modifican su posición o estado entre la solución inicial definida y la solución de equilibrio obtenida son los nudos de apoyo de los mástiles y los nudos de anclaje de los cables de contravientos.

En primer lugar se definen las posiciones de los nudos de apoyo de los mástiles, referidas al sistema global de referencia. Se utilizan tres parámetros: L_y , que representa la distancia entre apoyos en la dirección Y ; $L_{x,N}$ que representa la distancia entre los apoyos de los mástiles de la alineación norte y el eje X del sistema global; y $L_{x,S}$ que representa la distancia entre los apoyos de los mástiles de la alineación sur y el eje X del sistema global. La disposición en planta de los apoyos de mástiles es la representada en la Figura I.4.9, en la solución planteada se adoptan unos valores de $L_{x,N} = 5,4$ m, $L_{x,S} = 6,2$ m y $L_y = 14,4$ m.

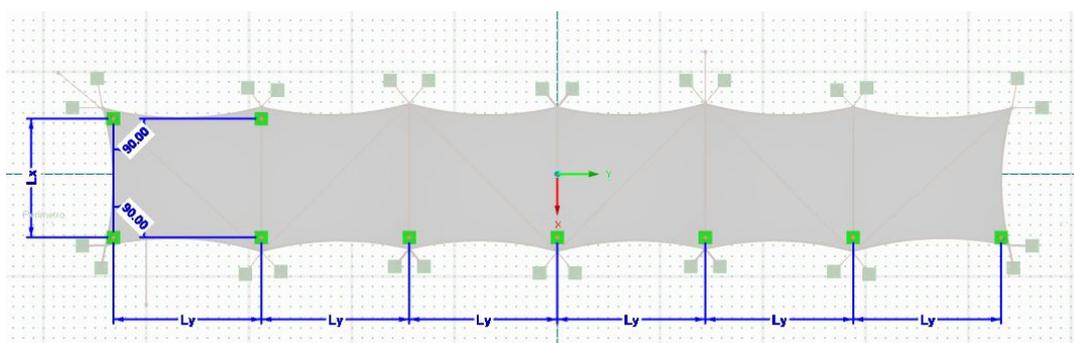


Figura I.4.9: Croquis planta apoyos mástiles. Elaboración: Propia.

A partir de la posición de los apoyos de los mástiles, se conocen las posiciones de los nudos del otro extremo de los mástiles y de los nudos de anclaje de los contravientos (según la geometría de la solución inicial).

En los nudos de los extremos de los mástiles, como se muestra previamente en la Tabla I.4.7, se produce una modificación de la posición hasta la geometría de equilibrio, aunque no es de una magnitud significativa. Como se menciona anteriormente la posición de estos nodos se define inicialmente según la cota Z_i y un desplome de los mástiles del 16 %.

Las posiciones de los anclajes de los cables de contravientos se definen a partir de la posición de los extremos de los mástiles en la configuración inicial, en función de dos parámetros: el ángulo B_i que forman los cables con la dirección vertical y el ángulo A_i que forma la proyección horizontal de los cables con el eje X del sistema global. En los mástiles interiores se disponen dos cables de forma simétrica ($+A_i$ y $-A_i$), en la Figura I.4.10 se muestra un esquema que relaciona los parámetros mencionados con las posiciones de los nodos. En la Tabla I.4.12 se recogen los valores de los parámetros considerados en cada tipo de mástil y las distancias x e y entre los apoyos de los mástiles y los apoyos de los cables. Estas distancias se relacionan con los parámetros según la fórmula 4.5.

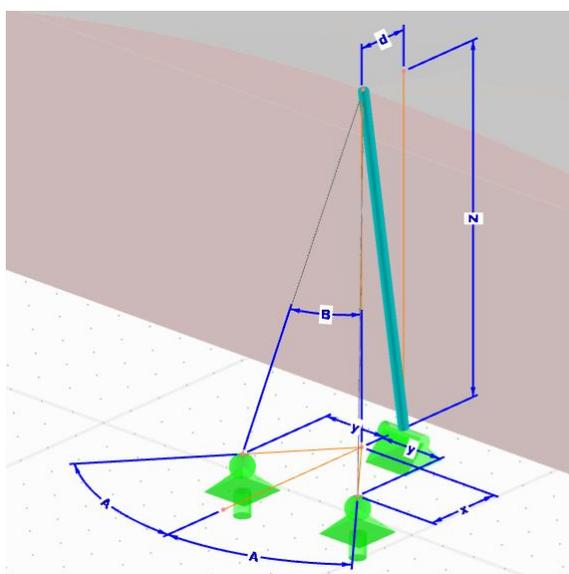


Figura I.4.10: Croquis dimensiones de puntos de anclaje de contravientos internos. Elaboración: Propia.

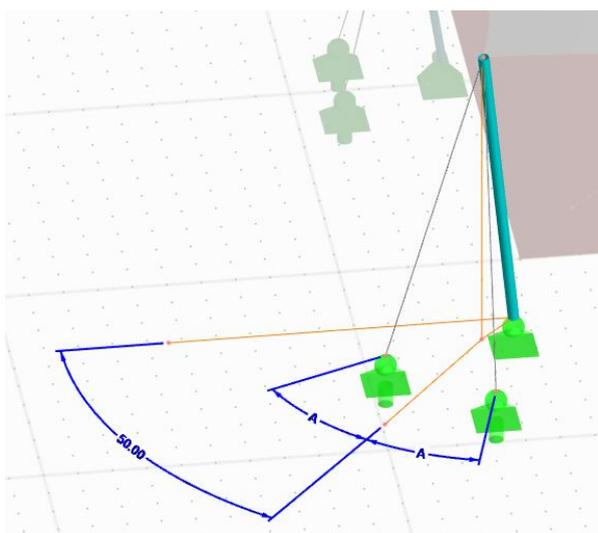
$$\begin{aligned} x &= Z_i \tan(B_i) \cos(A_i) + d, & d &= \text{desp} \cdot Z_i \\ y &= Z_i \tan(B_i) \sin(A_i) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Mástil	φ_i [deg]	α_i [deg]	Z_i [m]	x [m]	y [m]
Alto sur	17°	40°	8,8	3,469	1,729
Bajo sur	17°	40°	7,2	2,838	1,415
Alto norte	17°	40°	9,5	3,745	1,867
Bajo norte	17°	40°	7,4	2,917	1,454
Alto esquina-a	17°	40°	9,5	1,075	3,979
Alto esquina-b	17°	40°	9,5	3,935	1,579
Bajo esquina-a	17°	40°	7,2	0,815	3,016
Bajo esquina-b	17°	40°	7,2	2,982	1,197

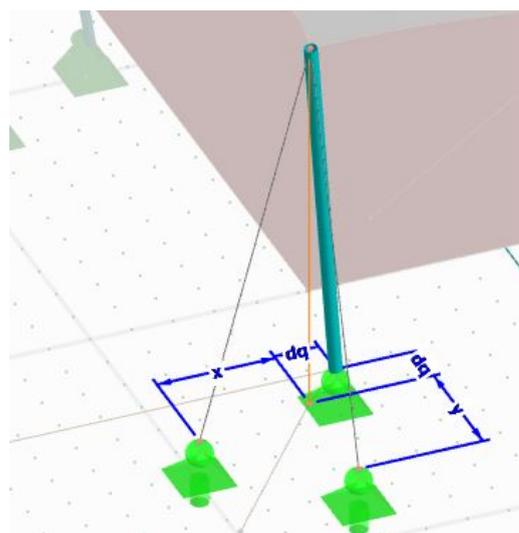
Tabla I.4.12: Posiciones de anclajes de contravientos respecto apoyo de mástil. Elaboración: Propia.

En los cables de esquina, se realiza una rotación de la posición de los anclajes de los contravientos de 50° hacia los extremos, con el objetivo de equilibrar las resultantes de tensiones de cables, relingas y membrana. Así pues, las distancias de los apoyos de los cables respecto de la proyección en el plano horizontal de la cabeza de los mástiles de esquina, medidas según unos ejes paralelos a los globales, se obtienen con las ecuaciones 4.6.

$$\begin{aligned} x_a &= Z_i \tan(\varphi_i) \cos(50 + \alpha_i) + d_q, & d_q &= desp \cdot Z_i \sqrt{2}/2 \\ y_a &= Z_i \tan(\varphi_i) \sin(50 + \alpha_i) + d_q \\ x_b &= Z_i \tan(\varphi_i) \cos(50 - \alpha_i) + d_q \\ y_b &= Z_i \tan(\varphi_i) \sin(50 - \alpha_i) + d_q \end{aligned} \quad (4.6)$$



(a) Croquis giro de apoyos de contravientos de esquina



(b) Croquis posiciones anclajes de contravientos de esquina

Figura I.4.11: Posiciones anclajes contravientos esquina respecto apoyo mástil. Elaboración: Propia.

04.3.2. Resultados del análisis estructural

Tras finalizar el proceso de búsqueda de forma que permite conocer la geometría de la estructura y el estado tensional inicial de los elementos, se realiza el análisis global de la estructura frente a las acciones cuyos resultados son los mostrados en la presente sección.

04.3.2.1. Resultados combinaciones de acciones Eurocódigo 0

Por una parte, se muestran los resultados obtenidos del cálculo de las combinaciones de acciones indicadas en el Eurocódigo 0, las descritas en la sección 02.5.1 del ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO. Estas combinaciones proporcionan resultados utilizados en la verificación de mástiles y cables, se utilizan también en el dimensionamiento de cimentaciones como se detalla posteriormente en la sección 04.5.

Se muestran en primer lugar los esfuerzos obtenidos en los mástiles, en la Tabla I.4.13. Se recoge en esta tabla, para cada mástil, la combinación ELU que produce un mayor axil de compresión N_{Ed} junto con los cortantes y momentos flectores que se producen en esa combinación. Los resultados en mástiles de todas las combinaciones ELU consideradas se muestran en el APÉNDICE 01 RESULTADOS EN MÁSTILES.

Mástil	Resultados ELU					
	Combinación	$N_{Max,Ed}$ [kN]	$V_{y,Ed}$ [kN]	$V_{z,Ed}$ [kN]	$M_{y,Ed}$ [mkN]	$M_{z,Ed}$ [mkN]
BA/S/1	ELU4	-764,99	-0,33	1,69	0	0
AL/S/1	ELU10	-697,88	0,46	0,89	0	0,59
BA/S/2	ELU3	-422,15	0,1	1,23	0	0,09
AL/S/2	ELU2	-584,5	0	0,78	0	0
BA/S/3	ELU3	-420,42	-0,07	1,21	0	-0,21
AL/S/3	ELU2	-696,26	-0,06	0,87	0	0,6
BA/S/4	ELU6	-784,61	0,08	-0,7	0	0
AL/N/1	ELU11	-915,41	0,26	2,54	0	0
BA/N/1	ELU3	-472,14	-0,29	-0,73	0	2,46
AL/N/2	ELU12	-648,85	-0,02	1,71	0	-0,11
BA/N/2	ELU3	-394,16	0	-1,01	0	-0,13
AL/N/3	ELU12	-649,87	0,02	1,71	0	0,15
BA/N/3	ELU3	-471,88	0,27	-0,73	0	-2,63
AL/N/4	ELU9	-894,13	0,07	-0,09	0	0

Tabla I.4.13: Resultados mástiles combinación ELU mayor N_{Ed} . Elaboración: Propia.

Estos resultados son los utilizados en las verificaciones de plastificación y resistencia a pandeo. Se recoge en la Figura I.4.12 el esquema estructural con la representación de diagramas de axiles en los mástiles para la combinación ELU11 que produce el mayor axil de compresión (906 kN), en el mástil AL/N/1. Esta combinación es la que considera la nieve como acción variable dominante y el viento incidiendo desde el sudeste (135°) como acción asociada. En el mástil AL/N/4, no es la combinación que mayor axil produce, pero se entiende que una dirección de incidencia simétrica, desde el sudoeste, sería la que produciría este valor de axil máximo en este mástil. En los mástiles bajos se observa que en ningún caso la acción de la nieve es la más desfavorable.

En los mástiles bajos de la alineación norte la acción más desfavorable es el viento 0° , incidiendo perpendicular a esta alineación, también es la situación más desfavorable en los mástiles bajos internos de la alineación sur debido a las fuerzas de succión que predominan en la superficie.

En los mástiles bajos de esquina de la alineación sur, la acción más desfavorable es el viento que entra a 45° por esa esquina, en el mástil BA/S/1 se considera que la combinación más desfavorable no sería la ELU4 sino una combinación que incidiera sobre la estructura con la dirección 225° , que sería el caso simétrico al ELU 6 que es el más desfavorable sobre la esquina opuesta (BA/S/4), y más desfavorable que lo que la combinación ELU4 resulta sobre el BA/S/1.

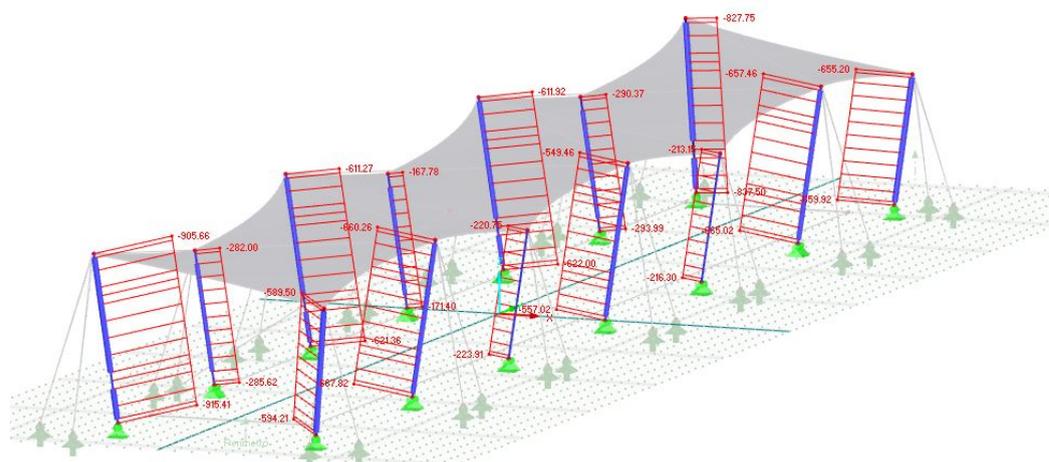


Figura I.4.12: Diagrama axiales en mástiles combinación ELU11. Elaboración: Propia.

En segundo lugar se muestran los resultados obtenidos en los cables. En estos elementos son relevantes los axiles en las combinaciones de ELU y en la combinación de ELS característica. En la Tabla I.4.14 se recoge para cada uno de los cables los valores de axiles F_{Ed} máximos y la combinación ELU en la que se obtienen estos valores, y los valores máximos y mínimos en las combinaciones de ELS característica. Los resultados de los cables en el resto de combinaciones se muestran en el APÉNDICE 02 RESULTADOS EN CABLES.

Cable	Resultados ELU		Resultados ELS (Característica)			
	Comb.	$F_{Ed,Max}$ [kN]	Comb.	$F_{Ed,Max}$ [kN]	Comb.	$F_{Ed,Min}$ [kN]
ba/s/1-a	ELU4	436,62	ELS-Car7	392,66	ELS-Car9	327,74
ba/s/1-b	ELU3	414,88	ELS-Car6	377,96	ELS-Car3	332,92
al/s/1-a	ELU12	331,49	ELS-Car5	295,91	ELS-Car6	224,55
al/s/1-b	ELU11	308,94	ELS-Car4	279,96	ELS-Car7	201,86
ba/s/2-a	ELU4	263,75	ELS-Car7	199,52	ELS-Car4	125,32
ba/s/2-b	ELU3	254,69	ELS-Car6	193,37	ELS-Car2	132,89
al/s/2-a	ELU2	258,37	ELS-Car5	225,74	ELS-Car6	152,88
al/s/2-b	ELU11	264,03	ELS-Car4	231,32	ELS-Car7	151,65
ba/s/3-a	ELU4	257,1	ELS-Car7	199,42	ELS-Car4	123,12
ba/s/3-b	ELU3	253,81	ELS-Car9	191,16	ELS-Car2	131,89
al/s/3-a	ELU2	297,33	ELS-Car2	267,66	ELS-Car9	208,16
al/s/3-b	ELU11	343,29	ELS-Car4	303,54	ELS-Car7	216,57
ba/s/4-b	ELU3	414,93	ELS-Car6	378,04	ELS-Car3	336,67
ba/s/4-a	ELU6	466,97	ELS-Car9	413,83	ELS-Car2	333,1
al/n/1-a	ELU11	433,92	ELS-Car4	407,69	ELS-Car7	350,99
al/n/1-b	ELU12	427,15	ELS-Car5	403,07	ELS-Car7	362,14
ba/n/1-a	ELU3	323,97	ELS-Car6	258,03	ELS-Car5	181,7
ba/n/1-b	ELU4	297,56	ELS-Car7	249,22	ELS-Car4	167,26

Cable	Resultados ELU		Resultados ELS (Característica)			
	Comb.	$F_{Ed,Max}$ [kN]	Comb.	$F_{Ed,Max}$ [kN]	Comb.	$F_{Ed,Min}$ [kN]
al/n/2-a	ELU11	282,01	ELS-Car4	243,47	ELS-Car7	160,63
al/n/2-b	ELU12	276,12	ELS-Car5	239,86	ELS-Car6	166,2
ba/n/2-a	ELU3	251,12	ELS-Car6	193,26	ELS-Car5	117,19
ba/n/2-b	ELU4	254,13	ELS-Car7	195,32	ELS-Car4	113,22
al/n/3-a	ELU11	281,45	ELS-Car4	244,19	ELS-Car7	159,32
al/n/3-b	ELU12	275,86	ELS-Car5	238,43	ELS-Car6	170,21
ba/n/3-a	ELU6	292,85	ELS-Car9	241,65	ELS-Car2	176,67
ba/n/3-b	ELU4	335,06	ELS-Car7	268,14	ELS-Car4	175,03
al/n/4-b	ELU12	427,17	ELS-Car5	403,05	ELS-Car9	364,2
al/n/4-a	ELU14	431,91	ELS-Car7	408,09	ELS-Car9	345,8
r/mod1/s	ELU12	209,58	ELS-Car5	195,39	ELS-Car4	153,18
r/mod1/n	ELU3	209,22	ELS-Car4	195,47	ELS-Car5	149,7
r/mod2/s	ELU12	208,33	ELS-Car5	191,38	ELS-Car3	151,16
r/mod2/n	ELU3	213,18	ELS-Car3	189,24	ELS-Car5	143,22
r/mod3/s	ELU12	210,08	ELS-Car5	192,39	ELS-Car4	150,04
r/mod3/n	ELU3	224,51	ELS-Car3	190	ELS-Car5	145,51
r/mod4/s	ELU12	210,08	ELS-Car5	192,39	ELS-Car2	148,27
r/mod4/n	ELU3	224,36	ELS-Car3	189,36	ELS-Car5	145,55
r/mod5/s	ELU11	209,58	ELS-Car4	192,95	ELS-Car3	150,2
r/mod5/n	ELU4	215,33	ELS-Car3	189,86	ELS-Car4	140,84
r/mod6/s	ELU6	211,4	ELS-Car5	195,42	ELS-Car2	153,37
r/mod6/n	ELU3	209,33	ELS-Car2	193,9	ELS-Car5	149,66
r/int/1	ELU12	185,43	ELS-Car4	173,82	ELS-Car3	136,83
r/int/2	ELU10	141,83	ELS-Car3	121,31	ELS-Car3	55,87
r/int/3	ELU12	126,87	ELS-Car5	100,14	ELS-Car3	21,15
r/int/4	ELU10	104,51	ELS-Car3	83,96	ELS-Car3	14,14
r/int/5	ELU12	127,11	ELS-Car5	100,28	ELS-Car3	21,2
r/int/6	ELU2	140,14	ELS-Car3	119,65	ELS-Car3	56,62
r/int/7	ELU12	185,46	ELS-Car5	173,68	ELS-Car3	138,74

Tabla I.4.14: Resultados cables combinación ELU mayor N_{Ed} , y ELS mayor y menor N_{Ed} .
Elaboración: Propia.

Estos resultados son los utilizados en las verificaciones de rotura y de limitación de tensiones. Se recoge en la Figura I.4.13 el esquema estructural con la representación de diagramas de axiles en los cables para la combinación ELU6 que produce la mayor tensión, en el cable ba/s/4-b.

En la Tabla I.4.16 se recoge para cada uno de los apoyos de los cables la máxima reacción vertical (R_V) y la reacción horizontal en esa combinación, en este caso la combinación coincide con la combinación en la que la reacción horizontal es también la máxima.

Anclaje	ELU máx R_V		
	Comb.	mín $R_{V,Ed}$ [kN]	$R_{H,Ed}$ [kN]
nu-ba/s/1-a	ELU4	415,88	131,22
nu-ba/s/1-b	ELU3	395,2	124,51
nu-al/s/1-a	ELU12	315,66	99,06
nu-al/s/1-b	ELU11	294,2	92,17
nu-ba/s/2-a	ELU4	251,23	78,98
nu-ba/s/2-b	ELU3	242,64	76,09
nu-al/s/2-a	ELU2	246,03	77,7
nu-al/s/2-b	ELU11	251,37	79,57
nu-ba/s/3-a	ELU4	244,9	76,93
nu-ba/s/3-b	ELU3	241,8	75,81
nu-al/s/3-a	ELU2	283,18	88,51
nu-al/s/3-b	ELU11	326,87	102,75
nu-ba/s/4-b	ELU3	395,24	124,53
nu-ba/s/4-a	ELU6	444,67	140,81
nu-al/n/1-a	ELU11	413,19	130,22
nu-al/n/1-b	ELU12	406,74	128,18
nu-ba/n/1-a	ELU3	308,57	96,89
nu-ba/n/1-b	ELU4	283,41	88,86
nu-al/n/2-a	ELU11	268,53	84,39
nu-al/n/2-b	ELU12	262,94	82,51
nu-ba/n/2-a	ELU3	239,18	75,52
nu-ba/n/2-b	ELU4	241,98	76,62
nu-al/n/3-a	ELU11	268	84,2
nu-al/n/3-b	ELU12	262,7	82,42
nu-ba/n/3-a	ELU6	278,94	87,39
nu-ba/n/3-b	ELU4	319,1	100,4
nu-al/n/4-b	ELU12	406,75	128,18
nu-al/n/4-a	ELU14	411,22	129,76

Tabla I.4.16: Reacciones apoyos cables combinación más desfavorable. Elaboración: Propia.

En el APÉNDICE 04 REACCIONES EN APOYOS se muestran los resultados de todas las combinaciones. A partir de estos resultados, se realiza el dimensionamiento y verificación de las cimentaciones mostrado en la sección 04.5.

De los resultados obtenidos considerando las combinaciones de acciones del Eurocódigo, se puede observar una conclusión preliminar. Tanto en las barras como en la mayoría de cables y apoyos, las combinaciones más desfavorables son la ELU2, la ELU3, la ELU4 o la ELU6. Estas combinaciones consideran como acciones variables únicamente la nieve (ELU2) o el viento (0° en ELU3, 45° en ELU4, o 135° en ELU6), solo en algunos cables próximos a las esquinas las condiciones más desfavorables se producen debido a la acción conjunta de nieve y viento.

Esto supone que la acción conjunta de nieve y viento es más “favorable” para los elementos analizados que la acción de únicamente uno de los dos fenómenos. Este hecho estaría relacionado con que la forma de la membrana provoca que el flujo del viento produzca distribuciones de cargas en las que predomina la succión frente a la presión. Al ser el sentido de las fuerzas de succión prácticamente opuesto al de la gravedad, compensaría el peso que produce la acumulación de nieve y se reduciría el valor de la carga sobre la membrana.

04.3.2.2. Resultados combinaciones de acciones UNE-EN 13782 y Guía Europea

Por otra parte, se muestran los resultados obtenidos bajo las combinaciones realizadas para las verificaciones de la membrana, descritas en la sección 02.5.2 del ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO.

Se atiende en primer lugar a los esfuerzos internos que se producen en la membrana, tracción n_x según la dirección de la urdimbre y tracción n_y según la dirección de la trama. En la Tabla I.4.17 se recogen los valores extremos de estos esfuerzos en cada una de las combinaciones definidas según la Norma UNE-EN 13782.

En la Tabla I.4.18 se recogen los valores extremos de estos esfuerzos en cada una de las combinaciones definidas según la Guía Europea, que considera únicamente los valores característicos de las acciones.

Comb.	$n_{x,Max}$ [kN/m]	$n_{x,Min}$ [kN/m]	$n_{y,Max}$ [kN/m]	$n_{y,Min}$ [kN/m]
EN1	6,38	5,68	5,62	5,34
EN2	13,16	5,44	4,85	0,14
EN3	6,28	0,18	12,94	5,39
EN4	8,15	1,24	12,41	4,38
EN5	6,84	4,73	6,44	4,82
EN6	8,59	2,76	10,88	3,55
EN7	7,47	4,81	6,67	4,86
EN8	11,41	5,68	5,65	1,68
EN9	13,15	4,85	6,73	1,09
EN10	9,95	5,19	7,23	2,68
EN11	12,46	4,5	7,43	1,61
EN12	12,54	5,14	5,54	0,05

Comb.	n_x,Max [kN/m]	n_x,Min [kN/m]	n_y,Max [kN/m]	n_y,Min [kN/m]
EN13	14,75	4,42	7,35	0,63
EN14	11,8	5,25	5,84	0,73

Tabla I.4.17: Esfuerzos extremos en la membrana según combinaciones de la Norma UNE-EN 13782. Elaboración: Propia.

Comb.	n_x,Max [kN/m]	n_x,Min [kN/m]	n_y,Max [kN/m]	n_y,Min [kN/m]
GE1	6,29	5,67	5,71	5,43
GE2	10,58	5,61	5,1	1,66
GE3	6,03	1,43	10,33	5,44
GE4	7,28	2,6	10,09	4,77
GE5	6,44	5,14	6,14	5,11
GE6	7,64	3,47	9,03	4,09
GE7	6,86	5,14	6,29	5,1
GE8	9,47	5,77	5,67	2,87
GE9	10,56	5,16	6,33	2,19
GE10	10,57	5,53	5,34	1,39
GE11	11,59	5,08	6,18	1,5
GE12	10,19	5,47	5,5	1,81
GE13	6,83	3,28	8,5	4,89
GE14	8,29	3,8	7,71	3,72
GE15	8,31	5,66	5,76	3,05
GE16	9,88	4,39	7,09	2,59
GE17	8,29	5,4	5,94	3,3

Tabla I.4.18: Esfuerzos extremos en la membrana según combinaciones de la Guía Europea. Elaboración: Propia.

Se muestra además estos resultados de forma gráfica, empleando los mapas de tensiones que se producen en la membrana para 5 combinaciones de carga, que se consideran más significativas. Todos los resultados corresponden con combinaciones de carga de la Guía Europea, no se muestran ambos tipos de combinaciones al ser la forma de la distribución de tensiones idéntica entre combinaciones análogas, difiriendo únicamente en los valores de las tensiones. Se escogen las combinaciones de la Guía Europea por ser la que considera los valores característicos, lo que permite entender de mejor manera el coeficiente de seguridad global disponible.

En la Figura I.4.48, se muestran los mapas de tensiones correspondientes a la combinación GE2. Esta combinación considera la actuación únicamente de la nieve como carga variable, es decir, la acción sobre la membrana únicamente de cargas verticales.

Se puede observar cómo se forman unas bandas paralelas a la dirección de la urdimbre en las que se produce un aumento del n_x , según la curvatura cóncava que trabaja de forma similar a la de un cable portante; en la dirección de la trama se producen zonas de “pérdida de tracción” del n_y , esta curvatura convexa es aquella que trabaja de una forma más similar a la de un arco, aunque lo hace en tracción, por lo que la aplicación de cargas verticales produce este efecto de “pérdida de tracción” que en los arcos corresponde con el aumento de la compresión. Las isolíneas de las tensiones en esta dirección y no forman bandas tan bien definidas como en el caso de la dirección x debido a que los módulos no son exactamente cuadrados y la dirección de la trama del tejido no se encuentra exactamente alineada con la dirección de curvatura convexa de la membrana.

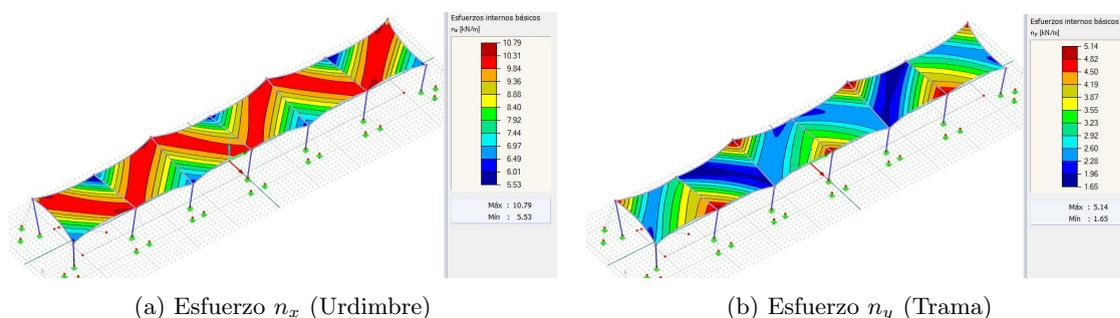


Figura I.4.14: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE2. Elaboración: Propia.

En la Figura I.4.49, se muestran los mapas de tensiones correspondientes a la combinación GE3. Esta combinación considera la actuación del viento en dirección 0° como única carga variable, lo que supone una dirección de incidencia perpendicular a la alineación norte. Esto hace que las zonas de la membrana próximas a los mástiles altos de la alineación norte tengan el comportamiento parecido al de una vela y se produzcan zonas de succión que tienden a levantar la estructura.

La aparición de estas zonas de succión supone que las cargas externas sean compesadas en la membrana como aumentos de los esfuerzos de tracción (n_y) en la dirección de la trama (curvatura convexa), mientras que en la dirección ortogonal se produce el efecto contrario.

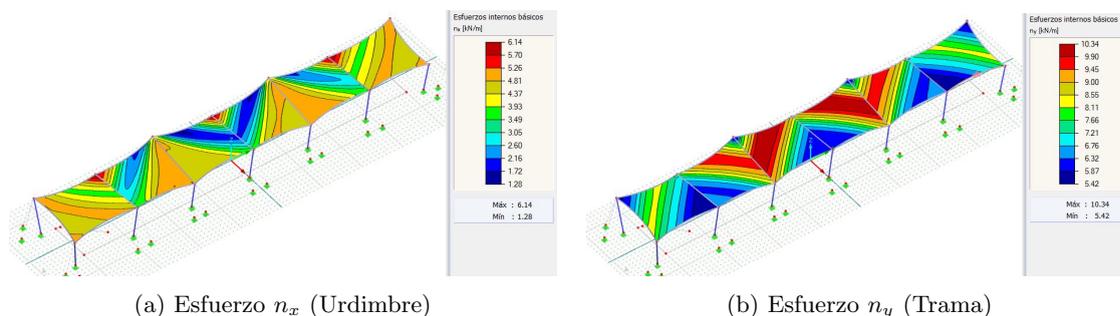


Figura I.4.15: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE3. Elaboración: Propia.

En la Figura I.4.50, se muestran los mapas de tensiones correspondientes a la combinación GE4. Esta combinación considera la actuación del viento en dirección 45° como única carga variable, lo que supone una dirección de incidencia desde la esquina noreste del espacio de juego. Los resultados de esta combinación se entiende que se producirían de forma simétrica en la estructura en el caso que la dirección de incidencia del viento fuera de -45° .

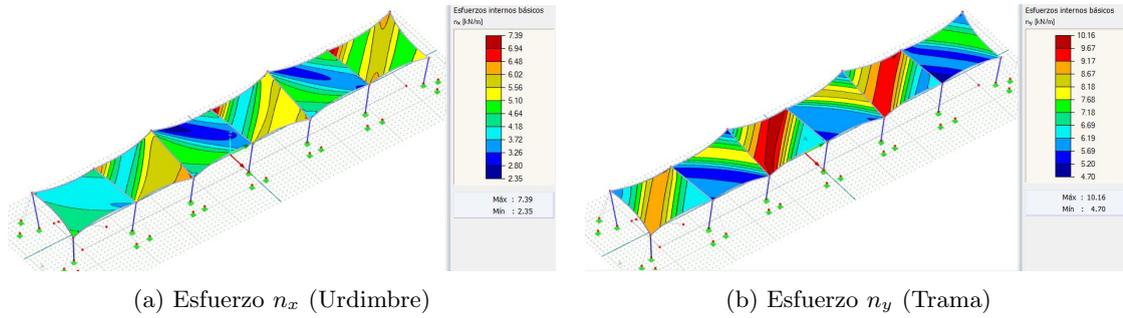


Figura I.4.16: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE4. Elaboración: Propia.

En la Figura I.4.52, se muestran los mapas de tensiones correspondientes a la combinación GE6. Esta combinación considera la actuación del viento en dirección 135° como única carga variable, lo que supone una dirección de incidencia desde la esquina sureste del espacio de juego. Los resultados de esta combinación se entiende que se producirían de forma simétrica en la estructura en el caso que la dirección de incidencia del viento fuera de -135° .

Tanto en este caso como el anterior, se observa que la incidencia del viento según las direcciones de los octantes del sistema global de coordenadas produce efectos similares en la estructura. En los módulos se producen alternativamente bandas de aumento de la tensión en la dirección de la urdimbre junto con bandas de disminución de la tensión en la dirección de la trama; y bandas de disminución de la tensión en la dirección de la urdimbre junto con bandas de aumento de la tensión en la dirección de la trama.

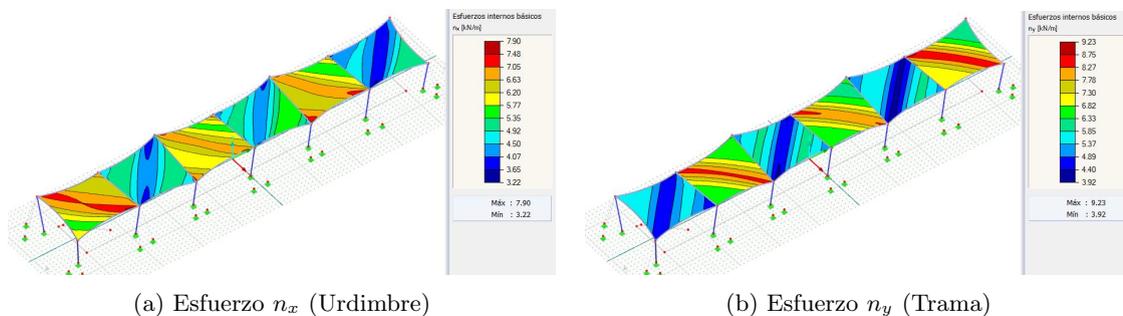


Figura I.4.17: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE6. Elaboración: Propia.

En la Figura I.4.57, se muestran los mapas de tensiones correspondientes a la combinación GE11. Esta combinación considera la actuación del viento en la dirección 135° en combinación con la nieve. Esta dirección de incidencia del viento es la que en solitario produce el máximo n_x , y se combina con la nieve que tiende a aumentar los esfuerzos en la dirección de la urdimbre.

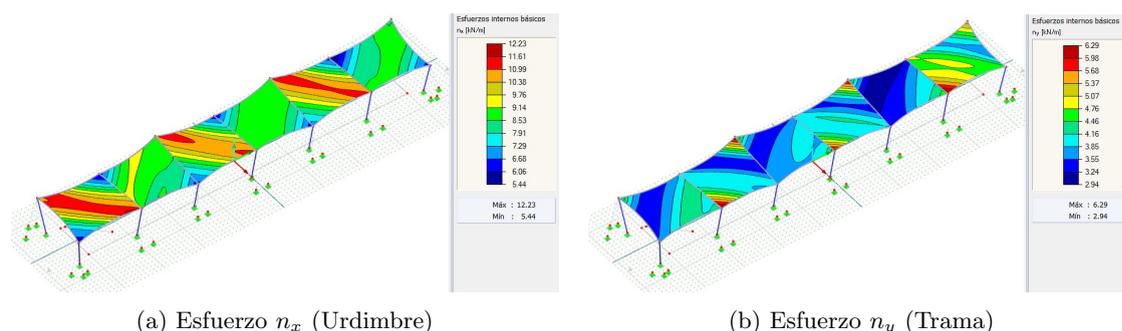


Figura I.4.18: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE11. Elaboración: Propia.

Se atiende en segundo lugar a los resultados correspondientes a la deformada de la membrana. Se muestran como valores representativos de los desplazamientos de la estructura, el mayor desplazamiento absoluto producido en un punto de la membrana $|u|$ y las componentes u_x , u_y y u_z de ese desplazamiento; y el mayor desplazamiento producido en la cabeza de alguno de los mástiles $|u_M|$ y las componentes $u_{x,M}$, $u_{y,M}$ y $u_{z,M}$ de ese desplazamiento. En la Tabla I.4.19 se muestran los resultados según cada una de las combinaciones definidas en la Guía Europea, ya que son las combinaciones que consideran los valores característicos de las cargas, que son los más adecuados para las comprobaciones de desplazamientos.

Comb.	Máximo despl. membrana				Mástil mayor despl.				
	$ u $ [mm]	u_x [mm]	u_y [mm]	u_z [mm]	Mástil	$ u_M $ [mm]	$u_{x,M}$ [mm]	$u_{y,M}$ [mm]	$u_{z,M}$ [mm]
GE1	19,9	-1,1	0,1	-19,8	AL/S/2	1,9	-1,9	0	0,3
GE2	303,3	-12,7	1,4	-303	AL/S/2	26,8	-26,6	0	3,3
GE3	289,1	27,1	13,6	287,5	BA/N/2	20,6	20,4	-0,3	2,5
GE4	316,5	23	2,6	315,7	BA/N/2	19,8	12,9	-14,9	1,6
GE5	86,1	5,3	-3,7	-85,9	AL/N/1	3	-0,2	2,9	0,3
GE6	221,1	3	-12,7	220,8	BA/S/3	15,8	-1,7	-15,7	0,2
GE7	115,2	-17,5	1,8	-113,9	AL/S/1	3,7	-1,1	3,5	0,2
GE8	220,5	1,9	-4,2	-220,4	AL/S/2	12,8	-12,7	0,2	1,6
GE9	307,5	-9,3	-3,3	-307,4	AL/S/2	18,7	-16,8	8,1	2,1
GE10	311,2	-6,8	-3,2	-311,1	AL/S/2	26,4	-26,2	-0,9	3,3
GE11	371,8	-16,5	-4,4	-371,4	AL/S/2	25,5	-23,4	-9,8	2,9
GE12	327,9	-19	-2,9	-327,4	AL/S/2	26,2	-26	0	3,3
GE13	195,7	26,3	14,4	193,4	BA/N/3	8,4	1,2	-8,3	0,3
GE14	200,2	20,6	3,6	199,1	BA/N/3	14,8	0,1	-14,8	0,2

Comb.	Máximo despl. membrana				Mástil mayor despl.				
	$ u $ [mm]	u_x [mm]	u_y [mm]	u_z [mm]	Mástil	$ u_M $ [mm]	$u_{x,M}$ [mm]	$u_{y,M}$ [mm]	$u_{z,M}$ [mm]
GE15	199,6	0,3	-4,8	-199,5	AL/S/2	12,8	-12,6	-1,5	1,6
GE16	289,8	-14	-5,5	-289,4	AL/S/2	18,1	-9,3	-15,5	1,2
GE17	227,5	-19,7	-0,5	-226,6	AL/S/2	13,8	-13,7	0	1,8

Tabla I.4.19: Desplazamientos máximos según combinaciones de la Guía Europea. Elaboración: Propia.

Los resultados máximos de cada una de las combinaciones no corresponden con el mismo punto. Los desplazamientos en el textil son mucho mayores que los desplazamientos en la cabeza de los mástiles; en el primer caso son desplazamientos verticales, mientras que en el segundo son desplazamientos en el plano horizontal.

De otro modo, en la Tabla I.4.20 se muestran los desplazamientos máximos obtenidos en cada uno de los mástiles y la combinación en la que se producen.

Mástil	Comb.	$ u_M $ [mm]	$u_{x,M}$ [mm]	$u_{y,M}$ [mm]	$u_{z,M}$ [mm]
BA/S/1	GE4	8,6	-2,3	8,2	0,9
AL/S/1	GE10	15,8	-15,6	1,6	1,8
BA/S/2	GE10	15	14,9	-1,1	-1,5
AL/S/2	GE2	26,8	-26,6	0	3,3
BA/S/3	GE6	15,8	-1,7	-15,7	0,2
AL/S/3	GE11	17,4	-13,7	-10,6	1,6
BA/S/4	GE6	13,3	1,1	-13,2	1
AL/N/1	GE11	13,2	8,7	9,7	1,6
BA/N/1	GE11	13,9	-11,5	7,8	-1
AL/N/2	GE12	23,7	23,6	-0,2	2,9
BA/N/2	GE12	21,7	-21,6	0	-2,5
AL/N/3	GE12	23,8	23,7	0,3	2,9
BA/N/3	GE4	16,9	6,9	-15,4	0,8
AL/N/4	GE9	12,3	6,8	-10,1	1,5

Tabla I.4.20: Desplazamientos máximos por mástil en combinaciones de la Guía Europea. Elaboración: Propia.

Se analizan también los desplazamientos de los cables de valle de la membrana. Se presta atención especial a los puntos correspondientes con las intersecciones de estos cables con el plano vertical que forma la fachada sur de la estructura actual. En la Tabla I.4.22 se recogen las coordenadas de estos puntos en la configuración deformada, los desplazamientos producidos por cada combinación, y la diferencia de cota ΔZ entre la posición de estos

puntos en la configuración deformada y la cota del perímetro superior de la estructura existente (7,0 m) para el cable r/int/4, y en la Tabla I.4.23 para el r/int/5, por ser los correspondientes a los mástiles bajos internos de la alineación norte y sur respectivamente. En la Tabla I.4.21 se indican las coordenadas de estos puntos en la solución inicial o de equilibrio.

Cable	X _I [m]	Y _I [m]	Z _I [m]
r/int/4	-4,750	0	7,653
r/int/5	4,752	14,400	7,647

Tabla I.4.21: Coordenadas iniciales puntos de referencia r/int/4 y r/int/5. Elaboración: Propia.

Comb.	X _F [m]	Y _F [m]	Z _F [m]	u [mm]	u _X [mm]	u _Y [mm]	u _Z [mm]	ΔZ [m]
GE1	-4,751	0	7,647	5,8	-1	0	-5,7	0,647
GE2	-4,763	0	7,575	78,9	-13,2	0	-77,8	0,575
GE3	-4,735	-0,001	7,695	44,7	15,1	-0,5	42,1	0,695
GE4	-4,738	-0,016	7,668	24,9	11,4	-16,3	14,9	0,668
GE5	-4,748	-0,001	7,622	30,5	1,8	-0,5	-30,4	0,622
GE6	-4,749	0,014	7,667	20	0,9	14,2	14,1	0,667
GE7	-4,755	0	7,681	28,7	-5,3	-0,1	28,2	0,681
GE8	-4,755	0	7,608	45,5	-5,6	-0,3	-45,2	0,608
GE9	-4,757	-0,009	7,585	68,6	-7	-8,8	-67,7	0,585
GE10	-4,761	-0,001	7,555	98,3	-11,5	-0,6	-97,6	0,555
GE11	-4,763	0,007	7,586	68,7	-12,7	6,8	-67,2	0,586
GE12	-4,767	0	7,601	54,7	-16,7	0	-52,1	0,601
GE13	-4,743	-0,001	7,662	11,4	7,2	-0,5	8,8	0,662
GE14	-4,746	-0,016	7,631	27,2	3,9	-15,9	-21,7	0,631
GE15	-4,755	-0,001	7,583	69,8	-4,9	-0,7	-69,6	0,583
GE16	-4,756	0,013	7,631	26,4	-6,2	13,3	-21,9	0,631
GE17	-4,763	0	7,65	13,3	-12,9	-0,1	-3,1	0,65

Tabla I.4.22: Desplazamientos punto r/int/4 sobre perímetro existente. Elaboración: Propia.

Comb.	X_F [m]	Y_F [m]	Z_F [m]	$ u $ [mm]	u_X [mm]	u_Y [mm]	u_Z [mm]	ΔZ [m]
GE1	4,751	14,399	7,642	5,8	-1	0	-5,7	0,642
GE2	4,753	14,398	7,553	94	1,7	-1,5	-94	0,553
GE3	4,751	14,397	7,716	68,7	-0,7	-2,2	68,7	0,716
GE4	4,75	14,408	7,609	39,7	-1,7	8,8	-38,7	0,609
GE5	4,751	14,396	7,634	13,6	-0,5	-2,8	-13,3	0,634
GE6	4,746	14,382	7,624	29,4	-5,6	-17,3	-23,1	0,624
GE7	4,744	14,398	7,595	53	-8	-1,4	-52,4	0,595
GE8	4,755	14,397	7,601	46,7	3,6	-1,9	-46,5	0,601
GE9	4,753	14,403	7,579	69	1,5	4	-68,9	0,579
GE10	4,753	14,396	7,546	101,9	1,3	-3,2	-101,8	0,546
GE11	4,75	14,388	7,537	111,4	-2	-11,3	-110,8	0,537
GE12	4,748	14,397	7,519	128,1	-3,7	-2,5	-128	0,519
GE13	4,754	14,397	7,677	30,2	2,7	-2,2	30	0,677
GE14	4,752	14,408	7,644	9,6	0,4	8,8	-3,8	0,644
GE15	4,752	14,396	7,588	59,2	0,7	-3,4	-59,1	0,588
GE16	4,747	14,381	7,576	73,7	-4,9	-17,9	-71,3	0,576
GE17	4,744	14,397	7,547	101,1	-7,3	-2,3	-100,8	0,547

Tabla I.4.23: Desplazamientos punto r/int/5 sobre perímetro existente. Elaboración: Propia.

Se muestra de forma gráfica las configuraciones deformadas de la estructura correspondientes a las 2 combinaciones de acciones que mayor desplazamiento $|u|$ de la estructura provocan, la combinación que mayor u_X provoca, la combinación que mayor u_Y provoca y la combinación que mayor u_Z provoca. El mapa de colores sobre la membrana corresponde con los valores de los desplazamientos correspondientes.

Se muestran también las configuraciones deformadas de la estructura correspondientes a las 2 combinaciones de carga que mayor desplazamiento $|u_M|$ de los mástiles provocan. Se muestran por último las deformadas del cable r/int/4 en las 2 combinaciones de carga que mayor $|u|$ provocan en el punto tomado como referencia de este cable, y las 2 combinaciones de carga que mayor u_X provocan en este punto.

En la Figura I.4.19a se muestra la deformada de la estructura correspondiente a la combinación de acciones GE4, que considera la actuación únicamente del viento incidiendo a 45° (por la esquina noreste). En la Figura I.4.19b se muestra la deformada de la estructura correspondiente a la combinación de acciones GE11, que considera la actuación de la nieve como acción dominante y el viento incidiendo a 135° (por la esquina sureste) como acción asociada. Son las dos combinaciones que provocan los máximos desplazamientos de la membrana provocan: en el primer caso se corresponde con el mayor desplazamiento ascendente de un punto de la membrana (315,7 mm), y descendente en el segundo caso ($-371,4$ mm). La escala de colores representa el valor de $|u|$ en cada punto de la superficie, la deformada se muestra multiplicando por 5 los valores de los desplazamientos.

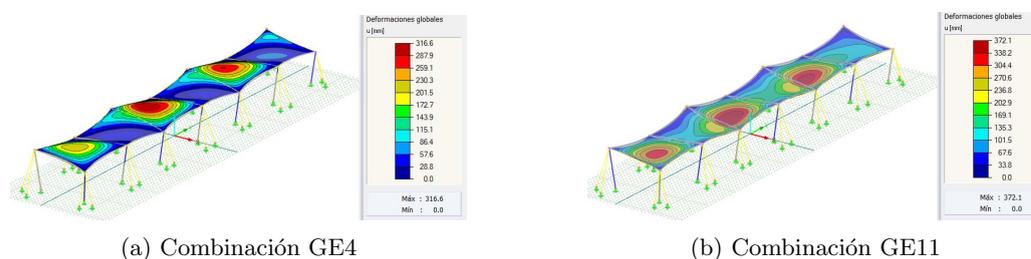


Figura I.4.19: Geometrías deformadas de la membrana en combinaciones de mayor $|u|$.
Elaboración: Propia.

En la Figura I.4.20a se muestra la deformada de la membrana correspondiente a la combinación de carga GE3, que considera la actuación de únicamente del viento incidiendo a 0° (desde el norte). Esta es la combinación que mayor desplazamiento en dirección X de la estructura provoca. La escala de colores representa el valor de $|u|$ en cada punto de la superficie, la deformada se muestra multiplicando por 5 los valores de los desplazamientos. En la Figura I.4.20b se muestra este desplazamiento $|u_X|$ que se produce en cada punto de la membrana.

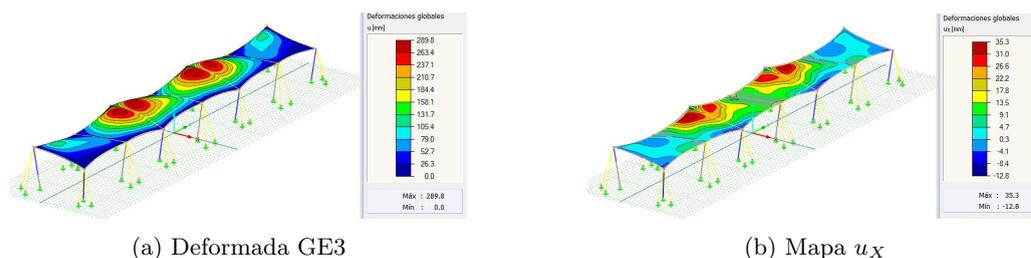


Figura I.4.20: Resultados desplazamiento de la membrana en combinación de mayor $|u_X|$.
Elaboración: Propia.

En la Figura I.4.21a se muestra la deformada de la membrana correspondiente a la combinación de carga GE13, que considera la actuación del viento incidiendo a 0° (desde el norte) como acción dominante y la nieve como acción asociada. Esta es la combinación que mayor desplazamiento en dirección Y de la estructura provoca. La escala de colores representa el valor de $|u|$ en cada punto de la superficie, la deformada se muestra multiplicando por 5 los valores de los desplazamientos. En la Figura I.4.21b se muestra este desplazamiento $|u_Y|$ que se produce en cada punto de la membrana.

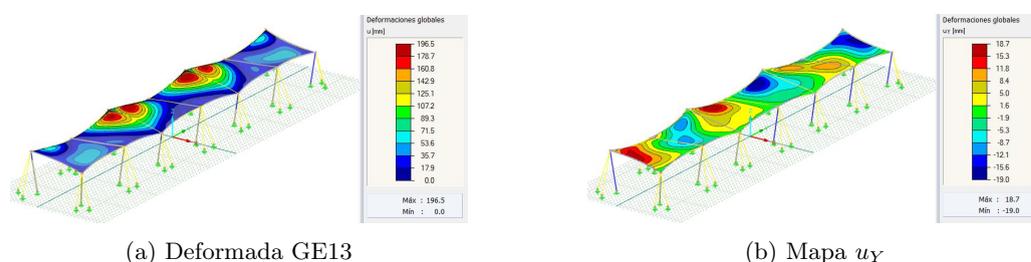


Figura I.4.21: Resultados desplazamiento en membrana combinación de mayor $|u_Y|$. Elaboración: Propia.

A la vista de estos dos últimos resultados se observa que los desplazamientos globales producidos en la superficie son mucho más relevantes en la dirección vertical que en el plano horizontal. Localmente, los desplazamientos se producen principalmente en la dirección perpendicular al plano medio de la superficie; los desplazamientos horizontales son consecuencia de la descomposición de la resultante.

Las últimas configuraciones deformadas mostradas son las correspondientes a las combinaciones que mayores desplazamientos producen en los mástiles.

En la Figura I.4.22a se muestra la deformada de la estructura correspondiente a la combinación de carga GE2, que considera la actuación únicamente de la nieve. Esta es la combinación que mayor desplazamiento en dirección X provoca en uno de los mástiles ($u_X = -26,6$ mm en el mástil AL/S/2), siendo también este mástil y esta combinación donde mayor desplazamiento absoluto se observa ($|u| = 26,8$ mm). La nieve sobre esta estructura tiende a hundir la membrana, y los mástiles rotan hacia dentro empujados por este peso.

En la Figura I.4.22b se muestra la deformada de la estructura correspondiente a la combinación de carga GE6, que considera la actuación únicamente del viento incidiendo a 135° (por la esquina sureste). Esta es la combinación que mayor desplazamiento en dirección Y provoca en uno de los mástiles ($u_Y = -15,7$ mm en el mástil BA/S/3). En este caso la deformación de la estructura es una traslación horizontal en lugar de un hundimiento vertical, ya que los mástiles se ven empujados por la acción horizontal del viento.

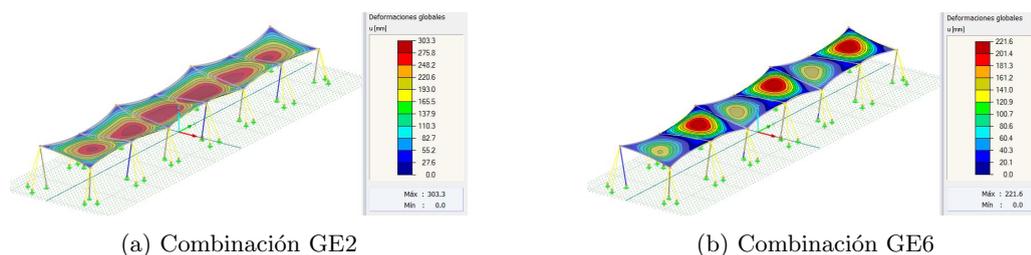


Figura I.4.22: Geometrías deformadas en combinaciones de mayores desplazamientos en mástiles. Elaboración: Propia.

Los resultados gráficos de todas las combinaciones de la Guía y los desplazamientos de todos los mástiles se muestran en el APÉNDICE 03 RESULTADOS EN MEMBRANA.

04.3.3. Resultados de las verificaciones

A partir de los resultados obtenidos en el análisis global, se realizan las verificaciones de cada uno de los elementos para su dimensionamiento y la validación global de la estructura.

04.3.3.1. Resultados comprobación de plastificación en barras comprimidas

En este apartado se realizan las comprobaciones de plastificación en los mástiles. Se comprueba que los axiles N_{Ed} mostrados previamente en la Tabla I.4.13 no superen los valores de $N_{Rd} = \frac{A \cdot 275}{1,05}$. Se muestran en la Tabla I.4.24 los resultados de estas verificaciones.

Mástil	Sección	Área [mm ²]	N _{Ed} [kN]	N _{Rd} [kN]
BA/S/1	244,5x8	5.943,89	764,99	1.556,73
AL/S/1	273x10	8.262,39	697,88	2.163,96
BA/S/2	219,1x6,3	4.211,74	422,15	1.103,08
AL/S/2	273x10	8.262,39	584,5	2.163,96
BA/S/3	219,1x6,3	4.211,74	420,42	1.103,08
AL/S/3	273x10	8.262,39	696,26	2.163,96
BA/S/4	244,5x8	5.943,89	784,61	1.556,73
AL/N/1	323,9x10	9.861,46	915,41	2.582,76
BA/N/1	244,5x6,3	4.714,46	472,14	1.234,74
AL/N/2	273x12,5	10.229,81	648,85	2.679,24
BA/N/2	244,5x6,3	4.714,46	394,16	1.234,74
AL/N/3	273x12,5	10.229,81	649,87	2.679,24
BA/N/3	244,5x6,3	4.714,46	471,88	1.234,74
AL/N/4	323,9x10	9.861,46	894,13	2.582,76

Tabla I.4.24: Resultados verificaciones plastificación en mástiles. Elaboración: Propia.

04.3.3.2. Resultados comprobación de resistencia a pandeo en elementos uniformes en compresión

En este apartado se realizan las comprobaciones de pandeo de los mástiles. Se comprueba que los axiles N_{Ed} mostrados previamente en la Tabla I.4.13 no superen los valores de $N_{b,Rd} = \frac{\chi^4 \cdot 275}{1,05}$. Se muestran en la Tabla I.4.25 los resultados de estas verificaciones.

Mástil	Sección	Área [mm ²]	N _{cr} [kN]	$\bar{\lambda}$ [-]	χ [-]	N _{Ed} [kN]	N _{Rd} [kN]
BA/S/1	244,5x8	5.943,9	1.656,5	0,993	0,67	765	1.043,4
AL/S/1	273x10	8.262,4	1.341,3	1,302	0,469	697,9	1.016
BA/S/2	219,1x6,3	4.211,7	950	1,104	0,593	422,2	654,3
AL/S/2	273x10	8.262,4	1.341,3	1,302	0,469	584,5	1.016
BA/S/3	219,1x6,3	4.211,7	950	1,104	0,593	420,4	654,3
AL/S/3	273x10	8.262,4	1.341,3	1,302	0,469	696,3	1.016
BA/S/4	244,5x8	5.943,9	1.656,5	0,993	0,67	784,6	1.043,4
AL/N/1	323,9x10	9.861,5	1.647,1	1,283	0,48	915,4	1.239,5
BA/N/1	244,5x6,3	4.714,5	1.019,9	1,127	0,577	472,1	712,9
AL/N/2	273x12,5	10.229,8	1.178,3	1,545	0,354	648,9	948,4
BA/N/2	244,5x6,3	4.714,5	1.019,9	1,127	0,577	394,2	712,9
AL/N/3	273x12,5	10.229,8	1.178,3	1,545	0,354	649,9	948,4

Mástil	Sección	Área [mm ²]	N _{cr} [kN]	$\bar{\lambda}$ [-]	χ [-]	N _{Ed} [kN]	N _{Rd} [kN]
BA/N/3	244,5x6,3	4.714,5	1.019,9	1,127	0,577	471,9	712,9
AL/N/4	323,9x10	9.861,5	1.647,1	1,283	0,48	894,1	1.239,5

Tabla I.4.25: Resultados verificaciones pandeo en mástiles. Elaboración: Propia.

A la vista de los resultados de estas dos verificaciones, se asumen como válidas las secciones dispuestas en cada una de las barras al cumplirse en todas ellas la verificación.

04.3.3.3. Resultados comprobación de resistencia a tracción en cables

En este apartado se realizan las comprobaciones de rotura de los cables. Se comprueba que las tracciones producidas $F_{Max,Ed}$ bajo la combinación ELU, mostradas en la Tabla I.4.14, no superen los valores de $F_{Rd} = \min \left\{ \frac{F_{uk}}{1,5\gamma_R}, \frac{F_k}{\gamma_R} \right\}$. En este caso los valores de la resistencia mínimos se obtienen con la ecuación de la carga de rotura F_{uk} proporcionados por el fabricante y aplicando una reducción de $1,5\gamma_R$, donde $\gamma_R = 1,10$. Se muestran en la Tabla I.4.26 los resultados de estas verificaciones.

Cable	Tipo	F _{uk} [kN]	F _{Max,Ed} [kN]	F _{Rd} [kN]
ba/s/1-a	FLC36	1.285	436,6	778,8
ba/s/1-b	FLC32	1.015	414,9	615,2
al/s/1-a	FLC32	1.015	331,5	615,2
al/s/1-b	FLC32	1.015	308,9	615,2
ba/s/2-a	FLC28	775	263,8	469,7
ba/s/2-b	FLC28	775	254,7	469,7
al/s/2-a	FLC24	570	258,4	345,5
al/s/2-b	FLC24	570	264	345,5
ba/s/3-a	FLC28	775	257,1	469,7
ba/s/3-b	FLC28	775	253,8	469,7
al/s/3-a	FLC32	1.015	297,3	615,2
al/s/3-b	FLC32	1.015	343,3	615,2
ba/s/4-b	FLC32	1.015	414,9	615,2
ba/s/4-a	FLC36	1.285	467	778,8
al/n/1-a	FLC36	1.285	433,9	778,8
al/n/1-b	FLC32	1.015	427,2	615,2
ba/n/1-a	FLC28	775	324	469,7
ba/n/1-b	FLC28	775	297,6	469,7
al/n/2-a	FLC24	570	282	345,5
al/n/2-b	FLC24	570	276,1	345,5

Cable	Tipo	F_{uk} [kN]	$F_{Max,Ed}$ [kN]	F_{Rd} [kN]
ba/n/2-a	FLC24	570	251,1	345,5
ba/n/2-b	FLC24	570	254,1	345,5
al/n/3-a	FLC24	570	281,5	345,5
al/n/3-b	FLC24	570	275,9	345,5
ba/n/3-a	FLC28	775	292,9	469,7
ba/n/3-b	FLC28	775	335,1	469,7
al/n/4-b	FLC32	1.015	427,2	615,2
al/n/4-a	FLC36	1.285	431,9	778,8
r/mod1/s	OSS24	545	209,6	330,3
r/mod1/n	OSS24	545	209,2	330,3
r/mod2/s	OSS24	545	208,3	330,3
r/mod2/n	OSS24	545	213,2	330,3
r/mod3/s	OSS24	545	210,1	330,3
r/mod3/n	OSS24	545	224,5	330,3
r/mod4/s	OSS24	545	210,1	330,3
r/mod4/n	OSS24	545	224,4	330,3
r/mod5/s	OSS24	545	209,6	330,3
r/mod5/n	OSS24	545	215,3	330,3
r/mod6/s	OSS24	545	211,4	330,3
r/mod6/n	OSS24	545	209,3	330,3
r/int/1	OSS24	545	185,4	330,3
r/int/2	OSS20	380	141,8	230,3
r/int/3	OSS20	380	126,9	230,3
r/int/4	OSS20	380	104,5	230,3
r/int/5	OSS20	380	127,1	230,3
r/int/6	OSS20	380	140,1	230,3
r/int/7	OSS24	545	185,5	330,3

Tabla I.4.26: Resultados verificaciones rotura cables. Elaboración: Propia.

04.3.3.4. Resultados comprobación de limitación tensional en cables

En este apartado se realizan las comprobaciones de limitaciones tensionales de los cables. Se realiza la comprobación de máxima tracción recogida en el Eurocódigo 3, y una comprobación adicional de tensión mínima para comprobar que en ninguna de las combinaciones ELS Característica se produzca la pérdida de tensión de ningún cable, que pueda ocasionar una inestabilidad.

En la limitación de la máxima tensión se comprueba que las tensiones producidas no

superen el límite de $0,45\sigma_{uk}$, donde se considera $\sigma_{uk} = 1.670$ MPa en los cables de contravientos y $\sigma_{uk} = 1.770$ MPa en los cables de relingas. Se muestran en la Tabla I.4.27 los resultados de estas verificaciones.

Las comprobaciones de pérdida de tensión se muestran en la Tabla I.4.28, se verifica que no lleguen a alcanzar el valor de 0 MPa.

Cable	Tipo	Área [mm ²]	F _{Ed} [kN]	σ_{Ed} [MPa]	0,45 σ_{uk} [MPa]
ba/s/1-a	FLC36	862	392,66	455,5	751,5
ba/s/1-b	FLC32	681	377,96	555	751,5
al/s/1-a	FLC32	681	295,91	434,5	751,5
al/s/1-b	FLC32	681	279,96	411,1	751,5
ba/s/2-a	FLC28	521	199,52	383	751,5
ba/s/2-b	FLC28	521	193,37	371,2	751,5
al/s/2-a	FLC24	383	225,74	589,4	751,5
al/s/2-b	FLC24	383	231,32	604	751,5
ba/s/3-a	FLC28	521	199,42	382,8	751,5
ba/s/3-b	FLC28	521	191,16	366,9	751,5
al/s/3-a	FLC32	681	267,66	393	751,5
al/s/3-b	FLC32	681	303,54	445,7	751,5
ba/s/4-a	FLC36	862	413,83	480,1	751,5
ba/s/4-b	FLC32	681	378,04	555,1	751,5
al/n/1-a	FLC36	862	407,69	473	751,5
al/n/1-b	FLC32	681	403,07	591,9	751,5
ba/n/1-a	FLC28	521	258,03	495,3	751,5
ba/n/1-b	FLC28	521	249,22	478,3	751,5
al/n/2-a	FLC24	383	243,47	635,7	751,5
al/n/2-b	FLC24	383	239,86	626,3	751,5
ba/n/2-a	FLC24	383	193,26	504,6	751,5
ba/n/2-b	FLC24	383	195,32	510	751,5
al/n/3-a	FLC24	383	244,19	637,6	751,5
al/n/3-b	FLC24	383	238,43	622,5	751,5
ba/n/3-a	FLC28	521	241,65	463,8	751,5
ba/n/3-b	FLC28	521	268,14	514,7	751,5
al/n/4-a	FLC36	862	408,09	473,4	751,5
al/n/4-b	FLC32	681	403,05	591,9	751,5
r/mod1/s	OSS24	353	195,39	553,5	796,5
r/mod1/n	OSS24	353	195,47	553,7	796,5
r/mod2/s	OSS24	353	191,38	542,2	796,5
r/mod2/n	OSS24	353	189,24	536,1	796,5
r/mod3/s	OSS24	353	192,39	545	796,5

Cable	Tipo	Área [mm ²]	F _{Ed} [kN]	σ _{Ed} [MPa]	0,45σ _{uk} [MPa]
r/mod3/n	OSS24	353	190	538,2	796,5
r/mod4/s	OSS24	353	192,39	545	796,5
r/mod4/n	OSS24	353	189,36	536,4	796,5
r/mod5/s	OSS24	353	192,95	546,6	796,5
r/mod5/n	OSS24	353	189,86	537,8	796,5
r/mod6/s	OSS24	353	195,42	553,6	796,5
r/mod6/n	OSS24	353	193,9	549,3	796,5
r/int/1	OSS24	353	173,82	492,4	796,5
r/int/2	OSS20	245	121,31	495,1	796,5
r/int/3	OSS20	245	100,14	408,7	796,5
r/int/4	OSS20	245	83,96	342,7	796,5
r/int/5	OSS20	245	100,28	409,3	796,5
r/int/6	OSS20	245	119,65	488,4	796,5
r/int/7	OSS24	353	173,68	492	796,5

Tabla I.4.27: Resultados verificaciones limitación tensión máxima cables. Elaboración: Propia.

Cable	Tipo	Área [mm ²]	F _{Ed,Min} [kN]	σ _{Ed,Min} [MPa]
ba/s/1-a	FLC36	862	327,74	380
ba/s/1-b	FLC32	681	332,92	489
al/s/1-a	FLC32	681	224,55	330
al/s/1-b	FLC32	681	201,86	296
ba/s/2-a	FLC28	521	125,32	241
ba/s/2-b	FLC28	521	132,89	255
al/s/2-a	FLC24	383	152,88	399
al/s/2-b	FLC24	383	151,65	396
ba/s/3-a	FLC28	521	123,12	236
ba/s/3-b	FLC28	521	131,89	253
al/s/3-a	FLC32	681	208,16	306
al/s/3-b	FLC32	681	216,57	318
ba/s/4-a	FLC36	862	333,1	386
ba/s/4-b	FLC32	681	336,67	494
al/n/1-a	FLC36	862	350,99	407
al/n/1-b	FLC32	681	362,14	532
ba/n/1-a	FLC28	521	181,7	349
ba/n/1-b	FLC28	521	167,26	321
al/n/2-a	FLC24	383	160,63	419

Cable	Tipo	Área [mm ²]	F _{Ed,Min} [kN]	σ _{Ed,Min} [MPa]
al/n/2-b	FLC24	383	166,2	434
ba/n/2-a	FLC24	383	117,19	306
ba/n/2-b	FLC24	383	113,22	296
al/n/3-a	FLC24	383	159,32	416
al/n/3-b	FLC24	383	170,21	444
ba/n/3-a	FLC28	521	176,67	339
ba/n/3-b	FLC28	521	175,03	336
al/n/4-a	FLC36	862	345,8	401
al/n/4-b	FLC32	681	364,2	535
r/mod1/s	OSS24	353	153,18	434
r/mod1/n	OSS24	353	149,7	424
r/mod2/s	OSS24	353	151,16	428
r/mod2/n	OSS24	353	143,22	406
r/mod3/s	OSS24	353	150,04	425
r/mod3/n	OSS24	353	145,51	412
r/mod4/s	OSS24	353	148,27	420
r/mod4/n	OSS24	353	145,55	412
r/mod5/s	OSS24	353	150,2	425
r/mod5/n	OSS24	353	140,84	399
r/mod6/s	OSS24	353	153,37	434
r/mod6/n	OSS24	353	149,66	424
r/int/1	OSS24	353	136,83	388
r/int/2	OSS20	245	55,87	228
r/int/3	OSS20	245	21,15	86
r/int/4	OSS20	245	14,14	58
r/int/5	OSS20	245	21,2	87
r/int/6	OSS20	245	56,62	231
r/int/7	OSS24	353	138,74	393

Tabla I.4.28: Resultados verificaciones limitación tensión mínima cables. Elaboración: Propia.

A la vista de los resultados de estos dos últimos apartados, se asumen como válidas las secciones dispuestas al cumplirse en todos los cables la limitación.

04.3.3.5. Resultados comprobación de limitación tensional en la membrana

En este apartado se muestran las comprobaciones tensionales en la membrana. Se confrontan los valores máximos de esfuerzos obtenidos en los dos tipos de combinaciones con-

siderados, con los valores límite de esfuerzos según los coeficientes globales considerados. En la Tabla I.4.29 se muestran los esfuerzos máximos obtenidos según las combinaciones de la Norma UNE-EN 13782 y los esfuerzos de rotura de cálculo, según ambas direcciones principales del tejido. En la Tabla I.4.30 se muestran los mismos resultados, teniendo en cuenta las indicaciones de la Guía Europea. Se puede observar en ambos casos como no llegan a superarse los esfuerzos de rotura en ninguno de los casos.

Comb.	n_{x,Max} [kN/m]	n_{x,R} [kN/m]	n_{y,Max} [kN/m]	n_{y,R} [kN/m]
EN1	6,38	64	5,62	56
EN2	13,16	64	4,85	56
EN3	6,28	64	12,94	56
EN4	8,15	64	12,41	56
EN5	6,84	64	6,44	56
EN6	8,59	64	10,88	56
EN7	7,47	64	6,67	56
EN8	11,41	64	5,65	56
EN9	13,15	64	6,73	56
EN10	9,95	64	7,23	56
EN11	12,46	64	7,43	56
EN12	12,54	64	5,54	56
EN13	14,75	64	7,35	56
EN14	11,8	64	5,84	56

Tabla I.4.29: Verificaciones esfuerzos membrana según combinaciones de la Norma UNE-EN 13782. Elaboración: Propia.

Comb.	n_{x,Max} [kN/m]	n_{x,R} [kN/m]	n_{y,Max} [kN/m]	n_{y,R} [kN/m]
GE1	6,29	26,67	5,71	23,33
GE2	10,58	26,67	5,1	23,33
GE3	6,03	26,67	10,33	23,33
GE4	7,28	26,67	10,09	23,33
GE5	6,44	26,67	6,14	23,33
GE6	7,64	26,67	9,03	23,33
GE7	6,86	26,67	6,29	23,33
GE8	9,47	26,67	5,67	23,33
GE9	10,56	26,67	6,33	23,33
GE10	10,57	26,67	5,34	23,33
GE11	11,59	26,67	6,18	23,33
GE12	10,19	26,67	5,5	23,33
GE13	6,83	26,67	8,5	23,33

Comb.	$n_{x,Max}$ [kN/m]	$n_{x,R}$ [kN/m]	$n_{y,Max}$ [kN/m]	$n_{y,R}$ [kN/m]
GE14	8, 29	26, 67	7, 71	23, 33
GE15	8, 31	26, 67	5, 76	23, 33
GE16	9, 88	26, 67	7, 09	23, 33
GE17	8, 29	26, 67	5, 94	23, 33

Tabla I.4.30: Verificaciones esfuerzos membrana según combinaciones de la Guía Europea.
Elaboración: Propia.

La situación más desfavorable para la membrana es el viento 0° para las fibras del tejido en la dirección de la trama, tanto las combinaciones EN3 como GE3 son las que producen mayores valores de n_y .

La condición de que no se produzca la pérdida de tensión, puede observarse en las Tablas I.4.17 y I.4.18 de forma directa como también se cumple, pues en todos los casos la tensión mínima es superior a 0 MPa. Se observa cómo la acción del viento incidiendo desde el Norte (0°) es la situación más desfavorable en este caso es y que más acerca la membrana a la destensión, en este caso en la dirección n_x .

04.3.3.6. Resultados comprobación de geometría en la membrana

En este apartado se comprueba que en ninguna zona de la membrana se produzca la inversión de curvatura bajo la aplicación de las cargas. Esta comprobación no es de tipo numérico sino que deben observarse las configuraciones deformadas de forma individual. En las Figuras I.4.23 a I.4.29 se muestran estas deformadas obtenidas con las combinaciones de la Norma UNE-EN 13782, la escala de colores representa la cota de la membrana en ese punto. En negro se representan las curvas de nivel cada 4 cm de la superficie, líneas con mayor grosor cada 20 cm, se observa cómo se cumple la condición de que no se formen curvas de nivel cerradas.

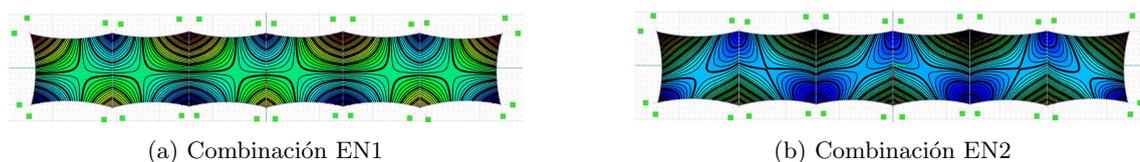


Figura I.4.23: Curvas de nivel en configuraciones deformadas por combinaciones EN1 y EN2.
Elaboración: Propia.



Figura I.4.24: Curvas de nivel en configuraciones deformadas por combinaciones EN3 y EN4.
Elaboración: Propia.

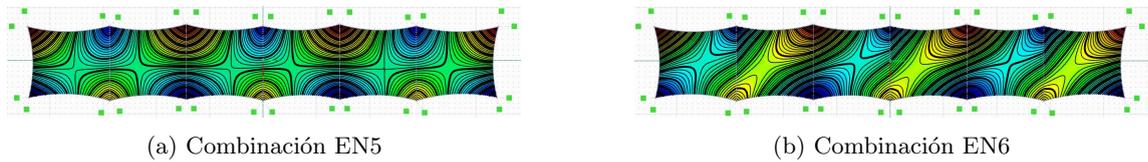


Figura I.4.25: Curvas de nivel en configuraciones deformadas por combinaciones EN5 y EN6.
Elaboración: Propia.



Figura I.4.26: Curvas de nivel en configuraciones deformadas por combinaciones EN7 y EN8.
Elaboración: Propia.



Figura I.4.27: Curvas de nivel en configuraciones deformadas por combinaciones EN9 y EN10.
Elaboración: Propia.



Figura I.4.28: Curvas de nivel en configuraciones deformadas por combinaciones EN11 y EN12.
Elaboración: Propia.

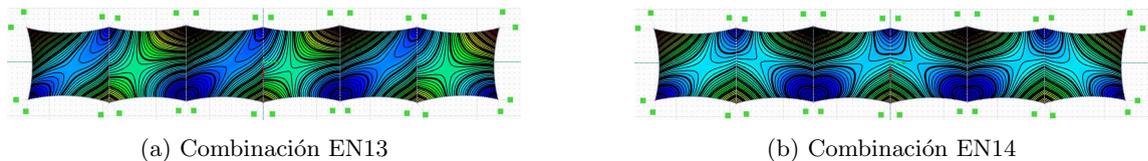


Figura I.4.29: Curvas de nivel en configuraciones deformadas por combinaciones EN13 y EN14.
Elaboración: Propia.

04.3.3.7. Resultados comprobación de flechas

En último lugar, se realiza la comprobación de los desplazamientos en los cables internos de la membrana. Como se muestra en las Tablas I.4.22 y I.4.23, los cables de valles permanecen en todas las combinaciones por encima de la cota de la fachada existente.

En las Figuras I.4.30 y I.4.31 se muestran las deformadas de los cables internos tomados como referencia en las combinaciones GE2, GE10, GE11, GE12 y GE17, que son las que más aproximan los cables a la fachada existente. En ninguno de los casos se incumple la condición de no entrar en contacto la membrana con la fachada existente.

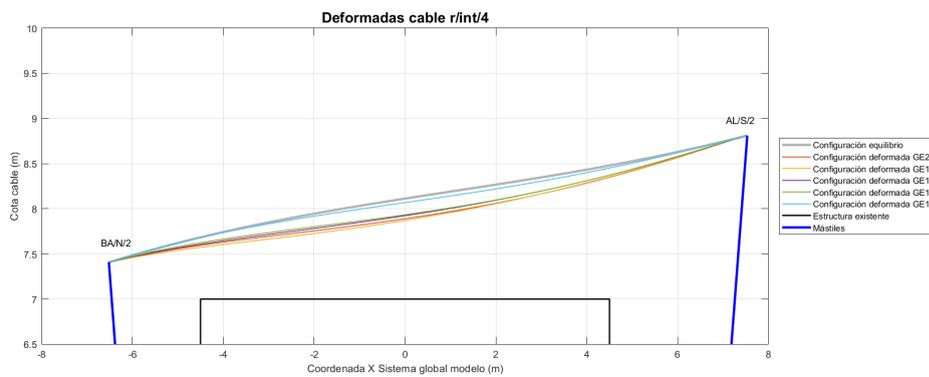


Figura I.4.30: Configuraciones deformadas del cable r/int/4 en combinaciones GE2, GE10, GE11, GE12 y GE17. Elaboración: Propia.

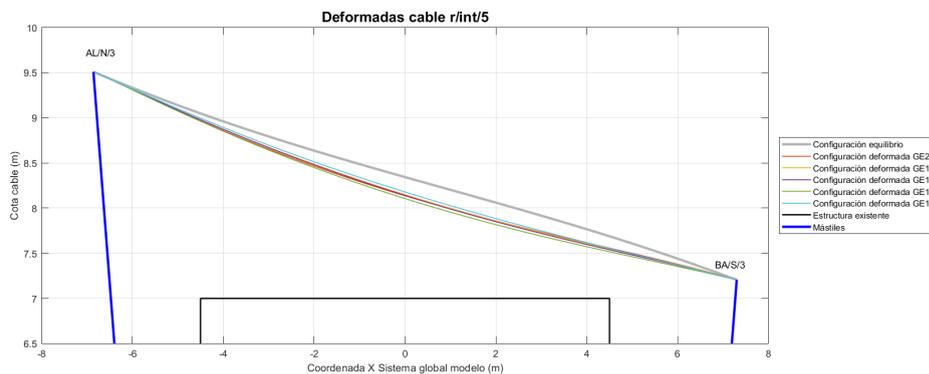


Figura I.4.31: Configuraciones deformadas del cable r/int/5 en combinaciones GE2, GE10, GE11, GE12 y GE17. Elaboración: Propia.

El último aspecto relativo a los desplazamientos que se evalúa, únicamente a modo de establecer una comparación entre el comportamiento de esta estructura con los límites establecidos en las estructuras convencionales, es la proporción entre los desplazamientos horizontales de las cabezas de los mástiles y la altura de éstos. A partir de los resultados mostrados en la Tabla I.4.20 correspondientes a las combinaciones de la Guía Europea, que son equivalentes a las combinaciones características del Eurocódigo, se calcula el ratio desplazamiento/altura de cada mástil en la combinación de mayor desplazamiento horizontal, que se muestra en la Tabla I.4.31.

Mástil	Comb.	u_H [mm]	Z [mm]	Ratio
BA/S/1	GE4	8,52	7210	1/846
AL/S/1	GE10	15,68	8.807	1/562
BA/S/2	GE10	14,94	7.206	1/482
AL/S/2	GE2	26,6	8.810	1/331
BA/S/3	GE6	15,79	7.206	1/456
AL/S/3	GE11	17,32	8.807	1/508
BA/S/4	GE6	13,25	7.210	1/544
AL/N/1	GE11	13,03	9.513	1/730
BA/N/1	GE11	13,9	7.406	1/533
AL/N/2	GE12	23,6	9.508	1/403
BA/N/2	GE12	21,6	7.408	1/343
AL/N/3	GE12	23,7	9.508	1/401
BA/N/3	GE4	16,88	7.406	1/439
AL/N/4	GE9	12,18	9.513	1/781

Tabla I.4.31: Desplazamientos máximos por mástil en combinaciones de la Guía Europea.
Elaboración: Propia.

Se indica en el Eurocódigo 3 que el límite a estos desplomes horizontales es de 1/500 la altura total del edificio para poder admitir que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral. Se observa que en los mástiles centrales de las alineaciones, esta relación es superada, con lo que no cumpliría los requisitos propios de los edificios. No se considera hacer un nuevo dimensionamiento al entender que en este tipo de estructuras este valor de desplomes es perfectamente tolerable, ni haber observado en los textos consultados que estos desplazamientos horizontales de los mástiles debieran ser un condicionante en el dimensionamiento de este tipo de estructuras.

04.4. Análisis simplificados

Paralelamente al análisis global de la estructura, se realizan análisis simplificados considerando una serie de acciones externas que por sus características no son determinantes para la verificaciones de rotura, y cuya actuación compromete únicamente la estabilidad de componentes estructurales aislados y no de la estructura global. Estas acciones son el sismo (A_1), las operaciones de mantenimiento (Q_3) y la carga equivalente (Q_{el}) indicada en la Norma UNE-EN 13782.

Se evalúan también posiciones de cargas asimétricas o parciales que, a diferencia de la nieve o el viento, no actúen sobre toda la estructura y puedan ser más críticas para elementos aislados.

Se verifica que no se produzcan esfuerzos más desfavorables que los observados en el análisis global, que no se produzcan desplazamientos en la estructura de mayor magnitud que los observados en el análisis global, y que no se llegue a producir la pérdida de tensión en ninguno de los cables que la estabilizan, lo que supondría la pérdida del equilibrio.

Todos estos análisis son realizados con el mismo software que el análisis global y se detallan a continuación las consideraciones, metodología y resultados de cada uno de ellos.

04.4.1. Análisis acción sísmica

La primera de estas acciones analizada es el sismo. Se analiza en solitario, ya que la combinación de ELU con acciones accidentales mostrada en la ecuación 4.7 no considera posible la actuación simultánea de sismo y los eventos meteorológicos de nieve o viento (al ser sus $\psi_{2,i}$ iguales a 0).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4.7)$$

En este caso no se realiza el análisis de la estructura completa, sino que se aíslan un mástil bajo (BA/N/2) y un mástil alto (AL/S/2) internos enfrentados, la relinga interna que une estos mástiles (r/int/4) y los 2 contravientos que estabilizan cada uno de los mástiles (ba/n/2-a, ba/n/2-b, al/s/2-a y al/s/2-b). En la Figura I.4.32 se muestra la parte de estructura modelada para la evaluación del sismo.

No se modela la membrana como elemento estructural, despreciando su contribución a la estabilidad de la estructura en caso de sismo. Este elemento se considera introduciendo el peso de los dos módulos contiguos (3 y 4) como carga muerta repartida en 3 nodos, las dos cabezas de los mástiles y el punto central de la relinga interna.

El peso de cada uno de los módulos es de 246 kg, se reparte 1/8 del peso de cada módulo en cada mástil y 1/4 del peso de cada módulo en el punto central del cable interno; con lo que supone considerar una masa total de 62 kg en las cabezas de los mástiles y de 123 kg en el centro del cable interno.

Atendiendo a la baja rigidez de la estructura y la dificultad de variar esta característica, con el fin de obtener un rango más amplio de frecuencias propias de la estructura. En

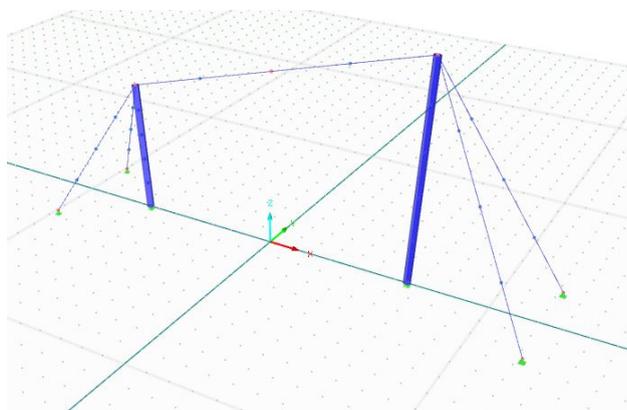


Figura I.4.32: Modelo de la estructura para el caso sísmico. Elaboración: Propia.

primer lugar se considera la masa sísmica con las cargas permanentes únicamente. En segundo lugar se añade el 25 % de la sobrecarga variable, en este caso se toma el valor de $0,2 \text{ kN/m}^2$ de la carga de nieve. Siendo la superficie de cada uno de estos módulos igual a 186m^2 , se consideran $2,3 \text{ kN}$ (237 kg) en las cabezas de los mástiles y $4,7 \text{ kN}$ (474 kg) en el centro de la relinga interior.

Se resumen en la Tabla I.4.32 las masas consideradas en los nodos extremos del cable y en el nodo central en cada uno de los casos de masa.

Nodo	Masa Caso 1	Masa Caso 2
	[kg]	[kg]
Extremo cable	62	299
Centro cable	123	597

Tabla I.4.32: Masas aplicadas para análisis sísmico. Elaboración: Propia.

Estas masas se añaden al peso propio de los elementos de estructura que sí son modelados.

El análisis realizado es del tipo estático mediante espectros de respuesta, sobre una simplificación de la estructura. Para lo que la acción sísmica se considera según el espectro de respuesta elástico definido en la sección 02.3.7.1 del ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO, y mostrado en la Figura I.4.33. En la dirección vertical se considera el 70 % de la aceleración de este espectro.

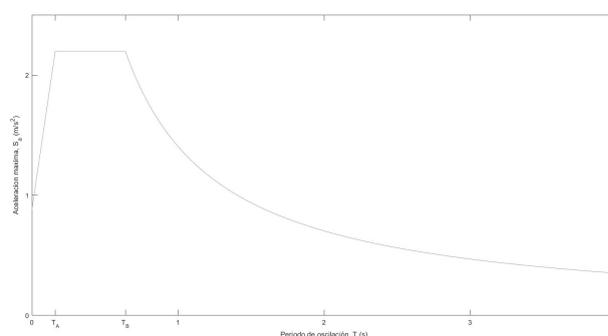


Figura I.4.33: Espectro de respuesta elástica. Elaboración: Propia.

En primer lugar, haciendo uso del módulo adicional *RF-DYNAM Pro - Natural Vibrations* que incorpora RFEM5, se evalúan los casos de vibración natural de la estructura correspondientes a los primeros 20 modos de vibración según el método de la raíz del polinomio característico. Los 20 primeros modos se calculan para ambos casos de masas, se obtienen las frecuencias naturales mostradas en la Tabla I.4.33.

Modo	Frecuencias naturales	
	Caso masa 1 [Hz]	Caso masa 2 [Hz]
1	3,145	1,521
2	3,182	1,536
3	7,664	6,316
4	7,778	7,702
5	9,574	9,559
6	9,607	9,607
7	9,608	9,608
8	9,985	9,799
9	15,02	12,859
10	15,338	13,737
11	15,388	14,785
12	15,551	15,338
13	15,748	15,496
14	15,749	15,518
15	15,87	15,748
16	16,022	15,749
17	17,655	15,824
18	18,145	15,827
19	18,942	16,725
20	18,942	18,942

Tabla I.4.33: Frecuencias naturales. Elaboración: Propia.

Posteriormente, haciendo uso del módulo adicional *RF-DYNAM Pro - Forced Vibrations*, se evalúa el comportamiento de la estructura con un análisis de espectros de respuesta multimodal.

Se utiliza la regla de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) para la combinación de las respuestas modales, y la regla de combinación del 30 % para la combinación de las componentes horizontales.

04.4.1.1. Resultados

Tras este análisis se obtienen como resultado los esfuerzos en cables y barras y los desplazamientos de la estructura que introduce la acción dinámica.

En la Tabla I.4.34 se muestran los incrementos de esfuerzo axial que se producen en los mástiles por la acción del sismo, en la Tabla I.4.35 se muestran los incrementos de esfuerzo axial que se producen en los cables, y en la Tabla I.4.36 se muestran los desplazamientos que se producen en las cabezas de los mástiles y en el centro del cable.

Mástil	Caso 1	Caso 2
	N_{dyn} [kN]	N_{dyn} [kN]
BA/N/2	-0,16	-1,16
AL/S/2	-0,15	-0,99

Tabla I.4.34: Axiles producidos por sismo en mástiles. Elaboración: Propia.

Cable	Caso 1	Caso 2
	N_{dyn} [kN]	N_{dyn} [kN]
r/int/4	0,06	0,38
ba/n/2-a	0,34	0,9
ba/n/2-b	0,34	0,9
al/s/2-a	1,06	1,12
al/s/2-b	1,06	1,12

Tabla I.4.35: Axiles producidos por sismo en cables. Elaboración: Propia.

Nudo	Caso 1	Caso 2
	$ u_{dyn} $ [mm]	$ u_{dyn} $ [mm]
Mástil BA/N/2	0	0,1
Mástil AL/S/2	0,14	0,32
Cable r/int/4	1,77	6,74

Tabla I.4.36: Desplazamientos producidos por sismo. Elaboración: Propia.

Observando los resultados obtenidos, se concluye que la estabilidad de la estructura no se vería comprometida por la acción del sismo, y los efectos que en esta se producirían no serían relevantes en comparación con los que producen los eventos meteorológicos considerados en el análisis global.

04.4.2. Análisis operaciones de mantenimiento

El segundo análisis realizado comprende la evaluación de los efectos sobre la estructura de un eventual acceso a la cubierta para la realización de labores de mantenimiento. Se excluye esta acción de los casos de combinación de viento y nieve al no considerarse compatible, ni aconsejable, la presencia de operarios sobre la membrana de forma simultánea a temporales de viento de periodo de retorno de 50 años, ni de forma simultánea a la acumulación de nieve sobre la cubierta.

Esta acción se considera como una carga puntual $Q_3 = 1,50$ kN, aplicada en diversos puntos de la mitad Este de la estructura (módulos 4, 5 y 6), como son: las cabezas de cada uno de los 8 mástiles presentes en esta mitad de la estructura, 3 puntos intermedios de las 3 relingas internas (el punto central y los dos puntos a 1/4 de la longitud de los extremos), otros 3 puntos intermedios en las 7 relingas del perímetro, y los puntos centrales de 3 de los módulos. En uno de los módulos centrales y de los módulos extremos se analiza además la aplicación de la carga en los 4 puntos de cada uno de los módulos equidistantes del centro del módulo y las esquinas.

En la Figura I.4.34 se señalan en amarillo los 49 puntos en los que se considera la aplicación de esta carga puntual.

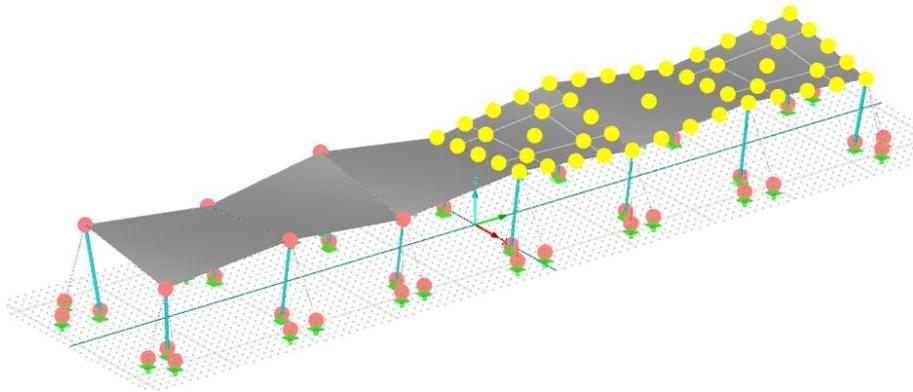


Figura I.4.34: Esquema puntos de aplicación de sobrecarga de mantenimiento Q_3 . Elaboración: Propia.

Atendiendo a las combinaciones de acciones indicadas en el Eurocódigo de Bases de cálculo, la sobrecarga de mantenimiento actuaría como acción dominante ($i=1$) y el viento y la nieve actuaría con su coeficiente ψ_0 de combinación. En este caso no se tiene en cuenta esta posible concomitancia de eventos, por lo que se asume que los coeficientes ψ_0 son iguales a 0. Se considera únicamente la carga de peso propio y el efecto del pretensado acompañando a esta carga de mantenimiento.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{PP} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4.8)$$

04.4.2.1. Resultados

Tras la realización del análisis de la estructura en los distintos casos de carga planteados, se obtienen los resultados siguientes.

En la Tabla I.4.37 se muestran los axiles de compresión máximos ($N_{Max,Q3}$) y mínimos ($N_{Min,Q3}$) en los mástiles de la mitad Este de la estructura causados por la localización más desfavorable de la carga de mantenimiento, además de los axiles de la situación descargada (N_{eq}) y los esfuerzos extremos de las combinaciones ELU del análisis global ($N_{Min,ELU}$ y $N_{Max,ELU}$).

Mástil	$N_{Min,ELU}$ [kN]	$N_{Min,Q3}$ [kN]	N_{eq} [kN]	$N_{Max,Q3}$ [kN]	$N_{Max,ELU}$ [kN]
AL/S/2	266,66	415,75	415,85	422,44	584,5
BA/S/3	196,04	327,07	330,48	333,62	420,42
AL/S/3	410,54	544,85	544,92	549,83	696,26
BA/S/4	601,11	727,53	733,19	734,89	784,61
BA/N/2	157,14	298,27	301,91	303,5	394,16
AL/N/3	332,38	459,83	460,1	468,05	649,87
BA/N/3	277,1	423,56	427,12	428,58	471,88
AL/N/4	704,05	835,45	836,59	843,15	894,13

Tabla I.4.37: Esfuerzos axiles extremos en mástiles por operaciones de mantenimiento.
Elaboración: Propia.

En la Tabla I.4.38 se muestran los axiles de tracción máximos ($N_{Max,Q3}$) y mínimos ($N_{Min,Q3}$) en los cables de la mitad Este de la estructura causados por la localización más desfavorable de la carga de mantenimiento, además de los axiles de la situación descargada (N_{eq}) y los esfuerzos extremos de las combinaciones ELU del análisis global ($N_{Min,ELU}$ y $N_{Max,ELU}$).

Cable	$N_{Min,ELU}$ [kN]	$N_{Min,Q3}$ [kN]	N_{eq} [kN]	$N_{Max,Q3}$ [kN]	$N_{Max,ELU}$ [kN]
al/s/2-a	117,44	186,37	186,65	189,88	258,37
al/s/2-b	116,25	186,81	187,13	189,77	264,03
ba/s/3-a	105,38	200,22	201,57	203,11	257,1
ba/s/3-b	115,13	192,25	195,46	197,07	253,81
al/s/3-a	176,11	246,92	247,48	250,86	297,33
al/s/3-b	183,44	256,93	258,04	259,84	343,29
ba/s/4-a	324,24	398,57	402,09	403,11	446,97
ba/s/4-b	320,37	405,78	408,5	409,11	414,93
ba/n/2-a	98,25	181,07	184,13	184,7	251,12
ba/n/2-b	94,05	182,15	184,58	185,17	254,13

Cable	$N_{\text{Min,ELU}}$ [kN]	$N_{\text{Min,Q3}}$ [kN]	N_{eq} [kN]	$N_{\text{Max,Q3}}$ [kN]	$N_{\text{Max,ELU}}$ [kN]
al/n/3-a	123,72	194,5	195,21	198,42	281,45
al/n/3-b	140,04	194,04	194,38	198,11	275,86
ba/n/3-a	155,63	246,12	249,96	250,94	292,85
ba/n/3-b	158,66	247,23	249,54	250,93	335,06
al/n/4-a	332,08	397,15	398,44	403,39	431,91
al/n/4-b	339,19	389,2	389,82	394,9	427,17

Tabla I.4.38: Esfuerzos axiles extremos en cables por operaciones de mantenimiento. Elaboración: Propia.

En la Tabla I.4.39 se muestran los máximos desplazamientos de cada uno de los mástiles de la mitad Este de la estructura debidos a la sobrecarga de mantenimiento (u_{Q3}), y los desplazamientos (u_{ELU}) de estos mismos puntos con las combinaciones con las acciones de nieve y viento mayoradas (EN).

Mástil	u_{Q3} [mm]	u_{ELU} [mm]
AL/S/2	2,4	41,3
BA/S/3	1,9	23,6
AL/S/3	1,5	28,5
BA/S/4	1,2	20,3
BA/N/2	2,6	31
AL/N/3	2,3	36,4
BA/N/3	1,8	25,9
AL/N/4	1,8	19,8

Tabla I.4.39: Desplazamientos en mástiles por operaciones de mantenimiento. Elaboración: Propia.

En cuanto a las tensiones de la membrana, se observa que las posiciones de carga más desfavorable son aquellas en las que se localiza la carga en el interior de la membrana y cercana a los mástiles bajos. Destaca el caso en los que la carga se sitúa en próxima al mástil BA/N/3 y se observa un aumento de las tensiones en la dirección de la urdimbre que pasa de los 6,20 kN/m del pretensado inicial a 15,79 kN/m en una zona muy localizada. Se observa en la Figura I.4.35 el estado tensional de la membrana alrededor del punto de aplicación de la carga.

Se observa en la Figura I.4.36 cómo en este caso se produce una zona de inversión de la curvatura en torno al punto de aplicación de la carga. Este hecho no se considera relevante al tratarse de una situación temporal de corta duración, reversible y localizada en una zona muy reducida; además de por tratarse de una consecuencia de haber concentrado sobre un punto sin dimensiones toda la carga.

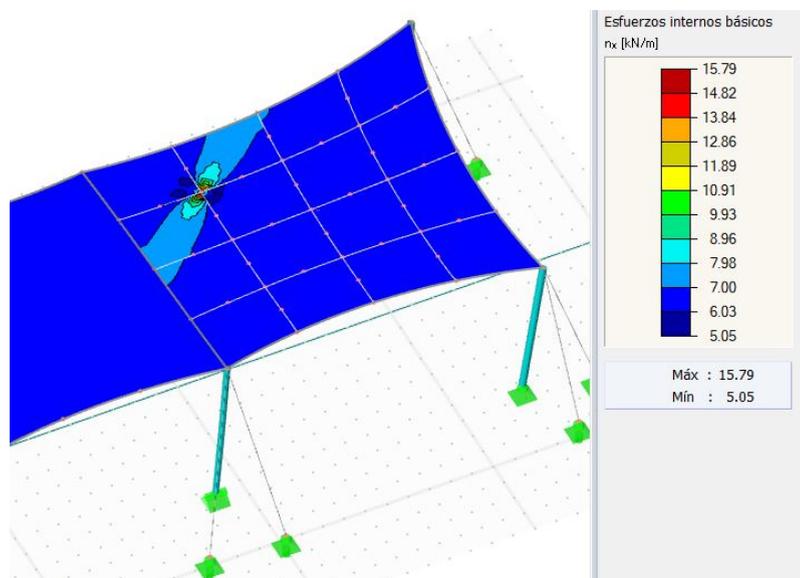


Figura I.4.35: Aumento de tensiones en la dirección de urdimbre de la membrana por sobrecarga de mantenimiento. Elaboración: Propia.

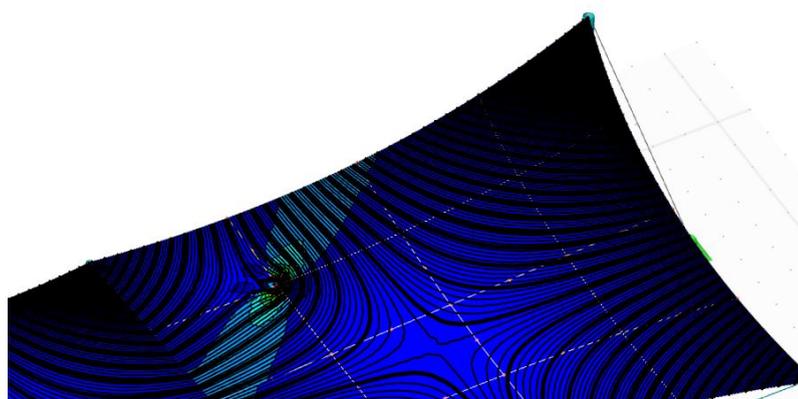


Figura I.4.36: Curvas de nivel de configuración deformada por sobrecarga de mantenimiento aplicada en interior de la membrana. Elaboración: Propia.

Se produce un efecto similar en los casos en que la carga se sitúa sobre las relingas, aunque en este caso el peso es transmitido a los mástiles por los cables principalmente y los valores de los picos de tensiones no son tan significativos. En el caso en que la carga se sitúa en el punto medio de la relinga central ($r/int/4$) por ejemplo, se observa un aumento de las tensiones en la dirección de la urdimbre que pasa de los 6,20 kN/m del pretensado inicial a 7,30 kN/m.

En cuanto a la reducción de las tensiones en el tejido, se observa que el caso más crítico es también la localización de la carga en el interior de la membrana y equidistante al centro del módulo y el mástil bajo. Un ejemplo es el caso en el que la carga se sitúa próxima al mástil BA/N/2, donde se observa que se forman unas bandas en la dirección de la urdimbre en las que disminuye la tensión en la dirección de la trama de los 6,20 kN/m del pretensado inicial a 4,39 kN/m. Se observa en la Figura I.4.38 el estado tensional de la membrana alrededor del punto de aplicación de la carga.

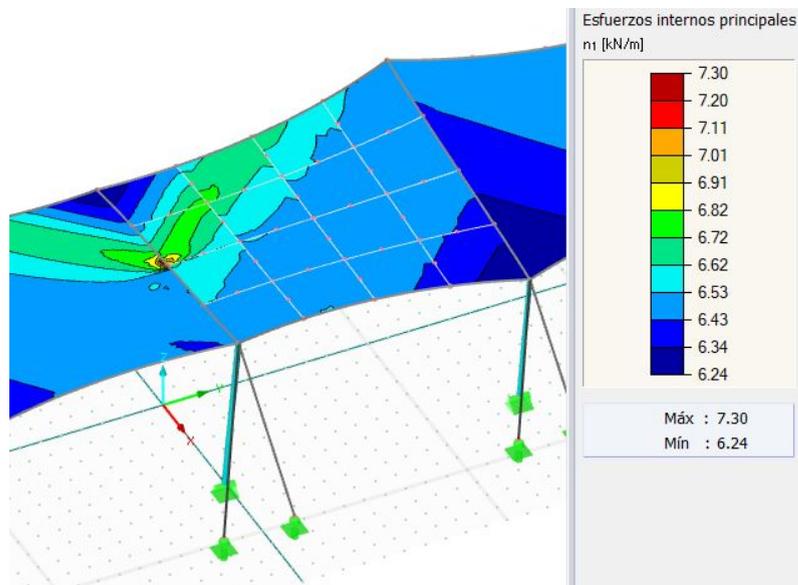


Figura I.4.37: Aumento de tensiones en la dirección de urdimbre de la membrana por sobrecarga de mantenimiento. Elaboración: Propia.

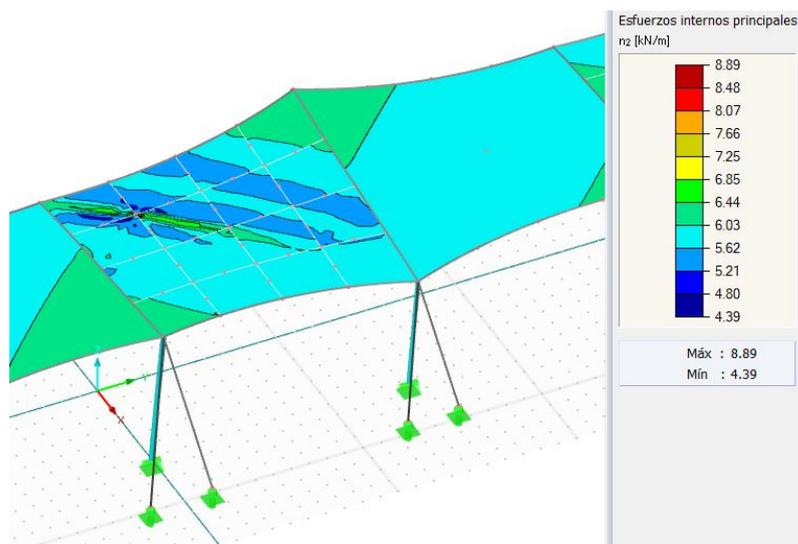


Figura I.4.38: Disminución tensiones en la dirección de trama de la membrana por sobrecarga de mantenimiento. Elaboración: Propia.

A la vista de estos resultados, se puede observar cómo la presencia de operarios o maquinaria sobre la membrana para labores de mantenimiento, aún siendo una operación poco recomendable de realizar, no supone un estado en la estructura más crítico del que se produce bajo la acción de las acciones meteorológicas. El estado tensional de la estructura en la realización de operaciones de mantenimiento no se aleja apenas del estado tensional en la configuración de equilibrio.

04.4.3. Análisis carga equivalente

El último análisis simplificado que se lleva a cabo considera la aplicación sobre la estructura de la carga equivalente indicada en la Norma UNE-EN 13782. Se analiza de forma aislada al resto de acciones, ya que la combinación de acciones que recoge esta Norma (ecuación 4.9) así lo indica. Como coeficientes parciales de las acciones se consideran $\gamma_G = 1,35$ y $\gamma_{el} = 1,35$.

$$\gamma_G G_k + \gamma_{Q,el} Q_{k,el} \quad (4.9)$$

Se entiende esta carga no como una acción que lleve asociada un significado físico, sino como un valor orientativo de presión superficial ($q_{el} = 0,1 \text{ kN/m}^2$) para estudiar estados asimétricos de carga sobre la estructura, que por su distribución singular sobre la membrana puedan ser estados de carga más desfavorables en el estado de la estructura que las acciones externas reales en las que las cargas se aplican sobre la totalidad de la membrana. Se analiza un total de 40 distribuciones de carga.

Se considera esta carga superficial repartida totalmente sobre los módulos de la forma siguiente:

- Individualmente en cada uno de los módulos. (6 casos reducidos a 3 por la simetría de la estructura)
- En módulos alternos. (2 casos)
- En dos módulos contiguos. (5 casos reducidos a 3 por la simetría de la estructura)

Se considera esta carga superficial repartida parcialmente sobre varios módulos (4, 5 y 6) de la forma siguiente:

- En cada una de las 4 mitades según las direcciones globales de la estructura de forma individual. (4 casos por módulo, 12 casos)
- En todas las mitades norte de los módulos de forma simultánea, y en todas las mitades sur. (2 casos)
- En cada uno de los cuadrantes de los módulos según las direcciones globales de la estructura de forma individual. (4 casos por módulo, 12 casos)
- En los dos cuadrantes diagonalmente opuestos de cada módulo de forma simultánea. (2 casos por módulo, 6 casos)

04.4.3.1. Resultados

En la Tabla I.4.40 se muestran los axiles de compresión máximos ($N_{Max,el}$) y mínimos ($N_{Min,el}$) en los mástiles de la mitad Este de la estructura causados por la localización más crítica de la carga equivalente, además de los axiles de la situación descargada (N_{eq}) y los esfuerzos extremos de las combinaciones ELU del análisis global ($N_{Min,ELU}$ y $N_{Max,ELU}$).

Mástil	$N_{Min,ELU}$ [kN]	$N_{Min,el}$ [kN]	N_{eq} [kN]	$N_{Max,el}$ [kN]	$N_{Max,ELU}$ [kN]
AL/S/2	266,66	404,34	415,85	482,85	584,5
BA/S/3	196,04	279,35	330,48	327,5	420,42
AL/S/3	410,54	529,94	544,92	605,75	696,26
BA/S/4	601,11	689,31	733,19	737,21	784,61
BA/N/2	157,14	248,14	301,91	304,24	394,16
AL/N/3	332,38	440,61	460,1	530,56	649,87
BA/N/3	277,1	375,11	427,12	428,69	471,88
AL/N/4	704,05	813,78	836,59	874,72	894,13

Tabla I.4.40: Esfuerzos axiles extremos en mástiles por carga equivalente. Elaboración: Propia.

Se observa que una distribución asimétrica de cargas sí tiene efectos significativos en el estado de los mástiles. En los mástiles altos, aumentan notablemente los axiles que se tienen en comparación con el estado de equilibrio, aunque sin llegar a los valores que se producen bajo las acciones de nieve o viento, y por tanto sin llegar a los valores máximos que resisten los elementos; en cuanto a los axiles mínimos, es baja la diferencia entre los valores que se obtienen y los axiles en la configuración de equilibrio.

En los mástiles bajos, apenas se aprecia efecto en los axiles máximos. En la mayoría de los casos de carga, los axiles que se obtienen son menores al que se produce en estos mástiles en la situación de equilibrio, aunque en ningún caso la reducción de los axiles llega a ser de la misma magnitud que la que producen los casos de nieve o viento. Se trata de un hecho esperable ya que este tipo de cargas producen una reducción del pretensado en la curvatura convexa de la membrana, que es aquella que lleva la misma orientación que las diagonales que unen estos mástiles bajos.

En la Tabla I.4.41 se muestran los axiles de tracción máximos ($N_{Max,el}$) y mínimos ($N_{Min,el}$) en los cables de la mitad Este de la estructura causados por la localización más crítica de la carga equivalente, además de los axiles de la situación descargada (N_{eq}) y los esfuerzos extremos de las combinaciones ELU del análisis global ($N_{Min,ELU}$ y $N_{Max,ELU}$).

Cable	$N_{Min,ELU}$ [kN]	$N_{Min,el}$ [kN]	N_{eq} [kN]	$N_{Max,el}$ [kN]	$N_{Max,ELU}$ [kN]
al/s/2-a	117,44	182,67	186,65	218,62	258,37
al/s/2-b	116,25	183,75	187,13	218,62	264,03
ba/s/3-a	105,38	165,24	201,57	203,85	257,1
ba/s/3-b	115,13	165,31	195,46	198,59	253,81
al/s/3-a	176,11	240,42	247,48	273,74	297,33
al/s/3-b	183,44	248,37	258,04	292,03	343,29
ba/s/4-a	324,24	369,81	402,09	419,89	446,97
ba/s/4-b	320,37	380,24	408,5	409,84	414,93
ba/n/2-a	98,25	153,7	184,13	192,45	251,12
ba/n/2-b	94,05	153,7	184,58	190,4	254,13

Cable	$N_{Min,ELU}$ [kN]	$N_{Min,el}$ [kN]	N_{eq} [kN]	$N_{Max,el}$ [kN]	$N_{Max,ELU}$ [kN]
al/n/3-a	123,72	189,6	195,21	229,06	281,45
al/n/3-b	140,04	190,67	194,38	228,27	275,86
ba/n/3-a	155,63	216,63	249,96	259	292,85
ba/n/3-b	158,66	217,53	249,54	261,66	335,06
al/n/4-a	332,08	386,25	398,44	426,47	431,91
al/n/4-b	339,19	388,06	389,82	419,58	427,17

Tabla I.4.41: Esfuerzos axiales extremos en cables por carga equivalente. Elaboración: Propia.

En los cables se observan los mismos hechos que en los mástiles: los cables que estabilizan los mástiles altos en los casos más críticos aumentan su tensión sin llegar en ningún caso a la máxima alcanzada en las combinaciones ELU, y apenas ven reducida su tensión respecto del estado de equilibrio; mientras que en el caso de los cables que estabilizan los mástiles bajos apenas se incrementa la tensión en los casos más críticos, y la reducción que se produce es menor que la que se produce en el caso ELU más desfavorable.

En la Tabla I.4.42 muestran los máximos desplazamientos de cada uno de los mástiles de la mitad Este de la estructura debidos a la carga equivalente (u_{el}), y los desplazamientos (u_{ELU}) de estos mismos puntos con las combinaciones con las acciones de nieve y viento mayoradas (EN). No se realiza la comparación con los resultados de desplazamientos en las combinaciones de servicio (GE) debido a que la combinación de acciones que se establece en la Norma no indica que esta carga se deba considerar sin mayorar.

Mástil	u_{el} [mm]	u_{ELU} [mm]
AL/S/2	14,1	41,3
BA/S/3	9,2	23,6
AL/S/3	8,6	28,5
BA/S/4	6	20,3
BA/N/2	12,6	31
AL/N/3	12,6	36,4
BA/N/3	8,7	25,9
AL/N/4	7	19,8

Tabla I.4.42: Desplazamientos en mástiles por carga equivalente. Elaboración: Propia.

En lo referente a las tensiones producidas en la membrana, se aprecia que las máximas tensiones en la dirección de la urdimbre se producen en los casos en los que se cargan enteramente los módulos. Como es el caso en el que se cargan los dos módulos centrales, en los que esta tensión aumenta de los 6,20 kN/m iniciales hasta 9,32 kN/m. Se muestra en la Figura I.4.39 la distribución de tensiones que se produce en este caso. Las mínimas tensiones en la dirección de la trama se tienen también en estos casos en los

que se cargan por completo los módulos. Como es el caso en el que se cargan el módulo extremo y el contiguo a este, en el que la tensión disminuye de los 6,20 kN/m iniciales hasta 3,40 kN/m. Se muestra en la Figura I.4.40 la distribución de tensiones que se produce en este caso.

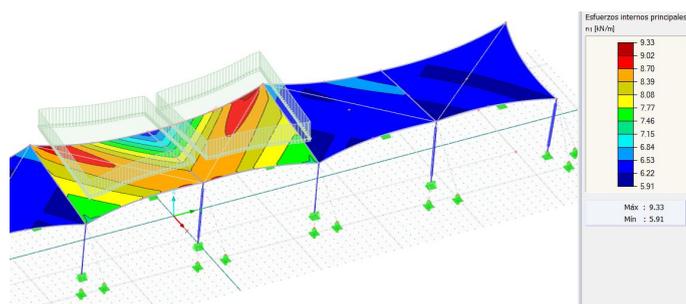


Figura I.4.39: Distribución de tensiones en la dirección de la urdimbre con carga equivalente en dos módulos contiguos. Elaboración: Propia.

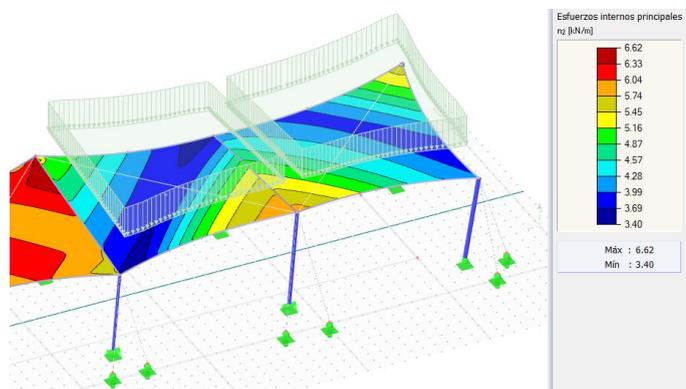


Figura I.4.40: Distribución de tensiones en la dirección de la trama con carga equivalente en dos módulos contiguos. Elaboración: Propia.

En los casos en los que la carga no se aplica sobre toda la superficie del módulo, se observa que los efectos más desfavorables en las tensiones máximas se obtienen cuando la carga se aplica en los dos cuadrantes del módulo próximos a los mástiles altos, es decir, cuando se concentra en torno a la zona de mayor concavidad de la membrana. En el caso en que se considera este caso de carga en el módulo 5, se observa un aumento de las tensiones en la dirección de esta curvatura (urdimbre) de los 6,20 kN/m iniciales hasta 8,51 kN/m. Se muestra en la Figura I.4.41 la distribución de tensiones que se produce en este caso.

Las mínimas tensiones en la dirección de la trama se obtienen cuando se considera la carga en los dos cuadrantes de los mástiles bajos del módulo, zona de mayor convexidad de la membrana. En el caso en que se considera este caso de carga en el módulo 4, se observa una disminución de las tensiones de los 6,20 kN/m iniciales hasta 4,15 kN/m, con lo que no llega a producirse la pérdida de tensión. Se muestra en la Figura I.4.42 la distribución de tensiones que se produce en este caso.

Las aplicaciones de carga en el resto de casos producen los mismos efectos, esperables en el comportamiento de membranas de doble curvatura ante cargas gravitacionales, como es el aumento de la tensión en la curvatura cóncava (urdimbre) y disminución en la curvatura convexa (trama), pero con menor magnitud de las desviaciones indicadas previamente.

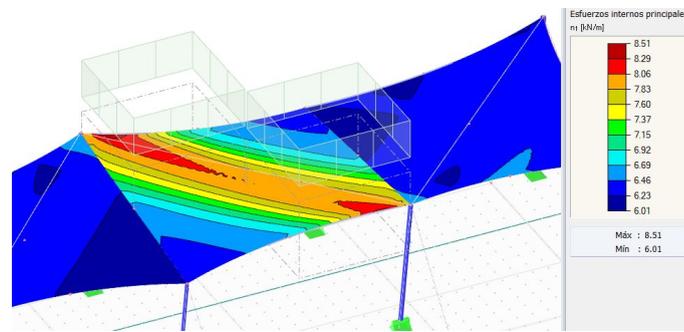


Figura I.4.41: Distribución de tensiones en la dirección de la urdimbre con carga equivalente en cuadrantes contiguos a los mástiles altos. Elaboración: Propia.

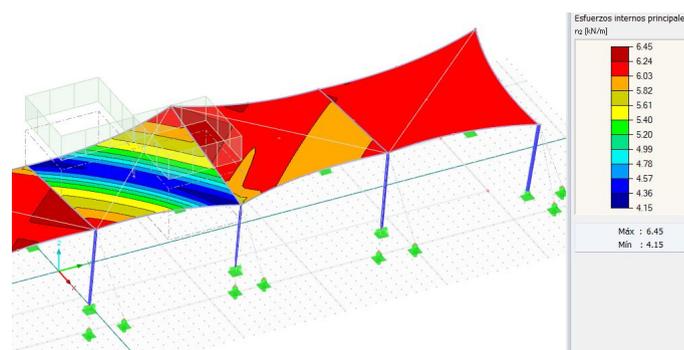


Figura I.4.42: Distribución de tensiones en la dirección de la trama con carga equivalente en cuadrantes contiguos a los mástiles bajos. Elaboración: Propia.

A la vista de estos resultados, se puede observar cómo estas distribuciones asimétricas de carga sobre la membrana, no llegan a suponer un estado en la estructura más crítico de lo que suponen las acciones meteorológicas.

04.5. Diseño de cimentaciones

Junto con el análisis global de la estructura y los análisis simplificados, se realiza el dimensionamiento y cálculo de los elementos de cimentación. Se toman como datos de partida las reacciones obtenidas en los apoyos de los mástiles y anclajes de los cables, en las combinaciones de ELU y ELS del análisis global.

Este tipo de estructuras en las que se requiere que todos los elementos estructurales se encuentren sometidos a tracciones o compresiones para soportar las acciones externas, esto conlleva a que se lleguen a transmitir al terreno reacciones tanto ascendentes (tracciones) como descendentes (compresiones). Por lo que se dimensionan los apoyos de los mástiles para resistir fuerzas de hundimiento, y los apoyos de los cables para resistir fuerzas de levantamiento.

Las cimentaciones de los mástiles se resuelven mediante zapatas cuadradas. Se definen 5 tipos de zapatas en función de los valores de las reacciones que se tienen en cada mástil y el espacio en planta disponible. En la Tabla I.4.43 se describen las dimensiones de cada uno de los tipos de zapatas dispuestos y los mástiles en cuyas bases se disponen. La dimensión L se orienta según la dirección del eje Y (paralelo al lado largo del espacio de juego) del sistema de referencia, y la dimensión B según la dirección del eje X (paralelo al lado corto).

Tipo	L [m]	B [m]	D [m]	$e_{G,L}$ [m]	$e_{G,B}$ [m]	Mástiles
Z1	1,6	1,6	0,75	0	0,20	BA/N/2, BA/S/2, BA/S/3
Z2	1,8	1,8	0,75	0	0,20	BA/N/1, BA/N/3, AL/S/2
Z3	2,0	2,0	0,75	0	0,20	AL/N/2, AL/N/3, AL/S/1, AL/S/3
Z4	2,2	2,2	0,75	0,15	0,15	BA/S/1, BA/S/4
Z5	2,4	2,4	0,75	0,15	0,15	AL/N/1, AL/N/4

Tabla I.4.43: Tipos de zapatas proyectados. Elaboración: Propia

Se introducen excentricidades en las cimentaciones para compensar los momentos generados por la componente horizontal de la resultante. En las cimentaciones interiores se desfasa el apoyo una distancia $e_{G,B}$ desde el centro geométrico de la zapata hacia el exterior, en la dimensión B de las zapatas. En dirección L no se realiza ningún desfase $e_{G,L}$ pues los valores de la componente horizontal en esa dirección son despreciables. En las cimentaciones de esquina se disponen excentricidades en ambas direcciones, ya que al estar el mástil rotado 50° en planta respecto de la dirección B , la resultante horizontal también tiene componente en L de valor significativo.

Las cimentaciones de los cables se resuelven mediante anclajes pasivos permanentes con inyección repetitiva y selectiva. Son anclajes que utilizan una longitud de adherencia formada por una lechada de cemento para transmitir la fuerza de tracción al terreno.

En la práctica real, los anclajes deberían utilizarse únicamente tras haber sido verificados

mediante ensayos de investigación o adecuación, o mediante experiencia comprobable. Se asume que en este caso se realizarían ensayos previos para verificar la resistencia de los anclajes proyectados, realizando las modificaciones que se deduzcan de dichos ensayos.

Se considera un acero Y1860S7, con una carga unitaria de rotura de 1.860 MPa para los tirantes. Atendiendo a los tipos de anclajes disponibles en bases de datos de construcción consultadas [IVE, 2022], lo más común en los tirantes es disponer cables $\phi 0,6''$, por lo que se utilizan varios cables de este diámetro en función del rango de tensiones del anclaje. Se considera un valor de resistencia característica $f_{ck} = 25$ MPa en el material empleado en la lechada, como diámetro de la inyección se dispone también el valor más habitual en las bases de datos de 152 mm. En la Tabla I.4.44 se describen las dimensiones de cada uno de los tipos de anclajes dispuestos (Diámetro de la inyección D_N , longitud del bulbo de anclaje L_b , número de cables y área de acero del tirante A_T , longitud libre de anclaje L_{lib} , e inclinación del anclaje respecto la dirección vertical).

Se considera en todos los casos una presión de inyección de 10 kp/cm².

Tipo	D_N [m]	L_b [m]	Cables [Ud]	A_T [mm ²]	L_{lib} [m]	Incl [deg]
A1	0,152	6	3	547,2	4,5	15
A2	0,152	8	4	729,7	4,5	15
A3	0,152	10	5	912,1	4,5	15

Tabla I.4.44: Tipos anclajes proyectados. Elaboración: Propia.

04.5.1. Bases de cálculo

04.5.1.1. Cálculo de zapatas

Según se recomienda en el anejo nacional del EC7, se utiliza el enfoque de proyecto 2, lo que supone que en las verificaciones se aplican los coeficientes parciales de seguridad a las acciones y a las resistencias del terreno.

Debe comprobarse que no se producirá un estado límite de rotura o deformación excesiva con ninguna de las combinaciones de coeficientes parciales:

$$A1 + M1 + R2$$

(A para acciones, M para parámetros del suelo, R para resistencias)

Los coeficientes parciales considerados en las acciones son los mostrados en la Tabla I.4.45. Debido a que el análisis global se realiza mediante un análisis no lineal, en el que no se contempla la superposición de efectos de las acciones, los coeficientes parciales se aplican a los valores de las acciones. Para el conjunto A1 se utilizan los resultados obtenidos en las combinaciones ELU del análisis global de la estructura.

Los coeficientes parciales considerados en los parámetros geotécnicos son los mostrados en la Tabla I.4.46, de los cuales se utilizan los correspondientes al enfoque A1.

Acción		Símbolo	Conjunto	
			A1	A2
Permanente	Desfavorable	γ_G	1,35	1
	Favorable		1	1
Variable	Desfavorable	γ_Q	1,5	1,3
	Favorable		0	0

Tabla I.4.45: Coeficientes parciales para las acciones (γ_F) o efectos de las acciones (γ_E). Fuente: [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016a].

Parámetro geotécnico	Símbolo	Conjunto	
		M1	M2
Ángulo de rozamiento interno en efectivas	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Cohesión efectiva	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistencia al corte sin drenaje	γ_{cu}	1,0	1,4
Resistencia a compresión simple	γ_{qu}	1,0	1,4
Peso específico	γ_{γ}	1,0	1,0

Tabla I.4.46: Coeficientes parciales para los parámetros geotécnicos (γ_M). Fuente: [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016a].

El enfoque 2 supone considerar el conjunto M1 de coeficientes, en el que todos los γ_M son iguales a 1, con lo que los valores de los parámetros geotécnicos considerados no se ven reducidos por los coeficientes parciales. Estos valores de los parámetros geotécnicos son los mostrados en la Tabla I.4.47.

Parámetro geotécnico	Símbolo	Conjunto
		M1
Tangente del ángulo de rozamiento interno en tensiones efectivas	$\tan \varphi'$	0,364
Cohesión efectiva	c' (en kp/cm ²)	0,26
Resistencia al corte sin drenaje	c_u (en kp/cm ²)	1,0
Resistencia a compresión simple	q_u (en kp/cm ²)	2,0
Peso específico	γ (en kp/dm ³)	1,8

Tabla I.4.47: Valores de los parámetros geotécnicos a utilizar según el conjunto M1. Fuente: [G2G Consultores, 2018].

Los coeficientes parciales considerados en las resistencias del terreno son los mostrados en la Tabla I.4.48, de los cuales se utilizan los correspondientes al conjunto R2.

Resistencia	Símbolo	Conjunto		
		R1	R2	R3
Hundimiento	$\gamma_{R;v}$	1,0	1,85 (*)	1,0
Deslizamiento	$\gamma_{R;h}$	1,0	1,1	1,0

Tabla I.4.48: Coeficientes parciales de resistencia (γ_R) para las cimentaciones directas. Fuente: [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016a].

(*) Se considera el coeficiente $\gamma_{R;v} = 1,85$ indicado en el anejo nacional para “Otras estructuras”, en lugar del $\gamma_{R;v} = 1,40$ indicado en el texto del EC7, debido a la recomendación del anejo de disponer un $\gamma_{R;v}$ que haga que el factor de seguridad frente a hundimiento ($FS = \gamma_F \cdot \gamma_{R;v} = 3$) sea más próximo a 3 que a 2.

04.5.1.2. Cálculo de anclajes a tracción

En el cálculo de los anclajes, se atiende por un lado a los procedimientos indicados en el EC7, y por otro lado a los indicados en la “Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera” [Dirección General de Carreteras, 2001].

El Eurocódigo indica considerar la combinación 2 del enfoque de proyecto 1.

$$A2 + M2 + R4$$

En este caso se aplican los coeficientes parciales a los parámetros geotécnicos y a las resistencias.

En las acciones, el conjunto 2 supone considerar únicamente un coeficiente de 1,30 para las acciones variables desfavorables, pero se indica la aplicación de un coeficiente parcial de mayoración de las combinaciones de Estado Límite de Servicio ($\gamma_{Serv} 1,35$), para considerar la acción de cálculo sobre los anclajes ($E_{ULS;d}$) como el mayor valor entre ($E_{ULS;d}; \gamma_{Serv} E_{Serv;k}$).

El conjunto R4 considera la aplicación de coeficientes parciales a las resistencias $\gamma_{a;ULS} = 1,1$ para las verificaciones en los estados límite últimos.

En la Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera se indica de igual manera la aplicación de un coeficiente parcial de mayoración a los efectos de las combinaciones de ELS, pero en cambio el valor de este coeficiente es de 1,50 y los efectos de las acciones a considerar son directamente los resultados de esta mayoración y no los de las combinaciones de ELU (menores en cualquier caso).

En las capacidades del terreno, se consideran los coeficientes de minoración $F_{2c} = 1,60$ para la cohesión, y $F_{2\varphi} = 1,35$ para la fricción. El primero de ellos equivaldría al producto $\gamma_{c'} \cdot \gamma_{a;ULS}$ según el EC7, y el segundo a $\gamma_{\varphi'} \cdot \gamma_{a;ULS}$.

En la Tabla I.4.49 se comparan los coeficientes a emplear según las indicaciones del EC7 y de la Guía de la Dirección General de Carreteras.

Parámetro		Eurocódigo 7	Guía DGC
Tangente del ángulo de rozamiento en efectivas	$\tan \varphi'$	$\gamma_{\varphi'} \cdot \gamma_{a;ULS}$ 1,375	$F_{2\varphi}$ 1,35
Cohesión efectiva	c'	$\gamma_{c'} \cdot \gamma_{a;ULS}$ 1,375	F_{2c} 1,6
Peso específico	γ	γ_{γ} 1	N.A. [-]
Efectos acciones ELS	$E_{Serv,k}$	γ_{Serv} 1,35	F_1 1,5

Tabla I.4.49: Comparación coeficientes parciales cálculo de anclajes según Eurocódigo 7 y Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera. Fuentes: [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016a] [Dirección General de Carreteras, 2001].

Se escoge la aplicación de los coeficientes parciales recomendados en la Guía de la DGC, al resultar en este caso unos valores globales mayores. Siendo por tanto un enfoque más conservador y entendiéndose que se cumple también con lo que requerido en el Eurocódigo. Se incluyen además en los procedimientos descritos en esta Guía, unos coeficientes parciales de 1,30 para la tensión de rotura de los tirantes, y de 1,2 para la adherencia entre el tirante y la lechada.

04.5.2. Comprobaciones geotécnicas en zapatas

En las zapatas se realizan tres tipos de comprobaciones geotécnicas según lo dispuesto en el EC7. Por un lado, se realizan las comprobaciones de estados límite último de hundimiento y deslizamiento con las combinaciones de los conjuntos $A1 + M1 + R2$; por otro lado, se realizan las comprobaciones estado límite de asentamientos con la combinación de acciones característica.

04.5.2.1. Comprobación de hundimiento

Se considera suficiente la capacidad portante del terreno si para todos los estados últimos se cumple que:

$$V_d \leq R_d \quad (4.10)$$

El valor de cálculo de la acción vertical V_d incluye la componente vertical de los axiles de los mástiles según la combinación considerada, y el peso de la cimentación multiplicado por el coeficiente parcial $\gamma_{E,G} = 1,35$ al considerarse como un efecto desfavorable.

El valor de cálculo de la resistencia a hundimiento R_d se calcula aplicando a la carga de hundimiento los coeficientes de seguridad parciales de resistencia, por lo que la desigualdad que debe verificarse resulta finalmente:

$$R_Z + \gamma_{E,G_{cim}} V_C \leq \frac{q_h \cdot (B' \cdot L')}{\gamma_R}$$

La carga de hundimiento q_h para una zapata apoyada en una base plana se estima según la ecuación 4.11:

$$q_h = c' \cdot N_c \cdot d_c \cdot s_c \cdot i_c + q \cdot N_q \cdot d_q \cdot s_q \cdot i_q + \frac{1}{2} \cdot B' \cdot \gamma \cdot N_{\gamma} \cdot d_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot i_{\gamma} \quad (4.11)$$

Donde q se corresponde con la tensión en la cota del plano de apoyo de la zapata previamente a la ejecución de la cimentación, $q = \gamma \cdot D$.

Se utilizan los factores de capacidad de carga:

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi' = 19,323$$

$$N_q = \frac{1 + \operatorname{sen} \varphi'}{1 - \operatorname{sen} \varphi'} \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi'} = 9,603$$

$$N_\gamma = 1,5 \cdot (N_q - 1) \tan \varphi' = 5,746$$

Se utilizan los coeficientes de inclinación de la resultante:

$$i_c = \frac{i_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1}$$

$$i_q = \left(1 - 0,7 \cdot \frac{H_B}{V}\right)^3 \cdot \left(1 - \frac{H_L}{V}\right)$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H_B}{V}\right)^3 \cdot \left(1 - \frac{H_L}{V}\right)$$

Se utilizan los coeficientes de forma:

$$s_c = 1 + 0,2 \cdot \frac{B'}{L'}$$

$$s_q = 1 + 1,5 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{B'}{L'}$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \cdot \frac{B'}{L'}$$

Para el caso en que $D > 2$ m, se utilizan los coeficientes de profundidad:

$$d_c = 1 + 0,34 \arctan(D/B')$$

$$d_q = 1 + 2 \cdot \frac{N_q}{N_c} \cdot (1 - \sin \varphi)^2$$

$$d_\gamma = 1$$

Las dimensiones efectivas de la cimentación, B' y L' , se calculan como:

$$B' = B - 2e_B = B - 2 * \left| \frac{M_B}{V} \right| = B - 2 * \left| \frac{D \cdot H_B - e_{GeomB} \cdot R_Z}{V} \right|$$

$$L' = L - 2e_L = L - 2 * \left| \frac{M_L}{V} \right| = L - 2 * \left| \frac{D \cdot H_L - e_{GeomL} \cdot R_Z}{V} \right|$$

En la Tabla I.4.50 se muestran las componentes de la resultante según los ejes globales en cada una de las cimentaciones para su combinación (Comb.) más desfavorable (aquella en la que resulta un menor factor de seguridad R_d/V_d), y las dimensiones de las cimentaciones. El peso de las cimentaciones V_C se calcula como $V_C = L \cdot B \cdot D \cdot \gamma_C$, el valor de cálculo de la acción vertical V_d comprende el peso de la cimentación mayorado según el coeficiente parcial y la componente vertical de la fuerza transmitida por el mástil. La componente de la reacción R_Y corresponde con la fuerza H_L considerada en el cálculo de las cimentaciones, la componente de la reacción R_X corresponde con la fuerza H_B .

Mástil	Comb.	R _Z [kN]	R _Y [kN]	R _X [kN]	L [m]	B [m]	D [m]	V _C [kN]	V _d [kN]
BA/S/1	53,61	757,02	77,14	78,69	2,2	2,2	0,75	90,75	879,53
AL/S/1	61,78	690,22	0,45	103,09	2	2	0,75	75	791,47
BA/S/2	48,42	417,61	0,1	61,74	1,6	1,6	0,75	48	482,41
AL/S/2	54,43	578,42	0,01	84,09	1,8	1,8	0,75	60,75	660,43
BA/S/3	47,29	415,9	0,06	61,51	1,6	1,6	0,75	48	480,7
AL/S/3	61,83	688,61	0,06	102,89	2	2	0,75	75	789,86
BA/S/4	59,27	776,18	79,5	82,75	2,2	2,2	0,75	90,75	898,69
AL/N/1	51,71	905,89	92,45	93,82	2,4	2,4	0,75	108	1.051,69
BA/N/1	52,62	466,79	0,28	70,89	1,8	1,8	0,75	60,75	548,8
AL/N/2	59,11	641,92	0,02	94,58	2	2	0,75	75	743,17
BA/N/2	56,6	389,89	0,01	57,88	1,6	1,6	0,75	48	454,69
AL/N/3	58,56	642,93	0,02	94,72	2	2	0,75	75	744,18
BA/N/3	53,85	466,54	0,26	70,84	1,8	1,8	0,75	60,75	548,55
AL/N/4	52,85	884,53	91,44	93,39	2,4	2,4	0,75	108	1.030,33

Tabla I.4.50: Cargas y dimensiones cimentaciones mástiles. Elaboración: Propia.

En la Tabla I.4.51 se muestran las excentricidades de la resultante y las dimensiones efectivas de las cimentaciones de los mástiles en las combinaciones más desfavorables.

Mástil	M _L [mkN]	e _L [m]	L' [m]	M _B [mkN]	e _B [m]	B' [m]	A' (m ²) [m ²]
BA/S/1	57,86	0,07	2,07	59,02	0,07	2,07	4,27
AL/S/1	0,34	0	2	77,32	0,1	1,8	3,61
BA/S/2	0,08	0	1,6	46,31	0,1	1,41	2,25
AL/S/2	0,01	0	1,8	63,07	0,1	1,61	2,9
BA/S/3	0,05	0	1,6	46,13	0,1	1,41	2,25
AL/S/3	0,05	0	2	77,17	0,1	1,8	3,61
BA/S/4	59,63	0,07	2,07	62,06	0,07	2,06	4,26
AL/N/1	69,34	0,07	2,27	70,37	0,07	2,27	5,14
BA/N/1	0,21	0	1,8	53,17	0,1	1,61	2,89
AL/N/2	0,02	0	2	70,94	0,1	1,81	3,62
BA/N/2	0,01	0	1,6	43,41	0,1	1,41	2,25
AL/N/3	0,02	0	2	71,04	0,1	1,81	3,62
BA/N/3	0,2	0	1,8	53,13	0,1	1,61	2,89
AL/N/4	68,58	0,07	2,27	70,04	0,07	2,26	5,13

Tabla I.4.51: Dimensiones equivalentes cimentaciones mástiles. Elaboración: Propia.

En la Tabla I.4.52 se muestran los coeficientes correctores de la carga de hundimiento.

Mástil	i_q	i_γ	i_c	s_q	s_γ	s_c	d_q	d_c
BA/S/1	0,751	0,689	0,705	1,545	0,7	1,2	1	1,118
AL/S/1	0,75	0,658	0,704	1,493	0,729	1,181	1	1,134
BA/S/2	0,754	0,663	0,709	1,481	0,736	1,176	1	1,166
AL/S/2	0,756	0,665	0,71	1,488	0,732	1,179	1	1,148
BA/S/3	0,755	0,663	0,709	1,481	0,736	1,176	1	1,166
AL/S/3	0,751	0,658	0,704	1,493	0,729	1,18	1	1,134
BA/S/4	0,746	0,682	0,699	1,545	0,701	1,199	1	1,119
AL/N/1	0,752	0,689	0,706	1,545	0,7	1,2	1	1,109
BA/N/1	0,752	0,66	0,706	1,487	0,732	1,179	1	1,149
AL/N/2	0,756	0,665	0,711	1,494	0,729	1,181	1	1,134
BA/N/2	0,756	0,665	0,711	1,481	0,736	1,176	1	1,166
AL/N/3	0,756	0,665	0,711	1,494	0,729	1,181	1	1,134
BA/N/3	0,752	0,66	0,706	1,487	0,732	1,179	1	1,149
AL/N/4	0,749	0,685	0,702	1,545	0,7	1,2	1	1,109

Tabla I.4.52: Coeficientes correctores carga hundimiento. Elaboración: Propia.

En la Tabla I.4.53 se muestran las cargas de hundimiento de cada cimentación q_h , el valor de cálculo de la resistencia a hundimiento R_d , y el valor de cálculo de la acción vertical V_d . Se observa que en ninguna de las cimentaciones se supera la resistencia a hundimiento.

Mástil	q [kPa]	q_h [kPa]	$q_h \cdot A'$ [kN]	R_d [kN]	V_d [kN]
BA/S/1	13,24	489,39	2.091,14	1.130,34	879,53
AL/S/1	13,24	480,91	1.734,97	937,82	791,47
BA/S/2	13,24	487,64	1.098,37	593,71	482,41
AL/S/2	13,24	486,61	1.409,3	761,79	660,43
BA/S/3	13,24	487,72	1.098,65	593,86	480,7
AL/S/3	13,24	481,14	1.736,45	938,62	789,86
BA/S/4	13,24	485,32	2.068,71	1.118,22	898,69
AL/N/1	13,24	488,98	2.513,35	1.358,57	1.051,69
BA/N/1	13,24	483,73	1.397,98	755,67	548,8
AL/N/2	13,24	485,41	1.756,27	949,34	743,17
BA/N/2	13,24	488,72	1.101,79	595,56	454,69
AL/N/3	13,24	485,39	1.756,17	949,28	744,18
BA/N/3	13,24	483,8	1.398,25	755,81	548,55
AL/N/4	13,24	486,5	2.496,84	1.349,65	1.030,33

Tabla I.4.53: Valores carga hundimiento. Elaboración: Propia.

04.5.2.2. Comprobación de deslizamiento

Debido a que la carga no es perpendicular a la base de la cimentación, deben comprobarse los cimientos a rotura por deslizamiento en su base. Esta comprobación supone que debe cumplirse para todos los estados límite que:

$$H_d \leq R_d + R_{p;d} \quad (4.12)$$

Como valor de cálculo del empuje horizontal H_d , se considera el módulo de la componente horizontal de las reacciones en los apoyos, calculado como $H_d = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$, en cada una de las combinaciones ELU del análisis global. La resistencia a deslizamiento de cálculo R_d , habiendo considerado el enfoque de proyecto 2, se obtiene como $R_d = (V'_d \tan \delta_k) / \gamma_{R;h}$, por lo que la desigualdad que debe verificarse resulta finalmente:

$$\sqrt{R_x^2 + R_y^2} \leq \frac{V'_d \tan \delta_k}{\gamma_{R;h}} = \frac{V'_d \tan 24}{1,1}$$

Como ángulo de rozamiento de cálculo δ_k , se considera el valor del ángulo de rozamiento interno φ' . No se considera el efecto de fuerza resistente $R_{p;d}$ producida por los empujes de tierra en el lateral de la cimentación pues es una fuerza variable y se desconoce si el suelo frente al cimiento será eliminado. Se consideran H_d y R_z como acciones dependientes, por lo que no es posible establecer combinaciones en las cuales se pudiera obtener una mayoración de H_d y una minoración de R_z . Se toman como fuerzas verticales las componentes verticales de cada una de las combinaciones ELU del análisis global con los mismos coeficientes parciales que las componentes horizontales, y se suma el peso de la cimentación considerándolo como un efecto favorable ($\gamma_{E,G} = 1$), se obtiene así V'_d . Por la elevada distancia al nivel freático, no se consideran los efectos de las subpresiones.

En la Tabla I.4.54 se muestran las componentes vertical V'_d y horizontal H_d de las reacciones en cada uno de los apoyos, y los valores de la resistencia a deslizamiento para su combinación más desfavorable (aquella en la que resulta un menor factor de seguridad R_d/H_d). Se observa que en ninguno de los casos se supera esta resistencia, debido en parte a la consideración de disponer los mástiles con un valor de desplome menor a $\tan \delta_k$ y al considerable peso de las cimentaciones, llegando a ser $\approx 1/5$ de la reacción vertical (mayorada) en el apoyo.

Mástil	Comb.	R _Z [kN]	R _Y [kN]	R _X [kN]	V _C [kN]	H _d [kN]	V' _d [kN]	R _d [kN]
BA/S/1	ELU7	693,4	72	74,7	90,8	103,8	784,2	259,5
AL/S/1	ELU12	671,8	0,1	101,1	75	101,1	746,8	247,1
BA/S/2	ELU6	326,7	0,5	50,1	48	50,1	374,7	124
AL/S/2	ELU17	472,2	0,1	71,4	60,8	71,4	533	176,3
BA/S/3	ELU6	317,9	0,1	48,8	48	48,8	365,9	121,1
AL/S/3	ELU12	672,4	0,1	101,2	75	101,2	747,4	247,3
BA/S/4	ELU6	776,2	79,5	82,8	90,8	114,8	867	286,9
AL/N/1	ELU13	792,1	82,2	86	108	119	900,1	297,8
BA/N/1	ELU4	454,5	0,6	69,3	60,8	69,3	515,3	170,5

Mástil	Comb.	R _Z [kN]	R _Y [kN]	R _X [kN]	V _C [kN]	H _d [kN]	V' _d [kN]	R _d [kN]
AL/N/2	ELU2	639,6	0	94,7	75	94,7	714,6	236,4
BA/N/2	ELU3	389,9	0	57,9	48	57,9	437,9	144,9
AL/N/3	ELU10	632,9	0,5	93,9	75	93,9	707,9	234,2
BA/N/3	ELU3	466,5	0,3	70,8	60,8	70,8	527,3	174,5
AL/N/4	ELU15	812	86,4	85,8	108	121,8	920	304,4

Tabla I.4.54: Comprobaciones deslizamiento. Elaboración: Propia.

04.5.3. Comprobaciones estructurales en zapatas

Tras definir las dimensiones de las zapatas con las verificaciones geotécnicas, se aborda seguidamente la comprobación estructural, donde se tiene como objetivo definir el armado de cada uno de los tipos de zapatas que permita resistir los esfuerzos internos generados por las reacciones en los apoyos. Se realiza cumpliendo el Eurocódigo 2.

Se consideran zapatas realizadas con hormigón HA-25/B/20/XC2 y acero B500S para las armaduras. Materiales cuyas propiedades se recogen en la sección 02.7 del ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO.

04.5.3.1. Procedimiento

Tratándose de zapatas flexibles, pues la relación v/h comprende valores entre 1,33 y 2,00, el armado se dimensiona a partir de los momentos flectores que se generan sobre planos paralelos a los de simetría de la zapata a una distancia 122 mm del punto de apoyo de los mástiles, 0.15 veces el ancho de la placa base (350 mm) desde el borde de la propia placa; y los cortantes que se generan en planos paralelos a los de simetría de la zapata a una distancia 872 mm del punto de apoyo de los mástiles, a una distancia hacia el exterior de un canto útil respecto de la sección de referencia anterior.

Para el cálculo del momento flector en estos planos, se toman como datos de entrada las reacciones (R_x , R_y , R_z , M_x , M_y) producidas en cada apoyo; M_y es nulo en todos los casos pues se permite el giro en este sentido, y además M_x es nulo en las esquinas al restringirse únicamente en estos apoyos los desplazamientos.

A partir de estas fuerzas se estima el prisma de tensiones que se produce bajo la base de la zapata, definido por las tensiones que se producen en cada una de las 4 esquinas, calculadas como:

$$\sigma_i = \frac{R_z}{A} + \frac{M_x + R_y \cdot D + e_L \cdot R_z}{(L^3 B)/12} \cdot \left(\frac{\pm L}{2}\right) + \frac{M_y + R_x \cdot D + e_B \cdot R_z}{(B^3 L)/12} \cdot \left(\frac{\pm B}{2}\right)$$

Donde A representa el área geométrica de la zapata ($B \cdot L$), e_B y e_L representan las excentricidades de los apoyos respecto del centro geométrico de la zapata en las direcciones de B y L .

Finalmente se calculan los esfuerzos que estas distribuciones de tensiones generan sobre los 4 planos de referencia (1 a cada lado del apoyo en dirección B y 1 a cada lado del apoyo en dirección L).

En función de estos momentos calculados, se dispone el armado en ambas direcciones de la cara inferior de la zapata. El armado definido por el diámetro de los redondos ϕ_B y la separación s_B entre las barras se dispone para resistir el momento $M_{B,Ed}$ que se genera en los planos paralelos a la dimensión B de las zapatas. (Momento con el eje alineado en la dirección de L)

El armado definido por el diámetro de los redondos ϕ_L y la separación s_L entre las barras se dispone para resistir el momento $M_{L,Ed}$ que se genera en los planos paralelos a la dimensión L de las zapatas. (Momento con el eje alineado en la dirección de B)

El momento resistente de la sección en ambas direcciones principales, se calcula como:

$$M_{Rd} = 0,85 \cdot d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \text{ (en mkN/m)}$$

Para el cálculo del canto útil d se considera un recubrimiento mecánico de 50 mm.

Se calcula además el cortante en el plano de referencia con el fin de verificar si el hormigón es capaz de resistir por sí mismo estos esfuerzos que se generan. El cortante resistente $V_{Rd,c}$ es:

$$V_{Rd,c} = \nu_{min} \cdot d \text{ (en kN/m)}$$

Donde ν_{min} se calcula como $\nu_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$, siendo $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$.

Se omite la comprobación a punzonamiento que indica el EC2, debido a que el perímetro crítico en el cuál debe realizarse la comprobación, situado a una distancia $2 \cdot 1.400$ mm de los bordes de la placa de apoyo, excede los límites de la zapata.

04.5.3.2. Resultados

Tras realizar el procedimiento indicado, se obtienen los siguientes resultados. En primer lugar se muestran en la Tabla I.4.55 los esfuerzos de cálculo con los que se dimensiona cada una de las zapatas.

A partir de los momentos obtenidos en cada una de las direcciones, y considerando el área de armadura mínima que establece el Eurocódigo 2 ($A_{s,min} = 0,0013 \cdot b \cdot d$), se plantean las armaduras para cada uno de los tipos de zapatas mostradas en la Tabla I.4.56.

Zapata	Tipo	$M_{B,Ed}$ [mkN/m]	$V_{B,Ed}$ [kN/m]	$M_{L,Ed}$ [mkN/m]	$V_{L,Ed}$ [kN/m]
BA/S/1	4	114,9	81,9	114,3	81,5
AL/S/1	3	61,4	36,6	127,7	90,4
BA/S/2	1	33,8	5,5	84,8	47,7
AL/S/2	2	49,3	21,5	112,3	73,4
BA/S/3	1	33,7	5,4	84,5	47,5
AL/S/3	3	61,4	36,5	127,3	90,1
BA/S/4	4	117,8	84,1	116,7	83,3
AL/N/1	5	135,3	99,2	134,8	98,9
BA/N/1	2	39,9	17,5	89,5	58,7
AL/N/2	3	57,1	34	119,1	84,3
BA/N/2	1	31,6	5,1	79,1	44,5
AL/N/3	3	57,2	34	119,3	84,4
BA/N/3	2	39,9	17,5	89,4	58,7
AL/N/4	5	131,9	96,8	131,4	96,5

Tabla I.4.55: Esfuerzos internos en secciones de referencia de zapatas. Elaboración: Propia.

Tipo	ϕ_B [mm]	s_B [mm]	$A_{s,B}$ [mm ² /m]	ϕ_L [mm]	s_L [mm]	$A_{s,L}$ [mm ² /m]	$A_{s,min}$ [mm ² /m]
1	20	200	1.885	20	200	1.885	1.560
2	20	200	1.885	20	200	1.885	1.755
3	20	150	2.513	20	150	2.513	1.950
4	20	150	2.513	20	150	2.513	2.145
5	20	150	2.513	20	150	2.513	2.340

Tabla I.4.56: Resumen de armados en zapatas. Elaboración: Propia.

Con estos armados definidos, se calculan los momentos resistentes en cada una de las direcciones para cada zapata. Los momentos resistentes obtenidos se muestran en la Tabla I.4.57 junto con los momentos solicitantes, se observa como el armado propuesto es suficiente para estas solicitaciones en todas las zapatas.

Adicionalmente al armado propuesto en la cara inferior, debido al elevado canto de las cimentaciones se asume disponer el mismo armado en la cara superior para evitar una fisuración excesiva de la zapata a causa de la retracción.

En la Tabla I.4.58 se muestran los valores de cortante $V_{Rd,c}$ resistente de las zapatas y se comparan con los cortantes de cálculo V_{Ed} mostrados previamente. Se observa que las dimensiones de las zapatas son suficientes para poder resistir estos esfuerzos sin necesidad de armadura.

Zapata	Tipo	$M_{B,Rd}$ [mkN/m]	$M_{B,Ed}$ [mkN/m]	$M_{L,Rd}$ [mkN/m]	$M_{L,Ed}$ [mkN/m]
BA/S/1	4	650,2	114,9	650,2	114,3
AL/S/1	3	650,2	61,4	650,2	127,7
BA/S/2	1	487,6	33,8	487,6	84,8
AL/S/2	2	487,6	49,3	487,6	112,3
BA/S/3	1	487,6	33,7	487,6	84,5
AL/S/3	3	650,2	61,4	650,2	127,3
BA/S/4	4	650,2	117,8	650,2	116,7
AL/N/1	5	650,2	135,3	650,2	134,8
BA/N/1	2	487,6	39,9	487,6	89,5
AL/N/2	3	650,2	57,1	650,2	119,1
BA/N/2	1	487,6	31,6	487,6	79,1
AL/N/3	3	650,2	57,2	650,2	119,3
BA/N/3	2	487,6	39,9	487,6	89,4
AL/N/4	5	650,2	131,9	650,2	131,4

Tabla I.4.57: Momentos internos de cálculo y resistentes en zapatas. Elaboración: Propia.

Zapata	Tipo	$V_{L,Ed}$ [kN/m]	$V_{B,Ed}$ [kN/m]	V_{Rd} [kN/m]
BA/S/1	4	81,9	81,5	232,9
AL/S/1	3	36,6	90,4	232,9
BA/S/2	1	5,5	47,7	232,9
AL/S/2	2	21,5	73,4	232,9
BA/S/3	1	5,4	47,5	232,9
AL/S/3	3	36,5	90,1	232,9
BA/S/4	4	84,1	83,3	232,9
AL/N/1	5	99,2	98,9	232,9
BA/N/1	2	17,5	58,7	232,9
AL/N/2	3	34	84,3	232,9
BA/N/2	1	5,1	44,5	232,9
AL/N/3	3	34	84,4	232,9
BA/N/3	2	17,5	58,7	232,9
AL/N/4	5	96,8	96,5	232,9

Tabla I.4.58: Esfuerzos cortantes internos de cálculo y resistentes en zapatas. Elaboración: Propia.

En resumen, se disponen para ambas caras y ambas direcciones: barras $\phi 20$ cada 200 mm en las zapatas de todos los mástiles bajos interiores de la estructura y del mástil alto AL/S/2; y barras $\phi 20$ cada 150 mm en las del resto de mástiles altos y en las de los mástiles bajos de esquina en el lado sur.

04.5.4. Comprobaciones en anclajes

Seguidamente a las verificaciones y dimensionamientos de las zapatas, se aborda el mismo procedimiento para las cimentaciones de los contravientos, resueltas con anclajes pasivos permanentes con inyección repetitiva y selectiva. Según lo dispuesto en la Guía de la DGC, se realizan comprobaciones con el fin de asegurar que no se produce:

- Rotura parcial de la cabeza del anclaje o de la estructura a anclar por exceso de tensión. Se presta especial atención al dimensionamiento y posición de la placa de reparto, para evitar deformaciones excesivas, concentraciones de tensiones, asientos inadmisibles, levantamiento de cuñas o descensos de las cabezas. El ancho de la cabeza de la placa se recomienda que sea al menos el doble del diámetro de la perforación y siempre superior a 20 cm, espesor siempre superior a 1 cm.
- Rotura del tirante a tracción y deslizamiento dentro del bulbo: esta verificación comprende la mayoración de las cargas actuantes, la comprobación de la tensión admisible del acero del tirante, la comprobación del deslizamiento del tirante dentro del bulbo y la comprobación de la seguridad frente al arrancamiento.
- Pérdida de tensión en el anclaje por deslizamiento del bulbo contra el terreno.

04.5.4.1. Evaluación de la estabilidad del anclaje

Como primer paso a realizar, se indica en la Guía de la DGC la obtención de la carga nominal mayorada P_{Nd} según la expresión:

$$P_{Nd} = F_1 P_N$$

Donde para P_N , carga nominal del anclaje, se considera la carga obtenida en el cálculo de los estados límite de servicio, sin mayoración. Y se adopta un valor de 1,5 para el coeficiente de mayoración F_1 al considerar el anclaje como del tipo permanente.

Haciendo uso de la carga mayorada obtenida, se comprueba en primer lugar que no se supera la tensión admisible del acero del tirante, para ello deben cumplirse de forma simultánea las siguientes condiciones:

$$P_{Nd}/A_T \leq f_{pk}/1,30$$

$$P_{Nd}/A_T \leq f_{yk}/1,15$$

Donde A_T corresponde a la sección de acero del tirante, f_{pk} es el límite de rotura del acero del tirante y f_{yk} el límite elástico del acero del tirante. Se muestran en la Tabla I.4.59 los valores de tensiones de cálculo en los tirantes (P_{Nd}/A_T) y las tensiones admisibles (siendo la condición de tensión de rotura $f_{pk}/1,30$ la más restrictiva), para cada uno de los anclajes en su combinación pésima.

Anclaje	P_{Nd} [N]	A_T [mm ²]	P_{Nd}/A_T [N/mm ²]	$f_{pk}/1,30$ [N/mm ²]	$f_{yk}/1,15$ [N/mm ²]
ba/s/1-a	645.110	912,1	707	1.431	1.487
ba/s/1-b	620.935	912,1	681	1.431	1.487
al/s/1-a	607.298	729,7	832	1.431	1.487
al/s/1-b	574.510	729,7	787	1.431	1.487
ba/s/2-a	546.107	547,2	998	1.431	1.487
ba/s/2-b	529.249	547,2	967	1.431	1.487
al/s/2-a	463.485	729,7	635	1.431	1.487
al/s/2-b	474.955	729,7	651	1.431	1.487
ba/s/3-a	545.833	547,2	998	1.431	1.487
ba/s/3-b	523.218	547,2	956	1.431	1.487
al/s/3-a	549.226	729,7	753	1.431	1.487
al/s/3-b	622.961	729,7	854	1.431	1.487
ba/s/4-b	621.067	912,1	681	1.431	1.487
ba/s/4-a	679.925	912,1	745	1.431	1.487
al/n/1-a	669.631	912,1	734	1.431	1.487
al/n/1-b	662.016	912,1	726	1.431	1.487
ba/n/1-a	529.594	729,7	726	1.431	1.487
ba/n/1-b	511.484	729,7	701	1.431	1.487
al/n/2-a	499.664	729,7	685	1.431	1.487
al/n/2-b	492.243	729,7	675	1.431	1.487
ba/n/2-a	529.139	547,2	967	1.431	1.487
ba/n/2-b	534.786	547,2	977	1.431	1.487
al/n/3-a	501.144	729,7	687	1.431	1.487
al/n/3-b	489.304	729,7	671	1.431	1.487
ba/n/3-a	495.923	729,7	680	1.431	1.487
ba/n/3-b	550.377	729,7	754	1.431	1.487
al/n/4-b	661.983	912,1	726	1.431	1.487
al/n/4-a	670.272	912,1	735	1.431	1.487

Tabla I.4.59: Comprobaciones tensionales en tirantes. Elaboración: Propia.

Se comprueba en segundo lugar la seguridad frente al deslizamiento del tirante en la lechada dentro del bulbo. Que se considera suficiente si se cumple la condición:

$$P_{Nd}/(L_b \cdot p_T) \leq \tau_{lim}/1,2$$

Donde p_T corresponde con el perímetro nominal del tirante (aproximado como: $p_T = 2\sqrt{\pi \cdot A_T}$); L_b , con la longitud de cálculo del bulbo; f_{ck} , con la resistencia característica de la lechada; y τ_{lim} , con la adherencia límite entre el tirante y la lechada, obtenida como $\tau_{lim} = 6,9 (f_{ck}/22,5)^{2/3}$ (en MPa). El producto $L_b \cdot p_T$ representa el área lateral del tirante.

Se muestran en la Tabla I.4.60 los valores de tensiones tangenciales producidos entre el tirante y la lechada (P_{Nd}/A_{lat}), y los valores de adherencia límite ($\tau_{lim}/1,2$).

Anclaje	L_b [mm]	p_T [mm]	A_{lat} [mm ²]	P_{Nd}/A_{lat} [N/mm ²]	$\tau_{lim}/1,2$ [N/mm ²]
ba/s/1-a	10.000	107,06	1.070.600	0,6	6,17
ba/s/1-b	10.000	107,06	1.070.600	0,58	6,17
al/s/1-a	8.000	95,76	766.080	0,79	6,17
al/s/1-b	8.000	95,76	766.080	0,75	6,17
ba/s/2-a	6.000	82,92	497.520	1,1	6,17
ba/s/2-b	6.000	82,92	497.520	1,06	6,17
al/s/2-a	8.000	95,76	766.080	0,61	6,17
al/s/2-b	8.000	95,76	766.080	0,62	6,17
ba/s/3-a	6.000	82,92	497.520	1,1	6,17
ba/s/3-b	6.000	82,92	497.520	1,05	6,17
al/s/3-a	8.000	95,76	766.080	0,72	6,17
al/s/3-b	8.000	95,76	766.080	0,81	6,17
ba/s/4-b	10.000	107,06	1.070.600	0,58	6,17
ba/s/4-a	10.000	107,06	1.070.600	0,64	6,17
al/n/1-a	10.000	107,06	1.070.600	0,63	6,17
al/n/1-b	10.000	107,06	1.070.600	0,62	6,17
ba/n/1-a	8.000	95,76	766.080	0,69	6,17
ba/n/1-b	8.000	95,76	766.080	0,67	6,17
al/n/2-a	8.000	95,76	766.080	0,65	6,17
al/n/2-b	8.000	95,76	766.080	0,64	6,17
ba/n/2-a	6.000	82,92	497.520	1,06	6,17
ba/n/2-b	6.000	82,92	497.520	1,07	6,17
al/n/3-a	8.000	95,76	766.080	0,65	6,17
al/n/3-b	8.000	95,76	766.080	0,64	6,17
ba/n/3-a	8.000	95,76	766.080	0,65	6,17
ba/n/3-b	8.000	95,76	766.080	0,72	6,17
al/n/4-b	10.000	107,06	1.070.600	0,62	6,17
al/n/4-a	10.000	107,06	1.070.600	0,63	6,17

Tabla I.4.60: Comprobaciones deslizamiento del tirante en la lechada. Elaboración: Propia.

Se comprueba por último que no tenga lugar el arrancamiento del bulbo dentro del terreno, el cual se asegura que no se produciría si se cumple:

$$P_{Nd}/(\pi \cdot D_N \cdot L_b) \leq a_{adm}$$

Donde D_N corresponde el diámetro nominal del bulbo, y a_{adm} con la adherencia admisible frente al deslizamiento o arrancamiento del terreno que rodea el bulbo.

Para la estimación de la a_{adm} , se recomienda preferentemente deducir estos valores de ensayos de investigación o de ensayos de adecuación. Ante la inviabilidad de estimarlos mediante estos procedimientos en el presente trabajo, se recurre al segundo método en orden de preferencia recomendado en la Guía, que consiste en la aplicación de la expresión 4.13, en presiones efectivas.

$$a_{adm} = \frac{c'}{F_{2c}} + \sigma' \frac{\tan \varphi'}{F_{2\varphi}} = \frac{c'}{1,60} + \sigma' \frac{\tan \varphi'}{1,35} \quad (4.13)$$

Donde para σ' se considera la suma de la presión efectiva del terreno en el centro del bulbo más una tercera parte de la presión de inyección aplicada.

Se muestran en la Tabla I.4.61 los valores de tensiones tangenciales producidos en la interfaz entre el bulbo y el terreno ($\tau_{b-t} = P_{Nd} / (\pi \cdot D_N \cdot L_b)$), y los valores de adherencia admisibles (a_{adm}). Se puede observar que en ninguno de los anclajes llega a excederse esta tensión límite.

Anclaje	D_N [mm]	τ_{b-t} [kPa]	a_{adm} [kPa]
ba/s/1-a	150	124,9	149,8
ba/s/1-b	150	120,2	149,8
al/s/1-a	150	117,5	145,2
al/s/1-b	150	111,2	145,2
ba/s/2-a	150	105,7	140,6
ba/s/2-b	150	102,4	140,6
al/s/2-a	150	89,7	145,2
al/s/2-b	150	91,9	145,2
ba/s/3-a	150	105,6	140,6
ba/s/3-b	150	101,3	140,6
al/s/3-a	150	106,3	145,2
al/s/3-b	150	120,6	145,2
ba/s/4-b	150	120,2	149,8
ba/s/4-a	150	131,6	149,8
al/n/1-a	150	129,6	149,8
al/n/1-b	150	128,1	149,8
ba/n/1-a	150	102,5	145,2
ba/n/1-b	150	99	145,2
al/n/2-a	150	96,7	145,2
al/n/2-b	150	95,3	145,2
ba/n/2-a	150	102,4	140,6
ba/n/2-b	150	103,5	140,6
al/n/3-a	150	97	145,2
al/n/3-b	150	94,7	145,2
ba/n/3-a	150	96	145,2

Anclaje	D_N [mm]	τ_{b-t} [kPa]	a_{adm} [kPa]
ba/n/3-b	150	106,5	145,2
al/n/4-b	150	128,1	149,8
al/n/4-a	150	129,7	149,8

Tabla I.4.61: Comprobaciones arrancamiento del bulbo. Elaboración: Propia.

04.6. Cálculo de uniones

Los últimos elementos que conforman la estructura que se dimensionan son las uniones: de los mástiles a las zapatas, de los vientos a las placas de los anclajes, y uniones de cables en las cabezas de los mástiles.

Para los apoyos de los mástiles se plantean dos tipos de uniones: pasadores en los mástiles interiores de las alineaciones con el fin de permitir el giro de eje paralelo a la alineación, y restringirlo en el perpendicular; y rótulas en los mástiles de esquina con el fin de permitir cualquier giro de eje contenido en el plano horizontal.

En las uniones de los vientos a placas de anclajes se disponen orejetas en los extremos de los cables y en las placas, unidas por varillas roscadas utilizadas para regular la tensión de los cables.

04.6.1. Unión tipo pasador

Se muestran en primer lugar las operaciones realizadas para verificar y dimensionar las uniones de los mástiles internos a las zapatas. Estas se resuelven como articulaciones simples: se dispone en el extremo de los tubos una placa de testa y 4 rigidizadores a la que se suelda una orejeta, que es el elemento que se une por el bulón a la orejeta dispuesta en la placa base. Estas placas base se encuentran embebidas en las zapatas con 8 pernos de $\phi 16$ mm.

Se definen 3 uniones tipo, una por cada diámetro exterior de tubos dispuesto en los mástiles internos, el tercer tipo de unión se utiliza en los mástiles altos internos de la alineación sur y de la alineación norte. Se analiza para cada una de ellas el mástil en el que se alcanza un mayor valor de axil de compresión (F_{Ed}) en combinaciones ELU. En la Tabla I.4.62 se muestra para cada tipo de unión el tipo de barra que se dispone, y el mástil en el que se produce el axil crítico y el valor de esta fuerza.

Unión	Barra	Mástil	F_{Ed} [kN]
P1	219,1x6,3	BA/S/2	422
P2	244,5x6,3	BA/S/4	472
P3	273x10	AL/S/1	698
P3	273x12,5	AL/N/3	649

Tabla I.4.62: Tipos de uniones pasador. Elaboración: Propia.

04.6.1.1. Espesor de las orejetas

Se definen en primer lugar el espesor de las orejetas, que debe ser superior a t_{Min} :

$$t \geq 0,7 \cdot \sqrt{\frac{F_{Ed} \cdot \gamma_{M2}}{f_y}}$$

Con $\gamma_{M2}=1,25$ y un acero de $f_y = 275$ MPa.

En la Tabla I.4.63 se muestran los espesores mínimos (t_{Min}) obtenidos y los espesores dispuestos (t) en cada uno de los tipos. En las orejetas interiores (las que se unen a las placas de testa de los tubos) se dispone este espesor (t), y en las orejetas exteriores (las que se unen a la placa base) se dispone ($t/2$) en cada una de ellas.

Unión	t_{Min} [mm]	t [mm]
P1	30,66	32
P2	32,42	36
P3	39,43	40

Tabla I.4.63: Espesores de orejetas en uniones pasador. Elaboración: Propia.

04.6.1.2. Diámetro de los pasadores

En segundo lugar se dimensionan los pasadores, considerando que debe cumplirse con la condición de resistencia a cortante en cada uno de los planos de cortante:

$$F_{v,Ed} < F_{v,Rd} = 0,6 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}}$$

Considerando un acero 8.8 para los pasadores y dos planos de cortante, se calcula el diámetro mínimo (d) que deben tener los pasadores en cada uno de los tipos de unión como:

$$d > \sqrt{\frac{F_{v,Ed}}{2} \cdot \frac{4 \cdot \gamma_{M2}}{0,6 \cdot \pi \cdot f_{ub}}}$$

Se obtienen los diámetros mínimos y los diámetros considerados (d) que se muestran en la Tabla I.4.64, así como los cortantes resistentes $F_{v,Rd}$ correspondientes a los diámetros dispuestos. Con estos diámetros considerados, se entiende cumplida la verificación de resistencia a cortante de los bulones.

Unión	d_{Min} [mm]	d [mm]	F_{Rd} [kN]
P1	26,45	52	816
P2	27,97	56	946
P3	34,02	66	1.314

Tabla I.4.64: Diámetros de pasadores. Elaboración: Propia.

04.6.1.3. Verificación de la resistencia a flexión del pasador

A partir de las geometrías de la unión definidas por el espesor de las orejetas y el diámetro del pasador, se verifica la resistencia a flexión del pasador, para lo que debe cumplirse:

$$M_{Ed} < M_{Rd} = 0,8 \cdot \frac{\pi \cdot d}{32} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M2}}$$

Como límite elástico del acero del pasador se tiene $f_{yb} = 0,8 \cdot 800 = 640$ MPa, el momento flector en el pasador se calcula como:

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{8} \cdot (b + 4c + 2a)$$

Donde las dimensiones a , b y c corresponden con las representadas en el esquema de la Figura I.4.43 ($a = t/2$, $b = t$).

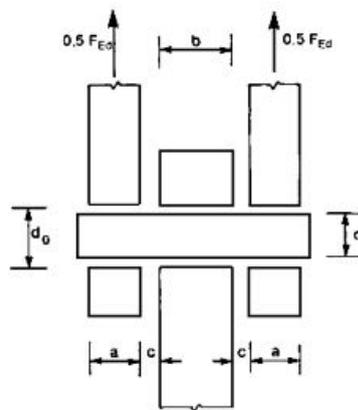


Figura I.4.43: Esquema de dimensiones y equilibrio de fuerzas en sección transversal de la unión.
Fuente: [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013c].

En la Tabla I.4.65 se muestran los valores de estas dimensiones de la unión, el esfuerzo flector en el pasador y el flector resistente del pasador para cada tipo de unión.

Unión	a [mm]	b [mm]	c [mm]	M_{Ed} [kNm]	M_{Rd} [kNm]
P1	16	32	5	4,4	5,7
P2	18	36	5	5,4	7,1
P3	20	40	5	8,7	11,6

Tabla I.4.65: Comprobación de flexión en el pasador. Elaboración: Propia.

04.6.1.4. Verificación de la interacción flector-cortante

La última verificación en el dimensionamiento de los pasadores es la de la capacidad resistente de flexión y cortante de forma simultánea, que se tiene en cuenta como:

$$\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 < 1$$

A partir de los esfuerzos de cálculo y resistentes obtenidos en las verificaciones anteriores, se obtienen los ratios mostrados en la Tabla I.4.66, se observa que en todos casos se cumple la limitación, con lo que son suficientes los pasadores de acero 8.8 considerados.

Unión	M_{Ed}/M_{Rd} [-]	$F_{v,Ed}/F_{v,Rd}$ [-]	Ratio [-]
P1	0,77	0,52	0,86
P2	0,76	0,5	0,83
P3	0,75	0,53	0,84

Tabla I.4.66: Comprobación de la interacción flexión-cortante en el pasador. Elaboración: Propia.

04.6.1.5. Verificación de aplastamiento en chapas

Por otro lado, en las orejetas se comprueba que no se produce el aplastamiento de la chapa contra la caña del tornillo, para lo que debe cumplirse:

$$F_{b,Ed} < F_{b,Rd} = 1,5 \cdot \frac{t \cdot d \cdot f_y}{\gamma_{M2}}$$

Se considera como t el mínimo entre el espesor de la chapa interior y de la suma de las dos chapas exteriores, en este caso coinciden ambos valores. En la Tabla I.4.67 se compara el esfuerzo transmitido en la unión y el esfuerzo resistente.

Unión	$F_{b,Ed}$ [kN]	t [mm]	d [mm]	$F_{b,Rd}$ [kN]
P1	422	32	52	549
P2	472	36	56	665
P3	698	40	66	871

Tabla I.4.67: Comprobación de aplastamiento en chapas. Elaboración: Propia.

04.6.1.6. Requisitos geométricos en chapas

En las orejetas de la unión deben respetarse las distancias a bordes a (en la dirección de la fuerza) y c (en la dirección perpendicular a la fuerza) mínimas; representadas el esquema

de la Figura I.4.44 y definidas como:

$$a \geq \frac{F_{Ed}\gamma_{M0}}{2t f_y} + \frac{2d_0}{3}$$

$$c \geq \frac{F_{Ed}\gamma_{M0}}{2t f_y} + \frac{d_0}{3}$$

Entre estas distancias mínimas, por simplificación se considera únicamente el valor de a como requisito geométrico. En la Tabla I.4.68 se muestran las distancias a consideradas en cada tipo de unión.

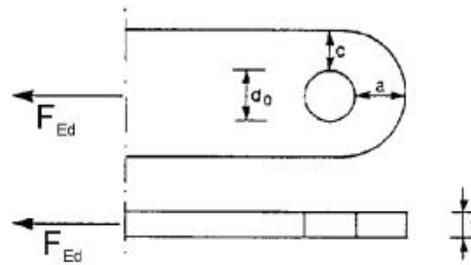


Figura I.4.44: Esquema requisitos geométricos orejeta en uniones pasador. Fuente: [Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013c].

Unión	t [mm]	d [mm]	a _{Min} [mm]	a [mm]
P1	32	52	64,64	70
P2	36	56	67,13	70
P3	40	66	83,66	90
P3	40	66	80,88	90

Tabla I.4.68: Requisitos geométricos orejetas. Elaboración: Propia.

04.6.2. Unión tipo rótula

En las bases de los mástiles de esquina se disponen rótulas que permiten la libertad de giro.

Para el dimensionamiento, se considera que la bola que conforma la unión del tramo de tubo soldado a la base y el mástil debe tener en su plano de intersección un área superior al área del tubo estructural (A_t).

Con lo que se establece la condición de que el diámetro del paralelo en la intersección (d_s) de la bola sea:

$$d_s \geq \sqrt{\frac{\pi \cdot A_t}{4}}$$

En los mástiles de esquina de la alineación norte se disponen mástiles 323,9x10 ($A_t = 9.861 \text{ mm}^2$), por lo que el diámetro mínimo de la intersección es de 88 mm. Se dispone una bola

de 125 mm de diámetro, intersectada por planos paralelos a 43,37 mm del centro, que definen paralelos de 90 mm de diámetro.

En los mástiles de esquina de la alineación sur se disponen mástiles 244,5x8 ($A_t = 5.943 \text{ mm}^2$), por lo que el diámetro mínimo de la intersección es de 68 mm. Se dispone una bola de 100 mm de diámetro, intersectada por planos paralelos a 35,70 mm del centro que definen paralelos de 70 mm.

04.6.3. Uniones de cables

En las uniones de los cables a los mástiles, y de los cables a los elementos de anclajes se seleccionan del catálogo (disponible en [Sockets Redaelli](#)) los elementos terminales que se disponen en cada extremo del cable del mismo fabricante [[Redaelli Tecna S.P.A.](#)] que los propios cables.

Se escogen terminales en horquilla ajustables (TBF) para las uniones de los cables a los mástiles, que son los extremos superiores de los vientos y ambos extremos de las relingas. Que se unen a las pletinas soldadas en las cabezas de los mástiles para tal propósito.

En los extremos inferiores se escoge un terminal (BRC) compuesto por dos varillas roscadas, un pasador y un casquillo que permite alojar el extremo inferior del cable en el cual se dispone del mismo modo un terminal en horquilla. El pasador de este elemento de unión se introduce en una orejeta soldada a la placa del anclaje.

En la Figura I.4.45 se recoge un esquema del producto TBF utilizado en los extremos de los cables. Se tratan de uniones a resistencia total, las dimensiones de cada uno de los elementos, en función del diámetro de los cables, ya garantiza que la resistencia de este elemento de unión es superior a la resistencia del propio cable que aloja. Por lo que se escogen los elementos TBF20 a TBF36 de esta serie en función de los diámetros de cables en que se dispongan.

En la Figura I.4.46 se recoge una tabla análoga para el producto BRC dispuesto entre las placas de los anclajes y los cables. Del mismo modo se escoge el tipo de producto según el diámetro del cable en el que se dispone.

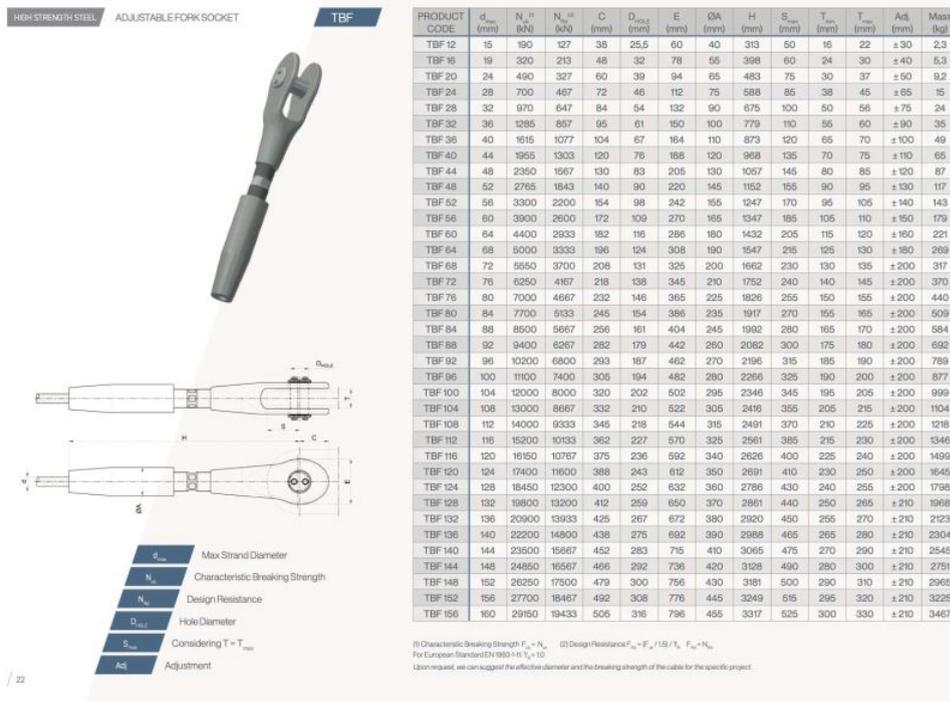


Figura I.4.45: Catálogo de elemento de unión horquilla ajustable. Fuente: [TBF Redaelli](#).

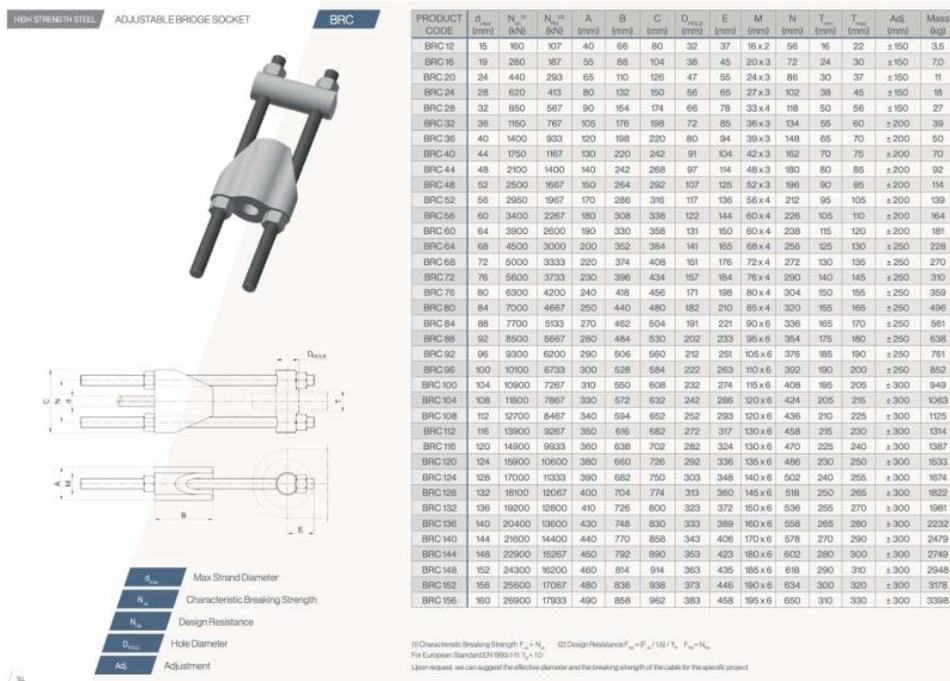


Figura I.4.46: Catálogo de elemento de unión casquillos ajustables. Fuente: [BRC Redaelli](#).

APÉNDICE 01. RESULTADOS EN MÁSTILES

BA/S/1	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-668,21	-610,09	-722,03	-764,99	-658,54	-646,69	-701,09	-617,16	-639,85
V _{y,Ed}	-0,01	-0,01	-0,99	-0,33	0,55	2,29	1,28	-0,57	-0,19
V _{z,Ed}	0,44	0,43	1,4	1,69	0,89	0,36	-0,97	0,99	1,14
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BA/S/1	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-603,34	-594,21	-626,77	-669,06	-713,57	-620,84	-610,28	-663,59	
V _{y,Ed}	0,32	1,34	0,74	-0,97	-0,32	0,55	2,26	1,26	
V _{z,Ed}	0,7	0,38	-0,39	1,38	1,66	0,88	0,35	-0,95	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla I.4.69: Resultados mástil BA/S/1 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

AL/S/1	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-504,69	-696,26	-410,58	-428,56	-500,28	-485,73	-499,67	-620,24	-637,4
V _{y,Ed}	-0,01	0,06	0,18	1,37	0,68	0,95	-0,09	0,06	1,11
V _{z,Ed}	0,77	0,87	1,73	1,29	0,79	-0,35	-0,64	1,53	1,22
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	0,99	-0,6	1	-2,35	2,97	8,64	-1,23	1,05	-2,18
AL/S/1	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-697,88	-667,82	-679,39	-482,47	-506,08	-593,49	-559,88	-577,18	
V _{y,Ed}	0,46	0,35	0,1	0,16	1,52	0,66	0,77	-0,02	
V _{z,Ed}	0,89	0,08	-0,1	1,81	1,35	0,84	-0,38	-0,68	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	0,59	4,85	-2,01	1,76	-2,96	2,45	8,99	-2,03	

Tabla I.4.70: Resultados mástil AL/S/1 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

BA/S/2	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-294,78	-200,23	-422,15	-375,17	-291,76	-330,47	-313,01	-225,46	-216,76
V _{y,Ed}	0	0	0,1	1,3	0,32	0,49	0,11	0,05	0,47
V _{z,Ed}	0,34	0,3	1,23	0,91	0,34	-0,77	-0,49	0,66	0,57
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	0,03	0	0,09	-1,99	1,07	5,43	-0,09	0,38	-0,76
BA/S/2	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-197,05	-223,91	-221,33	-332,01	-296,72	-232,68	-279,18	-267,13	
V _{y,Ed}	0,22	0,51	0,05	0,06	1,01	0,34	0,67	0,1	
V _{z,Ed}	0,3	-0,25	-0,13	1,04	0,82	0,32	-0,7	-0,45	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	0,64	3,04	-0,06	0,39	-1,96	1,14	5,45	-0,05	

Tabla I.4.71: Resultados mástil BA/S/2 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

AL/S/2	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-389,83	-584,5	-266,66	-300,66	-379,93	-368,46	-396,33	-479,36	-509,68
V _{y,Ed}	0	0	-0,14	0,82	0,64	0,99	-0,07	-0,08	0,78
V _{z,Ed}	0,7	0,78	2,07	1,72	0,76	-0,83	-1,37	1,7	1,45
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	0	0	-0,42	-4,72	2,1	11,1	-0,19	-0,32	-3,86
AL/S/2	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-583,2	-557,02	-577,21	-330,65	-372,07	-474,78	-445,4	-477,54	
V _{y,Ed}	0,35	0,24	-0,04	-0,14	0,93	0,61	0,78	-0,07	
V _{z,Ed}	0,82	-0,27	-0,63	2,15	1,78	0,8	-0,87	-1,45	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	1,26	7,07	-0,12	-0,49	-5,93	2,11	11,9	-0,2	

Tabla I.4.72: Resultados mástil AL/S/2 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

BA/S/3	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-294,78	-200,23	-420,42	-375,39	-291,9	-321,59	-311,8	-224,96	-220,15
V _{y,Ed}	0	0	-0,07	1,14	0,42	0,12	-0,14	-0,04	0,43
V _{z,Ed}	0,34	0,3	1,21	1	0,3	-0,76	-0,46	0,66	0,61
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	-0,03	0	-0,21	-1,57	1,31	5,27	0,06	-0,45	-0,92
BA/S/3	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-196,04	-216,3	-220,8	-330,36	-299,18	-231,99	-268,16	-266,07	
V _{y,Ed}	0,28	0,32	-0,07	-0,04	0,93	0,44	0,35	-0,13	
V _{z,Ed}	0,28	-0,25	-0,11	1,03	0,89	0,27	-0,69	-0,42	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	0,87	2,79	0,04	-0,52	-1,88	1,31	5,15	0,02	

Tabla I.4.73: Resultados mástil BA/S/3 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

AL/S/3	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-504,69	-696,26	-410,54	-424,55	-488,89	-478,44	-499,56	-620,25	-632,05
V _{y,Ed}	0,01	-0,06	-0,32	1,21	0,95	1,16	0,09	-0,14	0,97
V _{z,Ed}	0,77	0,87	1,68	1,79	0,66	-0,3	-0,65	1,5	1,57
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	-0,99	0,6	-1,44	-1,66	1,98	9,6	1,27	-1,31	-1,62
AL/S/3	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-689,84	-665,02	-679,99	-482,39	-499,59	-580,63	-553,79	-577,5	
V _{y,Ed}	0,46	0,31	-0,11	-0,29	1,34	0,92	0,94	0,02	
V _{z,Ed}	0,79	0,11	-0,11	1,76	1,88	0,69	-0,33	-0,7	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	2,4	6,94	2,05	-2,22	-2,72	2,54	10,61	2,08	

Tabla I.4.74: Resultados mástil AL/S/3 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

BA/S/4	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-668,21	-610,09	-721,49	-682,85	-690,29	-784,61	-701,67	-616,85	-601,11
V _{y,Ed}	0,01	0,01	0,98	2,03	1,1	0,08	-1,35	0,57	1,18
V _{z,Ed}	0,44	0,43	1,44	0,67	-1	-0,7	-0,95	1,01	0,57
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BA/S/4	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-618,59	-659,92	-627,08	-668,47	-635,31	-649,81	-739,09	-664,17	
V _{y,Ed}	0,65	0,05	-0,78	0,96	1,99	1,08	0,08	-1,33	
V _{z,Ed}	-0,4	-0,22	-0,38	1,41	0,66	-0,98	-0,69	-0,93	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla I.4.75: Resultados mástil BA/S/4 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

AL/N/1	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-768,45	-893,34	-762,65	-712,21	-778,96	-819,38	-749,65	-861,1	-829,42
V _{y,Ed}	0,01	0,01	-2,22	-2,5	-1,09	0,41	1,86	-1,4	-1,6
V _{z,Ed}	0,98	1,03	-1,32	0,78	1,78	3,39	2,04	-0,43	0,89
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AL/N/1	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-898,54	-915,41	-880,24	-800,98	-747,91	-835,3	-873,29	-804,79	
V _{y,Ed}	-0,7	0,26	1,21	-2,27	-2,55	-1,12	0,42	1,92	
V _{z,Ed}	1,53	2,54	1,7	-1,35	0,79	1,82	3,47	2,09	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla I.4.76: Resultados mástil AL/N/1 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

BA/N/1	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-387,33	-283,72	-472,14	-459,78	-385,43	-408,6	-396,99	-318,74	-318,53
V _{y,Ed}	0,06	-0,01	-0,29	-0,63	-0,54	-1,26	-0,05	0	-0,58
V _{z,Ed}	0,39	0,35	-0,73	-0,83	0,46	1,04	1,26	-0,22	-0,28
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	-1,08	-0,16	2,46	-5,26	-1,22	2,5	-1,89	0,53	-3,08
BA/N/1	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-286,83	-285,62	-277,07	-403,09	-396,67	-328,43	-342,07	-327,49	
V _{y,Ed}	-0,34	-0,56	-0,09	-0,14	-0,78	-0,55	-1,06	-0,13	
V _{z,Ed}	0,39	0,7	0,8	-0,67	-0,77	0,43	0,97	1,16	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	-0,53	0,93	-0,5	2,14	-5,35	-1,14	2,34	-1,49	

Tabla I.4.77: Resultados mástil BA/N/1 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

AL/N/2	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-427,53	-646,54	-330,92	-350,25	-418,65	-391,25	-415,95	-523,25	-557,92
V _{y,Ed}	0	-0,01	-0,07	-1,56	-0,81	-1,05	-0,05	-0,08	-0,69
V _{z,Ed}	0,96	1,08	-0,18	-0,14	0,94	1,65	1,85	0,27	0,3
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	-0,08	0,24	1,33	-9,6	-0,87	6,53	-0,74	-0,28	-6,47
AL/N/2	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-640,79	-621,36	-648,85	-380,95	-415,8	-519,35	-490,06	-526,89	
V _{y,Ed}	-0,53	-1,01	-0,02	-0,11	-1,46	-0,83	-1,31	-0,03	
V _{z,Ed}	1,07	1,55	1,71	-0,19	-0,15	0,99	1,73	1,97	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	-0,41	3,67	-0,11	0,56	-10,53	-0,93	6,57	-0,72	

Tabla I.4.78: Resultados mástil AL/N/2 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

BA/N/2	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-271,3	-165,2	-394,16	-354,48	-270,5	-297,7	-273,81	-217,91	-201,01
V _{y,Ed}	0	0	0	-0,72	-0,59	-0,81	-0,07	0	-0,71
V _{z,Ed}	0,34	0,32	-1,01	-0,55	0,37	0,93	1,35	-0,38	-0,14
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	0	0	-0,13	-7,69	-0,66	5,25	-0,09	-0,06	-3,95
BA/N/2	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-167,56	-171,4	-157,14	-321,94	-285,59	-210,9	-230,49	-204,91	
V _{y,Ed}	-0,36	-0,3	-0,04	0	-0,97	-0,59	-0,58	-0,07	
V _{z,Ed}	0,33	0,63	0,86	-0,94	-0,5	0,36	0,88	1,28	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	-0,58	1,98	-0,05	-0,13	-7,63	-0,81	4,72	-0,08	

Tabla I.4.79: Resultados mástil BA/N/2 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

AL/N/3	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-427,53	-646,54	-332,38	-350,02	-418,46	-394,7	-417,41	-524,89	-562,77
V _{y,Ed}	0	0,01	0,13	-1,17	-0,9	-1	0,05	0,12	-0,41
V _{z,Ed}	0,96	1,08	-0,24	0,05	0,84	1,8	1,85	0,24	0,42
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	0,08	-0,24	-1,61	-10,71	-1,52	6,16	0,77	0,13	-6,09
AL/N/3	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-639,83	-622	-649,87	-382,91	-419,44	-518,36	-491,82	-528,54	
V _{y,Ed}	-0,54	-0,95	0,02	0,17	-1,02	-0,91	-1,24	0,02	
V _{z,Ed}	1	1,67	1,71	-0,24	0,04	0,89	1,91	1,97	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	-1,22	3,36	0,15	-0,86	-10,75	-1,56	6,47	0,76	

Tabla I.4.80: Resultados mástil AL/N/3 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

BA/N/3	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-387,33	-283,72	-471,88	-455,98	-393,91	-423,37	-396,18	-318,51	-314,62
V _{y,Ed}	-0,06	0,01	0,27	-0,27	-0,99	-1,66	0,01	-0,02	-0,44
V _{z,Ed}	0,39	0,35	-0,73	-0,75	0,16	1,36	1,27	-0,22	-0,22
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	1,08	0,16	-2,63	-6,06	-0,88	3,21	1,86	-0,63	-2,93
BA/N/3	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-288,95	-293,99	-277,1	-402,72	-390,99	-334,59	-357,19	-326,97	
V _{y,Ed}	-0,56	-0,71	0,07	0,11	-0,49	-0,95	-1,39	0,09	
V _{z,Ed}	0,23	0,85	0,81	-0,67	-0,68	0,16	1,26	1,18	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	-1,04	0,84	0,48	-2,31	-5,98	-1,2	2,69	1,46	

Tabla I.4.81: Resultados mástil BA/N/3 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

AL/N/4	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
N _{Max,Ed}	-768,45	-893,34	-762,88	-812,85	-767,02	-704,05	-749,31	-861,44	-894,13
V _{y,Ed}	-0,01	-0,01	2,17	0,12	-1,87	-3,13	-1,85	1,37	0,07
V _{z,Ed}	0,98	1,03	-1,33	-0,8	-1,29	1,22	2	-0,44	-0,09
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M _{z,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AL/N/4	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
N _{Max,Ed}	-888,72	-837,5	-880,18	-801,37	-854,36	-821,03	-747,33	-804,54	
V _{y,Ed}	-1,19	-2,01	-1,2	2,21	0,12	-1,92	-3,19	-1,91	
V _{z,Ed}	-0,42	1,18	1,68	-1,36	-0,82	-1,33	1,24	2,05	
M _{y,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	
M _{z,Ed}	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla I.4.82: Resultados mástil AL/N/4 (fuerzas en kN, momentos en mkN). Elaboración: Propia.

APÉNDICE 02. RESULTADOS EN CABLES

Cable	ELU1		ELU2		ELU3		ELU4		ELU5		ELU6	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}										
ba/s/1-a	367,35	366,82	343,95	343,42	383,53	383	436,62	436,09	359,32	358,79	333,05	332,52
ba/s/1-b	368	367,47	320,37	319,84	414,88	414,35	412,79	412,26	366,96	366,43	377,15	376,62
al/s/1-a	236,96	236,31	331,45	330,8	193,57	192,92	227,63	226,98	232,48	231,83	204,36	203,71
al/s/1-b	226,41	225,76	297,33	296,69	183,07	182,43	163,96	163,31	228,13	227,48	247,7	247,05
ba/s/2-a	176,64	176,23	117,94	117,53	256,53	256,12	263,75	263,35	169,6	169,19	157,04	156,64
ba/s/2-b	177,3	176,89	117,85	117,45	254,69	254,29	191,7	191,3	179,63	179,22	236,13	235,72
al/s/2-a	174,19	173,83	258,37	258,01	117,44	117,08	150,85	150,49	167,7	167,33	141,4	141,04
al/s/2-b	174,19	173,83	258,37	258,01	116,56	116,2	116,25	115,89	172,68	172,32	190,08	189,72
ba/s/3-a	177,3	176,89	117,85	117,45	254,87	254,47	257,1	256,7	169,2	168,8	147,42	147,01
ba/s/3-b	176,64	176,23	117,94	117,53	253,81	253,41	196	195,59	180,49	180,08	237,68	237,27
al/s/3-a	226,41	225,76	297,33	296,69	183,78	183,13	208,57	207,92	214,78	214,14	176,11	175,46
al/s/3-b	236,96	236,31	331,45	330,8	193,06	192,41	183,44	182,79	235,44	234,79	264,81	264,16
ba/s/4-b	368	367,47	320,37	319,84	414,93	414,4	407,57	407,04	379,12	378,59	398,48	397,95
ba/s/4-a	367,35	366,82	343,95	343,42	382,89	382,36	348,23	347,7	381,53	381	466,97	466,44
al/n/1-a	367,32	366,62	415,04	414,34	380,98	380,28	341,61	340,91	378,55	377,85	410,35	409,65
al/n/1-b	361,4	360,7	425,47	424,77	349,27	348,57	340,81	340,11	360,02	359,32	365,78	365,08
ba/n/1-a	228,88	228,33	169,57	169,02	323,97	323,43	252,07	251,53	233,19	232,65	295,62	295,08
ba/n/1-b	228,11	227,56	157,57	157,03	248,37	247,83	297,56	297,01	219,6	219,05	194,44	193,89
al/n/2-a	180,27	179,74	274,04	273,5	151,89	151,35	131,42	130,88	179,46	178,92	193,35	192,81
al/n/2-b	180,77	180,23	272,35	271,81	141,81	141,28	172,52	171,98	174,6	174,07	135,49	134,95
ba/n/2-a	166,65	166,35	101,8	101,5	251,12	250,82	191,7	191,39	166,95	166,64	216,16	215,85
ba/n/2-b	166,65	166,35	101,8	101,5	252,3	252	254,13	253,82	164,89	164,58	153,12	152,81
al/n/3-a	180,77	180,23	272,35	271,81	141,47	140,94	123,72	123,19	177,68	177,14	194,44	193,91
al/n/3-b	180,27	179,74	274,04	273,5	153,34	152,81	176,15	175,62	176,21	175,67	140,04	139,5
ba/n/3-a	228,11	227,56	157,57	157,03	247,15	246,61	215,06	214,52	229,09	228,55	292,85	292,31
ba/n/3-b	228,88	228,33	169,57	169,02	324,93	324,38	335,06	334,52	234,45	233,9	209,26	208,72
al/n/4-b	361,4	360,7	425,47	424,77	348,88	348,18	360,31	359,61	356,02	355,32	339,19	338,49
al/n/4-a	367,32	366,62	415,04	414,34	381,6	380,9	419,7	419	375,19	374,49	332,08	331,38
r/mod1/s	173,37	169,93	205,71	156,46	178,8	161,52	201,16	168,05	171,24	167,3	172,46	159,14
r/mod1/n	175,84	171,63	200,18	142,15	209,22	179,84	206,86	165,89	182,12	174,01	193,96	177,52
r/mod2/s	165,88	162,25	201,13	149,44	174,63	156,22	173,78	170,62	164,87	161,98	180,8	155,97
r/mod2/n	166,6	162,12	201,09	138,21	213,18	159,95	187,72	164,3	172,91	167,84	188,26	163,04

Cable	ELU1		ELU2		ELU3		ELU4		ELU5		ELU6	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}										
r/mod3/s	165,78	162,14	200,46	149,27	174,61	151,08	184,98	154,28	163,78	160,31	177,41	166,63
r/mod3/n	166,5	162,31	201,37	142,89	224,51	162,21	211,32	157,09	174,25	168,59	175,94	166,88
r/mod4/s	165,78	162,14	200,46	149,27	173,48	151,28	164,35	162,09	164,1	161,7	188,66	167,96
r/mod4/n	166,5	162,31	201,37	142,89	224,36	163,16	200,63	175,72	173,91	169,59	180,36	156,07
r/mod5/s	165,88	162,25	201,13	149,44	174,16	155,77	176,46	146,01	163,88	159,8	187,24	171,85
r/mod5/n	166,6	162,12	201,09	138,21	213,74	160,61	215,33	166,01	173,99	168,39	168,11	159,52
r/mod6/s	173,37	169,93	205,71	156,46	178,59	161,25	162,39	156,95	174,56	170,12	211,4	180,42
r/mod6/n	175,84	171,63	200,18	142,15	209,33	180,14	206,5	193,87	178,62	176,09	188,53	157,59
r/int/1	153,86	150,1	183,4	132,38	169,98	145,85	169,13	140,5	152,52	149,19	158,55	150,86
r/int/2	88,05	81,46	140,14	47,15	101,84	59,99	97,59	60,41	87,76	77,61	88,35	80,31
r/int/3	57,6	49,97	120,3	11,93	103,93	21,01	81,12	29,22	53,74	48,46	56,49	42,34
r/int/4	50,27	43,23	103,77	4,51	76,7	13,37	63,16	21,63	48,6	38,64	52,13	36,74
r/int/5	57,6	49,97	120,3	11,93	103,33	21,05	83,67	23,24	53,55	48,96	50,57	46,5
r/int/6	88,05	81,46	140,14	47,15	101,61	60,16	94,53	68,14	85,25	80,09	93,62	70,12
r/int/7	153,86	150,1	183,4	132,38	169,97	145,7	167,85	152,51	154,99	151,26	162,34	144,95

Tabla I.4.83: Tracciones cables combinaciones ELU1 a ELU6 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

Cable	ELU7		ELU8		ELU9		ELU10		ELU11		ELU12	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}										
ba/s/1-a	390,1	389,57	337,28	336,75	364,93	364,4	339,4	338,87	319,78	319,25	352,7	352,17
ba/s/1-b	378,9	378,37	336,18	335,65	334,87	334,34	318,42	317,89	326,4	325,87	328,38	327,85
al/s/1-a	247,01	246,36	288,53	287,88	320,68	320,03	330,98	330,33	297,49	296,85	331,49	330,84
al/s/1-b	215,88	215,23	272,54	271,89	255,04	254,39	300,47	299,82	308,94	308,3	283,51	282,87
ba/s/2-a	185,06	184,66	131,17	130,76	141,99	141,59	112,93	112,52	110,5	110,09	128,24	127,84
ba/s/2-b	180,94	180,53	136,38	135,97	115,02	114,62	118,52	118,11	149,27	148,86	125,97	125,56
al/s/2-a	178,28	177,91	211,76	211,4	239,98	239,61	256,78	256,42	229,68	229,32	255,22	254,86
al/s/2-b	178,14	177,78	210,8	210,44	210,98	210,61	259,91	259,54	264,03	263,66	255,12	254,75
ba/s/3-a	179,87	179,46	136,54	136,14	144,18	143,77	111,3	110,9	105,38	104,98	125,49	125,08
ba/s/3-b	184,66	184,26	130,17	129,77	115,13	114,73	119,18	118,77	147,07	146,67	128,09	127,69
al/s/3-a	215,78	215,13	272,93	272,28	292,11	291,47	291,82	291,17	258,4	257,75	283,68	283,03
al/s/3-b	246,9	246,25	288,28	287,63	281,22	280,57	332,52	331,87	343,29	342,64	331,84	331,19

Cable	ELU7		ELU8		ELU9		ELU10		ELU11		ELU12	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}										
ba/s/4-b	379,28	378,75	336,27	335,74	332,08	331,55	323,25	322,72	335,27	334,74	328,67	328,14
ba/s/4-a	390,46	389,93	336,87	336,34	324,24	323,71	350,69	350,16	383,73	383,2	352,81	352,28
al/n/1-a	351,06	350,36	400,8	400,1	379,56	378,86	422,4	421,7	433,92	433,22	401,26	400,56
al/n/1-b	360,08	359,38	414	413,3	405,68	404,98	422,88	422,18	426,32	425,62	427,15	426,45
ba/n/1-a	232,79	232,25	199,08	198,53	174,03	173,49	171,65	171,11	190,13	189,58	165,89	165,35
ba/n/1-b	240,02	239,48	172,8	172,25	193,98	193,43	157,49	156,94	142,85	142,31	156,51	155,97
al/n/2-a	174,72	174,18	225,88	225,35	222,97	222,43	273,23	272,7	282,01	281,48	275,54	275,01
al/n/2-b	179,04	178,51	226,3	225,77	254,53	254	268,82	268,29	244,01	243,47	276,12	275,59
ba/n/2-a	169,93	169,63	135,38	135,08	110,29	109,99	102,46	102,15	118,05	117,74	98,25	97,94
ba/n/2-b	169,76	169,46	135,88	135,57	138,06	137,76	103,05	102,75	94,05	93,74	98,12	97,81
al/n/3-a	179,8	179,27	226,45	225,92	223,66	223,12	270,22	269,68	281,45	280,91	276,7	276,17
al/n/3-b	175,27	174,74	227,06	226,53	255,96	255,42	271,01	270,48	246,49	245,96	275,86	275,32
ba/n/3-a	239,66	239,11	172,16	171,62	155,63	155,09	158,19	157,64	180,84	180,29	156,47	155,93
ba/n/3-b	231,78	231,23	199,49	198,94	210,73	210,18	173,83	173,29	158,66	158,12	165,69	165,15
al/n/4-b	359,88	359,18	413,79	413,09	415,4	414,7	420,16	419,46	411,25	410,55	427,17	426,47
al/n/4-a	350,88	350,18	401,33	400,63	431,36	430,66	418,56	417,86	379,45	378,75	401,16	400,46
r/mod1/s	180,77	179,68	193,7	154,45	195,57	165,7	203,93	155,03	203,37	148,94	209,58	160,65
r/mod1/n	171	167,06	192,84	152,98	185,17	151,95	204,23	143,47	208,27	145,59	193,17	141,57
r/mod2/s	178,12	171,67	186,71	151,29	198,25	149,75	199,15	149,37	191,2	154,95	208,33	153,24
r/mod2/n	159,95	155,63	183,52	151,21	190,68	141,48	203,79	140,23	193,48	149,05	192,16	137,5
r/mod3/s	181,05	172,54	182,17	149,88	183,84	155,05	198,44	148,28	203,73	147,73	210,08	153,49
r/mod3/n	158,03	154,53	183,33	160,24	185	157,64	205,24	144,86	201,85	142,97	191,87	141,18
r/mod4/s	180,87	172,12	182,4	149,35	190,47	144,66	198,21	149,09	197,1	158,14	210,08	153,31
r/mod4/n	158,13	154,89	183,93	160,17	197,36	152,46	204,23	145,04	189,33	148,3	192,09	141,23
r/mod5/s	178,12	171,03	186,44	151,02	179,77	150,88	199,03	147,88	209,58	150,54	208,39	152,95
r/mod5/n	159,93	156,04	183,97	151,56	191,76	157,18	204,71	140,25	197,2	134,06	192,43	137,4
r/mod6/s	180,84	179,75	193,52	154,32	192,83	148,42	202,95	158,27	204,99	172,39	209,62	160,73
r/mod6/n	171,04	166,83	193,1	153,12	204,82	153,9	199,76	144,15	182,68	145,8	193,04	141,5
r/int/1	155,42	152,89	176,1	139,23	171,54	139,1	181,82	131,17	185,41	132,62	185,43	134,85
r/int/2	89,52	80,03	119,76	57,09	122,81	57,37	141,83	46,9	131,68	46,71	129,93	46,52
r/int/3	60,54	46,98	82,06	23,84	93,19	18,72	115,81	10,35	112,99	18,37	126,87	15,38
r/int/4	49,99	42,54	75,37	20,34	83,7	13,95	104,51	3,63	92,58	6,73	94,47	4,23

Cable	ELU7		ELU8		ELU9		ELU10		ELU11		ELU12	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}										
r/int/5	60,85	46,73	82,36	23,71	91,15	21,68	115,46	10,27	115,81	14,34	127,11	15,28
r/int/6	88,9	79,95	119,88	56,9	126,02	53,46	139,3	47,75	126,3	51,71	130,13	46,42
r/int/7	155,39	152,84	176,02	139,24	178,18	137,62	180,77	133,77	177,38	138,95	185,46	134,92

Tabla I.4.84: Tracciones cables combinaciones ELU7 a ELU12 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

Cable	ELU13		ELU14		ELU15		ELU16		ELU17	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}								
ba/s/1-a	352,76	352,23	406,87	406,34	341,7	341,17	313,44	312,91	369,25	368,72
ba/s/1-b	382,65	382,12	380,59	380,06	339,24	338,71	353,04	352,51	354,53	354
al/s/1-a	222,73	222,08	267,26	266,62	277,44	276,8	234,52	233,87	285,72	285,07
al/s/1-b	216,98	216,33	192,25	191,6	264,66	264,01	280,89	280,25	243,07	242,42
ba/s/2-a	196,8	196,4	210,11	209,71	132,38	131,97	125,65	125,24	155,15	154,74
ba/s/2-b	201,47	201,06	146,72	146,32	143,3	142,9	200,97	200,57	152,01	151,61
al/s/2-a	145,93	145,57	186,02	185,66	209,28	208,92	171,61	171,25	212,97	212,61
al/s/2-b	144,67	144,3	143,89	143,52	214,44	214,08	226,31	225,95	212,81	212,45
ba/s/3-a	201,6	201,19	208,7	208,29	132,12	131,72	116,77	116,36	151,04	150,64
ba/s/3-b	194,29	193,89	148,26	147,86	143,06	142,65	199,52	199,12	154,85	154,44
al/s/3-a	217,7	217,05	246,22	245,57	250,45	249,8	200,62	199,97	243,08	242,43
al/s/3-b	222,17	221,52	211,5	210,86	280,08	279,43	304,94	304,29	285,92	285,27
ba/s/4-b	382,77	382,24	374,4	373,87	349,86	349,33	371,79	371,26	354,97	354,44
ba/s/4-a	352	351,47	324,63	324,1	362,1	361,57	438,47	437,94	369,54	369,01
al/n/1-a	387,47	386,77	347,88	347,18	399,3	398,6	427,87	427,17	366,69	365,99
al/n/1-b	376,58	375,88	366,07	365,38	389,62	388,92	395,85	395,15	393,83	393,13
ba/n/1-a	272,39	271,84	210,01	209,46	196,28	195,74	247,8	247,25	191,96	191,42
ba/n/1-b	210,08	209,53	257,28	256,74	184,6	184,05	158,59	158,04	194,7	194,16
al/n/2-a	170,91	170,37	155,9	155,36	222,46	221,93	237,71	237,17	222,78	222,25
al/n/2-b	165,32	164,78	203,84	203,3	217,52	216,98	176,3	175,77	227,2	226,66
ba/n/2-a	203,68	203,37	149,09	148,78	129,28	128,97	170,23	169,92	127,8	127,49
ba/n/2-b	204,85	204,54	207,88	207,58	128,81	128,51	115,39	115,09	127,57	127,27
al/n/3-a	165,11	164,58	152,47	151,94	220,34	219,81	238,75	238,22	228,1	227,56
al/n/3-b	172,66	172,13	206,69	206,16	218,76	218,23	179,3	178,77	223,35	222,82

Cable	ELU13		ELU14		ELU15		ELU16		ELU17	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}								
ba/n/3-a	208,83	208,29	178,25	177,7	189,86	189,32	244,69	244,14	194,46	193,92
ba/n/3-b	273,27	272,73	287,57	287,02	198,94	198,39	173,88	173,33	191,16	190,61
al/n/4-b	376,18	375,48	384,51	383,81	385,51	384,81	368,75	368,05	393,74	393,04
al/n/4-a	388,23	387,53	431,91	431,21	394,15	393,45	341,12	340,42	366,5	365,8
r/mod1/s	171,59	163,24	186,17	177,49	185,34	157,96	185,87	149,46	194,77	169,58
r/mod1/n	186,61	182,14	183,58	170,13	192,91	156,66	203,42	161,85	175,65	153,89
r/mod2/s	166,53	160,7	183,77	158,61	178,25	152,85	172,15	167,63	193,47	161,43
r/mod2/n	189,54	167,14	174,29	165,76	187,02	151,88	178,15	171,55	168,7	145,96
r/mod3/s	159,25	156,27	171,07	162,17	177,71	150,9	190,4	154,67	196,86	161,94
r/mod3/n	202,02	168,35	191,23	165,69	188,92	154,54	188,79	153,9	167,58	146,27
r/mod4/s	158,59	155,45	171,77	150,73	177,25	152,24	182,52	174,82	196,85	161,57
r/mod4/n	201,86	169,42	185,9	180,17	187,43	155,19	169,71	164,17	167,96	146,37
r/mod5/s	165,97	160,18	163,08	154,4	178,35	150,48	200,44	160,02	193,55	160,84
r/mod5/n	190,17	167,9	194,31	176,04	188,66	152,32	180,85	144,16	169,14	145,84
r/mod6/s	171,26	163,11	170,82	150,7	183,89	164,21	197,1	191,48	194,84	169,77
r/mod6/n	186,89	182,65	201,52	182,9	186,02	159,4	168,28	161,8	175,42	153,87
r/int/1	158,04	154,7	157,16	151,79	166,07	138,66	172,42	141,49	170,81	144,1
r/int/2	85,37	80,04	83,64	78,42	114,18	59,49	102,23	65,03	99,74	65,5
r/int/3	68,63	35,75	50,34	44,82	79,21	25,39	72,5	37,38	94,91	30,17
r/int/4	51,39	33,63	43,63	39,04	75,62	17,97	58,69	27,41	63,56	24,04
r/int/5	68,1	35,85	54	43,28	78,75	25,6	77,71	30,78	95,29	29,96
r/int/6	85,4	79,74	90,29	73,56	110,01	61,44	91,31	72	99,82	65,04
r/int/7	157,89	154,84	163,76	154,68	164,65	143,92	158,65	152,38	170,82	144,2

Tabla I.4.85: Tracciones cables combinaciones ELU13 a ELU17 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

Cable	ELS-Car1		ELS-Car2		ELS-Car3		ELS-Car4		ELS-Car5	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}								
ba/s/1-a	344,16	343,77	363,24	362,85	343,19	342,8	329,61	329,22	352,97	352,58
ba/s/1-b	346,96	346,57	346,07	345,67	333,31	332,92	337,83	337,43	339,65	339,25
al/s/1-a	267,77	267,29	287,98	287,5	293,76	293,28	273,56	273,08	295,91	295,43
al/s/1-b	254,94	254,46	243,64	243,16	273,33	272,85	279,96	279,48	263,65	263,17

Cable	ELS-Car1		ELS-Car2		ELS-Car3		ELS-Car4		ELS-Car5	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}								
ba/s/2-a	145,74	145,44	152,58	152,28	128,63	128,33	125,62	125,32	137,57	137,27
ba/s/2-b	149,93	149,63	133,19	132,89	133,74	133,44	155,13	154,83	137,13	136,83
al/s/2-a	196,69	196,42	214,89	214,62	225,02	224,75	208,44	208,17	225,74	225,47
al/s/2-b	196,11	195,84	195,99	195,72	227,15	226,88	231,32	231,05	225,68	225,41
ba/s/3-a	150,04	149,74	154,76	154,46	129,11	128,81	123,42	123,12	136,77	136,47
ba/s/3-b	144,98	144,68	132,19	131,89	132,96	132,66	152,86	152,56	137,43	137,13
al/s/3-a	255,21	254,73	267,66	267,18	267,56	267,08	246,34	245,86	263,74	263,26
al/s/3-b	267,58	267,1	262,55	262,07	294,9	294,42	303,54	303,06	296,08	295,6
ba/s/4-b	347,02	346,63	344,15	343,76	337,07	336,67	345,01	344,62	339,82	339,43
ba/s/4-a	343,88	343,49	333,49	333,1	351,37	350,98	375,99	375,6	353,07	352,68
al/n/1-a	387,62	387,1	372,61	372,09	399,33	398,81	407,69	407,17	385,5	384,98
al/n/1-b	394,9	394,39	389,54	389,02	401,06	400,55	402,92	402,41	403,07	402,56
ba/n/1-a	208,01	207,61	188,21	187,81	185,14	184,74	200,64	200,23	182,1	181,7
ba/n/1-b	190,11	189,71	204,86	204,46	177,13	176,73	167,66	167,26	179,43	179,03
al/n/2-a	208,16	207,76	205,66	205,26	237,75	237,36	243,47	243,07	238,22	237,83
al/n/2-b	208,69	208,29	227,5	227,1	235,64	235,24	218,74	218,34	239,86	239,46
ba/n/2-a	145,59	145,36	126,46	126,23	119,25	119,03	132,37	132,14	117,42	117,19
ba/n/2-b	145,94	145,71	146,64	146,41	119,15	118,93	113,45	113,22	117,34	117,11
al/n/3-a	208,75	208,36	206,53	206,13	236,7	236,3	244,19	243,79	240,22	239,83
al/n/3-b	208,93	208,53	227,84	227,45	236,28	235,89	219,43	219,04	238,43	238,03
ba/n/3-a	189,66	189,26	177,08	176,67	178,91	178,5	197,62	197,21	179,38	178,97
ba/n/3-b	208,31	207,9	215,09	214,69	186,23	185,83	175,43	175,03	181,9	181,5
al/n/4-b	394,76	394,24	396,36	395,84	399,16	398,64	392,71	392,2	403,05	402,53
al/n/4-a	387,96	387,44	407,56	407,04	397,05	396,53	371,13	370,61	385,44	384,92
r/mod1/s	185,28	158,26	186,67	166,05	191,75	157,52	191,26	153,18	195,39	161,65
r/mod1/n	186,1	159,01	180,67	158,21	192,53	150,86	195,47	151,95	185,27	149,7
r/mod2/s	177,92	153,65	185,43	151,99	185,39	151,16	180,16	155,55	191,38	153,74
r/mod2/n	176,57	154,78	181,24	147,47	189,24	145,45	182,49	151,51	181,67	143,22
r/mod3/s	174,79	152,56	175,63	155,77	184,82	150,14	188,69	150,04	192,39	153,69
r/mod3/n	176,4	160,95	177,26	158,77	190	148,53	187,93	146,73	181,21	145,51
r/mod4/s	174,93	152,17	179,94	148,27	184,63	150,71	184,25	157,7	192,39	153,55
r/mod4/n	176,81	160,9	185,74	155,01	189,36	148,76	179,32	150,87	181,36	145,55

Cable	ELS-Car1		ELS-Car2		ELS-Car3		ELS-Car4		ELS-Car5	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}								
r/mod5/s	177,73	153,46	172,98	153,03	185,43	150,2	192,95	152,35	191,41	153,53
r/mod5/n	176,88	155,02	182,01	158,47	189,86	145,52	184,85	140,84	181,85	143,16
r/mod6/s	185,15	158,17	184,42	153,37	191,15	160,01	192,91	170,54	195,42	161,71
r/mod6/n	186,27	159,1	193,9	159,12	189,67	151,76	178,42	153,24	185,19	149,66
r/int/1	167,81	142,89	164,83	142,76	171,62	136,83	173,82	137,5	173,67	139,12
r/int/2	107,46	64,47	109,11	63,89	121,31	55,87	115,79	57,19	114,76	57,11
r/int/3	72,21	32,95	79,36	28,67	93,47	21,15	91,4	26,07	100,14	23,37
r/int/4	65,63	27,78	70,96	22,65	83,96	14,14	76,96	17,44	78,61	15,54
r/int/5	72,39	32,83	77,85	30,59	93,28	21,2	93,42	23,44	100,28	23,28
r/int/6	107,54	64,34	111,49	61,44	119,65	56,62	111,74	60,34	114,86	57
r/int/7	167,76	142,9	169,4	141,83	170,92	138,74	168,44	142,11	173,68	139,15

Tabla I.4.86: Tracciones cables combinaciones ELS-Car1 a ELS-Car5 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

Cable	ELS-Car6		ELS-Car7		ELS-Car8		ELS-Car9		ELS-Car10	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}								
ba/s/1-a	357,24	356,85	392,66	392,27	348,77	348,38	328,13	327,74	367,32	366,93
ba/s/1-b	377,96	377,57	376,43	376,04	349,32	348,93	356,84	356,45	358,79	358,4
al/s/1-a	225,03	224,55	254,16	253,68	260,57	260,09	233,4	232,92	267,33	266,85
al/s/1-b	218,88	218,4	202,34	201,86	249,82	249,34	261,86	261,38	237,39	236,91
ba/s/2-a	189,66	189,36	199,52	199,22	146,55	146,25	139,84	139,54	159,45	159,15
ba/s/2-b	193,37	193,07	157,58	157,28	154,44	154,14	192,64	192,34	157,84	157,54
al/s/2-a	153,15	152,88	180,05	179,78	194,73	194,46	171,15	170,88	198,93	198,66
al/s/2-b	152,34	152,07	151,92	151,65	198,21	197,94	207,39	207,12	198,83	198,56
ba/s/3-a	193,5	193,2	199,42	199,12	147,11	146,81	134,85	134,55	157,17	156,87
ba/s/3-b	188,04	187,74	157,88	157,58	153,83	153,53	191,16	190,86	159,19	158,89
al/s/3-a	219,36	218,88	238,19	237,71	240,45	239,97	208,64	208,16	237,42	236,94
al/s/3-b	224,66	224,18	217,05	216,57	262,51	262,03	279,72	279,24	267,43	266,95
ba/s/4-b	378,04	377,64	372,9	372,51	356,61	356,22	370,22	369,82	359,06	358,67
ba/s/4-a	356,75	356,36	336,27	335,88	363,09	362,7	413,83	413,43	367,53	367,13
al/n/1-a	378,27	377,75	351,51	350,99	386,46	385,94	404,61	404,1	365,22	364,71
al/n/1-b	370,17	369,65	362,65	362,14	379,3	378,78	382,6	382,08	381,02	380,5

Cable	ELS-Car6		ELS-Car7		ELS-Car8		ELS-Car9		ELS-Car10	
	F _{Ed,Max}	F _{Ed,Min}								
ba/n/1-a	258,03	257,63	215,79	215,38	206,52	206,12	241,77	241,36	203,77	203,37
ba/n/1-b	219,02	218,62	249,22	248,82	198,23	197,83	181,61	181,21	207,36	206,96
al/n/2-a	169,42	169,02	161,03	160,63	205,85	205,45	215,44	215,04	204,67	204,28
al/n/2-b	166,59	166,2	194,21	193,82	202,92	202,52	175	174,6	208,19	207,79
ba/n/2-a	193,26	193,03	155,89	155,66	141,32	141,1	169,9	169,68	140,86	140,63
ba/n/2-b	193,99	193,76	195,32	195,09	140,5	140,27	131,65	131,42	140,73	140,5
al/n/3-a	166,53	166,13	159,71	159,32	204,88	204,48	216,91	216,51	208,76	208,37
al/n/3-b	170,61	170,21	195,67	195,27	203,48	203,08	176,43	176,03	205,03	204,63
ba/n/3-a	218,19	217,79	196,2	195,8	203,02	202,62	241,65	241,25	207,19	206,78
ba/n/3-b	258,62	258,21	268,14	267,74	207,84	207,44	189,91	189,51	203,25	202,84
al/n/4-b	369,9	369,38	375,11	374,59	376,32	375,81	364,71	364,2	380,93	380,41
al/n/4-a	378,78	378,26	408,09	407,57	383,38	382,86	346,32	345,8	365,12	364,61
r/mod1/s	171,31	165,34	180,35	174,89	180,29	161,3	180,13	154,77	186,25	169,11
r/mod1/n	181,45	178,66	179,45	170,64	186,1	161,52	192,71	163,86	174,81	159,59
r/mod2/s	165,52	161,66	176,31	159,14	172,85	155,4	168,31	165,11	182,46	160,72
r/mod2/n	179,52	164,53	169,95	163,95	179,01	155,26	172,41	167,4	167,18	150,72
r/mod3/s	160,6	158,59	167,4	161,55	172,48	153,98	180,51	155,98	184,54	160,98
r/mod3/n	187,65	165,14	181,06	163,96	180,18	157,02	179,4	155,04	166,33	150,89
r/mod4/s	160,09	158,04	167,95	153,5	172,15	154,92	175,3	169,91	184,53	160,72
r/mod4/n	187,55	165,86	177,79	173,68	179,22	157,55	166,45	162,31	166,59	150,95
r/mod5/s	165,15	161,31	161,98	156,32	173,05	153,86	187,45	159,83	182,5	160,33
r/mod5/n	179,95	165,05	183,3	171,25	180,09	155,54	174,06	148,58	167,48	150,64
r/mod6/s	171,1	165,27	170,02	156,01	179,41	165,82	187,69	184,33	186,29	169,25
r/mod6/n	181,64	179	191,81	179,14	181,68	163,71	168,8	164,62	174,67	159,58
r/int/1	155,89	153,31	154,74	151,5	161,41	142,66	165,22	143,89	164,1	145,94
r/int/2	85,24	81,85	83,91	80,04	103,64	66,27	96,94	71,18	95,48	71,39
r/int/3	62,05	40,86	51	48,29	70,25	33,59	65,76	40,85	79,54	35,15
r/int/4	50,51	37,79	45,27	41,49	65,27	25,9	55,25	33,4	58,88	30,85
r/int/5	61,73	41,01	53,61	47,17	70,02	33,81	69,39	36,56	79,76	34,98
r/int/6	85,25	81,65	88,53	76,82	100,93	67,74	89,33	75,7	95,54	71,08
r/int/7	155,79	153,4	159,55	153,4	160,39	146,21	156,11	151,51	164,1	145,99

Tabla I.4.87: Tracciones cables combinaciones ELS-Car6 a ELS-Car10 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

APÉNDICE 03. RESULTADOS EN MEMBRANA

Comb.	BA/S/1	AL/S/1	BA/S/2	AL/S/2	BA/S/3	AL/S/3	BA/S/4
EN1	0,7	1,5	1,6	2,5	1,6	1,5	0,7
EN2	9,8	24,6	18,9	41,3	18,9	24,6	9,8
EN3	8,4	10,4	21,6	23,8	21,2	10,3	8,4
EN4	13,5	15,8	23	22	20,2	11,4	11,1
EN5	1,8	1,5	3,3	2,2	3,8	2,9	2,6
EN6	8,8	12,5	20,6	20,9	23,6	19,4	20,3
EN7	4,4	5,5	1,3	4,3	1,5	5,5	4,5
EN8	7,4	14,9	14,3	19,7	14,4	14,9	7,5
EN9	7,8	21,4	17,3	29	17	17,3	9,4
EN10	6	8,1	8,3	5,9	8,6	8,2	6,1
EN11	7	20,1	16,9	23,5	16,5	14,3	10,1
EN12	9,7	22,3	18,8	37	19,1	21,7	8,2
EN13	11,6	20,5	19,5	36,7	21,9	28,5	13,3
EN14	7	21,4	13,4	35,2	13,6	21,5	6,9

Tabla I.4.88: Desplazamientos $|u|$ de mástiles lado sur en combinaciones Norma UNE-EN 13782 (desplazamientos en mm). Elaboración: Propia.

Comb.	AL/N/1	BA/N/1	AL/N/2	BA/N/2	AL/N/3	BA/N/3	AL/N/4
EN1	1,4	1,5	2,2	2,2	2,2	1,5	1,4
EN2	17,9	17	36,4	27,8	36,4	17	17,9
EN3	6,8	19,3	11,1	31	11,2	19,6	7
EN4	5,6	13,3	16,1	29,9	20,3	25,9	16,5
EN5	4,3	3,5	2,1	2,6	0,8	1,4	3,7
EN6	13,1	20,7	20,3	23,2	18,3	17,3	7,9
EN7	4,2	1,4	1,4	1	1,6	1,4	4,2
EN8	14,5	12,8	18,8	14,5	19,1	13	14,5
EN9	12,5	12,3	25,8	21,5	26,5	16,8	18,6
EN10	11,8	11,7	8,6	3,6	9	12	11,8
EN11	10,2	10,4	21,2	20,2	22,6	19,9	19,8
EN12	16,7	15,6	31,5	25,4	31,2	15,2	15,4
EN13	21,1	20,7	33,3	26,8	32,8	15,4	12,4
EN14	16,3	16,2	33,9	27,6	34,1	16,2	16,3

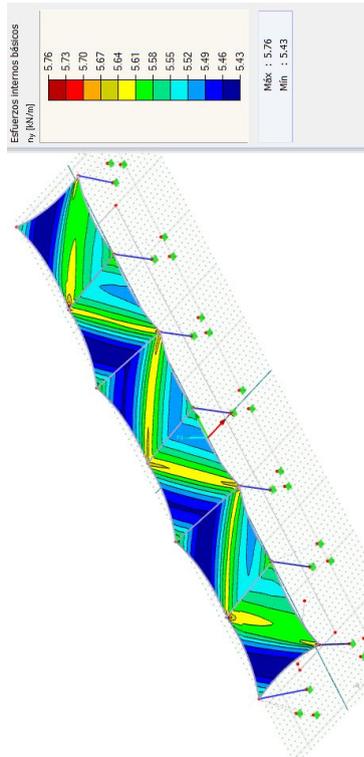
Tabla I.4.89: Desplazamientos $|u|$ de mástiles lado norte en combinaciones Norma UNE-EN 13782 (desplazamientos en mm). Elaboración: Propia.

Comb.	BA/S/1	AL/S/1	BA/S/2	AL/S/2	BA/S/3	AL/S/3	BA/S/4
GE1	8,1	10,8	14,1	18,1	15,7	15,6	10,6
GE2	7,1	15,8	14,5	26,8	14,5	15,8	7,1
GE3	5,4	7,1	12,9	17	12,7	7,1	5,4
GE4	8,6	10,7	14,7	15,5	13,2	8,4	7,6
GE5	1,2	1	2,3	1,5	2,7	2	1,8
GE6	6,2	8,8	13,9	14,2	15,8	13	13,3
GE7	2,8	3,7	0,9	3	1	3,6	2,9
GE8	5,5	9,6	10,1	12,8	10,3	9,6	5,5
GE9	5,2	13,6	12,7	18,7	12,7	11,2	7,2
GE10	7,5	15,8	15	26,4	15,1	15,5	6,6
GE11	8,2	14,3	14,3	25,5	15,1	17,4	7
GE12	6,1	15,5	13,1	26,2	13,2	15,5	6,1
GE13	3,5	1,3	2,8	7,4	2,8	1,4	3,6
GE14	5,1	10,4	11	12,1	10,5	7,2	7,6
GE15	4,7	7,9	9,5	12,8	9,5	7,5	2,9
GE16	8,1	10,8	14,1	18,1	15,7	15,6	10,6
GE17	2,7	8,6	6,8	13,8	7	8,6	2,7

Tabla I.4.90: Desplazamientos $|u|$ de mástiles lado sur en combinaciones Guía Europea (desplazamientos en mm). Elaboración: Propia.

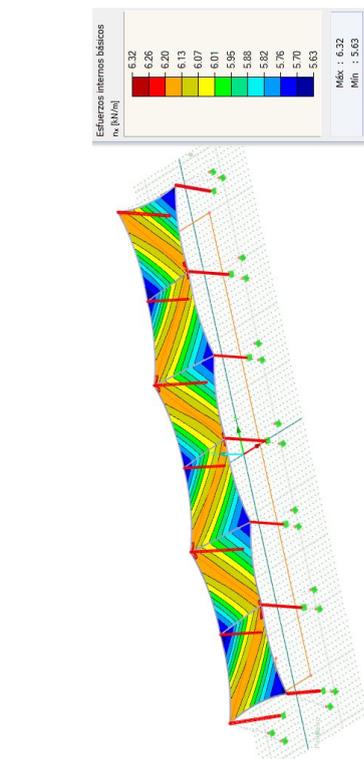
Comb.	AL/N/1	BA/N/1	AL/N/2	BA/N/2	AL/N/3	BA/N/3	AL/N/4
GE1	10,7	13,6	15,9	16,2	15,7	11	6,6
GE2	11,7	12,6	23,6	20,9	23,6	12,6	11,7
GE3	3,9	12,2	9,7	20,6	9,6	12,4	4,1
GE4	4,4	9	11,9	19,8	14,2	16,9	10,8
GE5	3	2,6	1,5	2	0,7	1,1	2,6
GE6	8,4	13,6	13,7	15,4	12,6	11,7	6
GE7	2,8	0,9	0,9	1,1	1,1	1	2,8
GE8	9,7	9,3	12,4	10,5	12,5	9,4	9,6
GE9	8,5	9,4	17	15,9	17,4	12,2	12,3
GE10	11,8	12,7	22,9	21	22,8	12,4	11,2
GE11	13,2	13,9	22,6	20,7	22,6	11,9	9,6
GE12	11,6	12,7	23,7	21,7	23,8	12,8	11,6
GE13	4,2	8,1	2,9	8,3	2,9	8,4	4,3
GE14	4,7	6,6	11	14,2	12,5	14,8	11,6
GE15	6,7	7,8	11	12,4	10,9	6,9	5,8
GE16	10,7	13,6	15,9	16,2	15,7	11	6,6
GE17	6,9	6,9	11,7	12,5	11,9	6,9	6,8

Tabla I.4.91: Desplazamientos $|u|$ de mástiles lado norte en combinaciones Guía Europea (desplazamientos en mm). Elaboración: Propia.

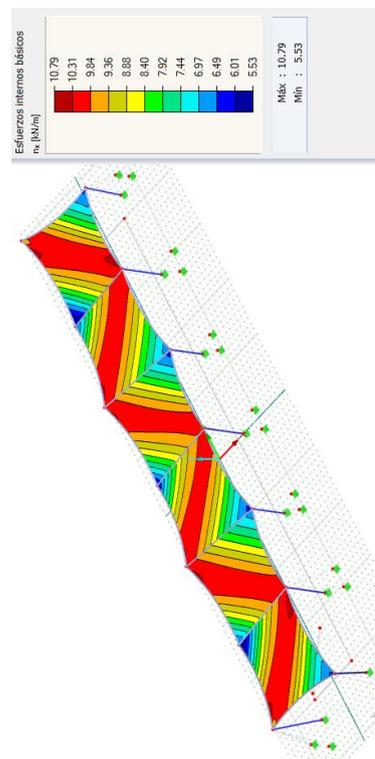


(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

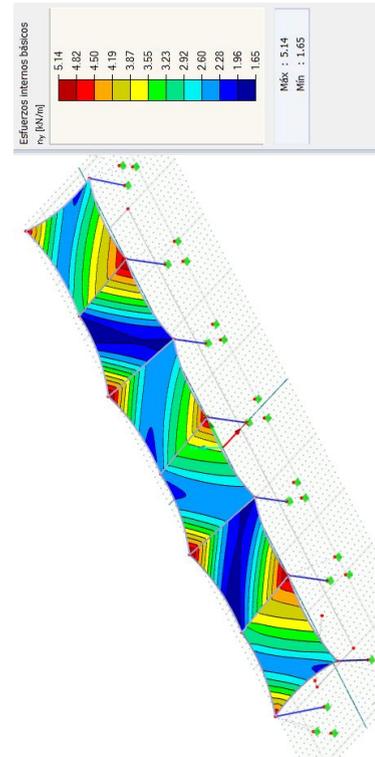
Figura I.4.47: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE1. Elaboración: Propia.



(b) Esfuerzo n_y (Trama)

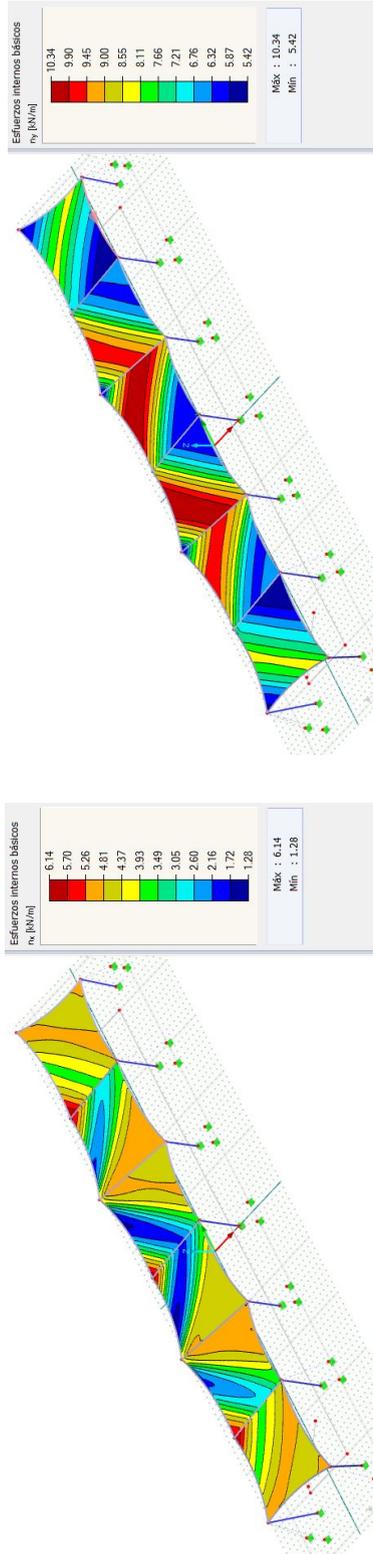


(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)



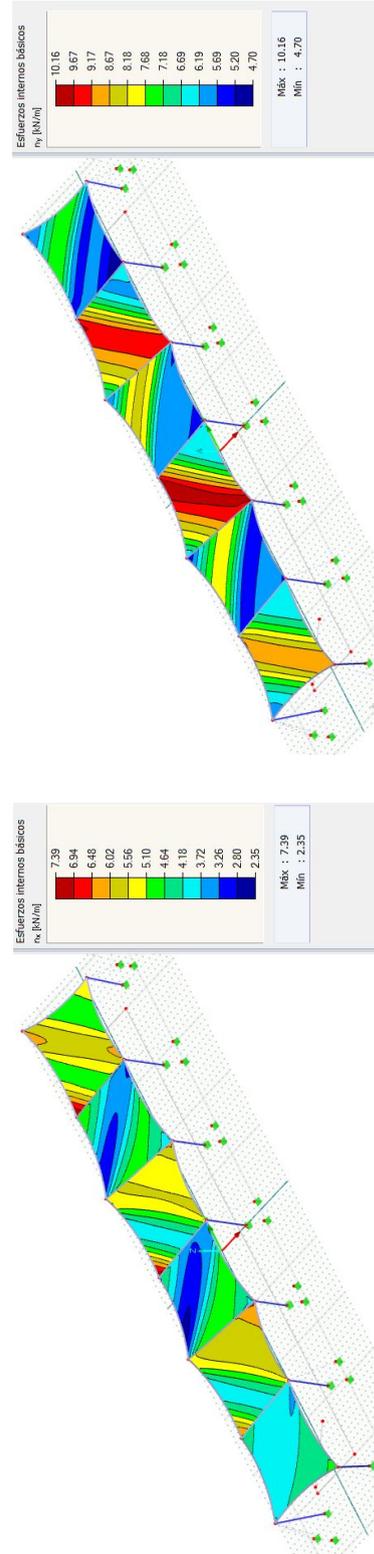
(b) Esfuerzo n_y (Trama)

Figura I.4.48: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE2. Elaboración: Propia.



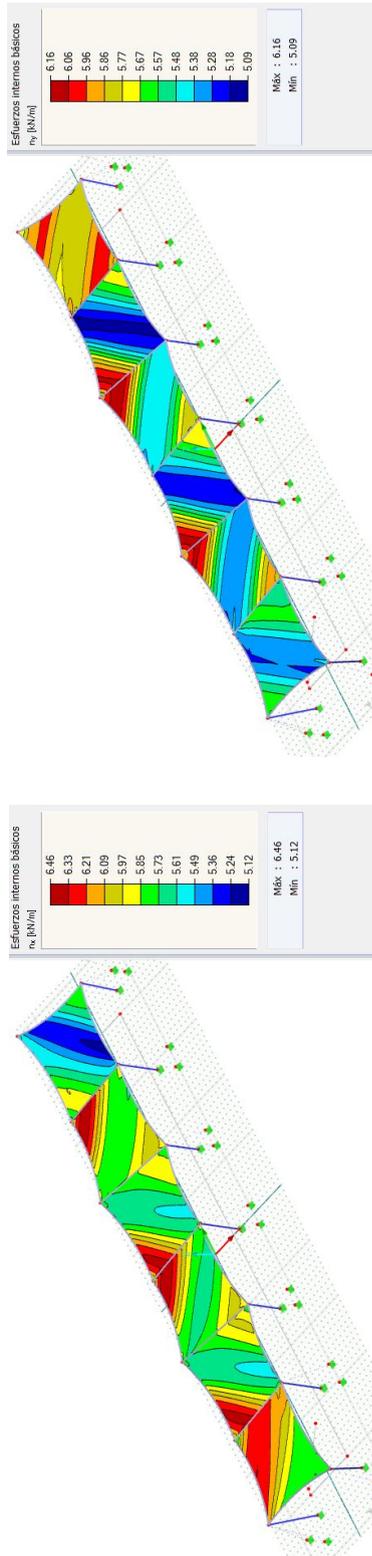
(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

Figura I.4.49: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE3. Elaboración: Propia.



(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

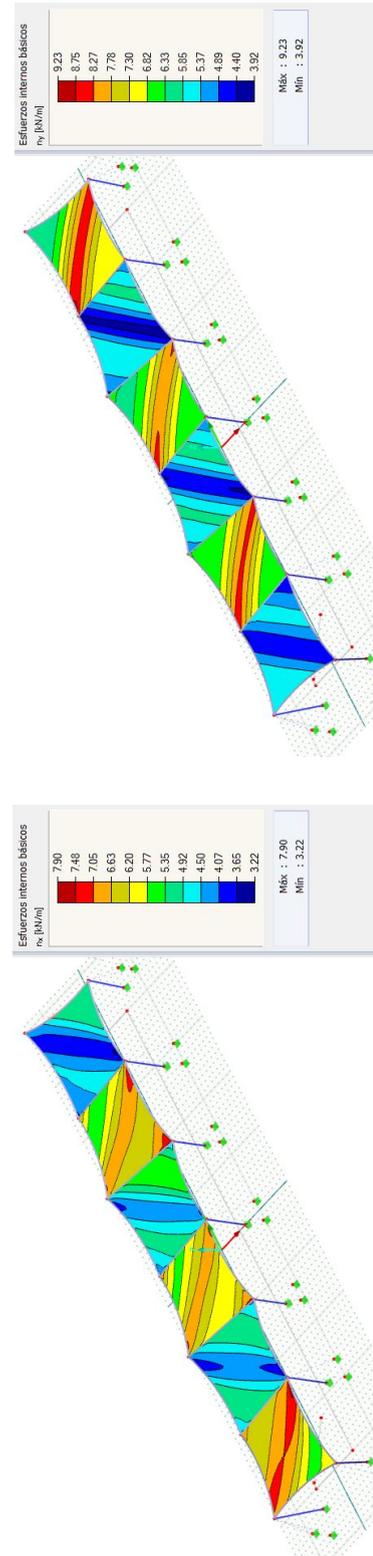
Figura I.4.50: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE4. Elaboración: Propia.



(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

(b) Esfuerzo n_y (Trama)

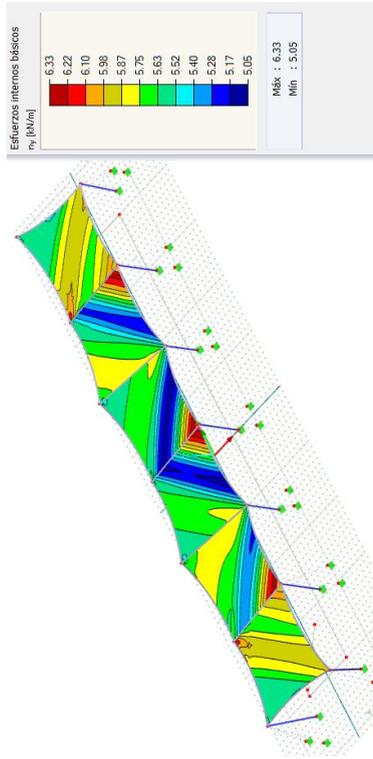
Figura I.4.51: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE5. Elaboración: Propia.



(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

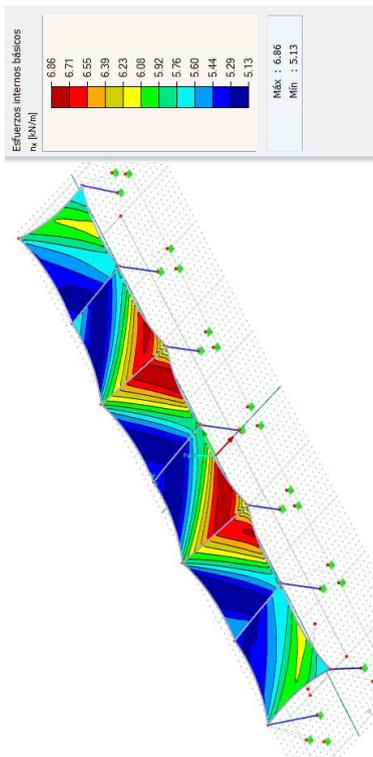
(b) Esfuerzo n_y (Trama)

Figura I.4.52: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE6. Elaboración: Propia.

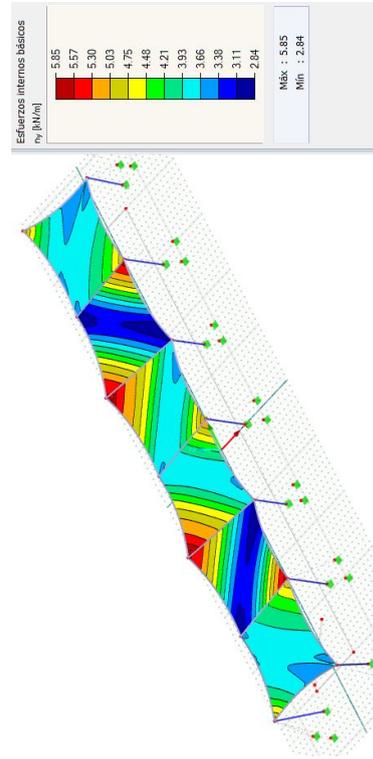


(b) Esfuerzo n_y (Trama)

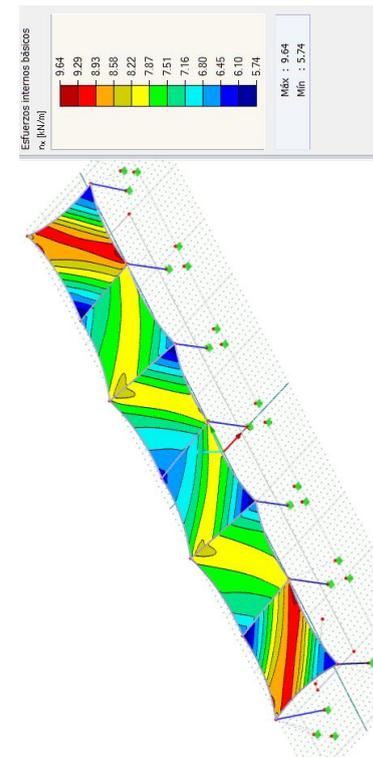
Figura I.4.53: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE7. Elaboración: Propia.



(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

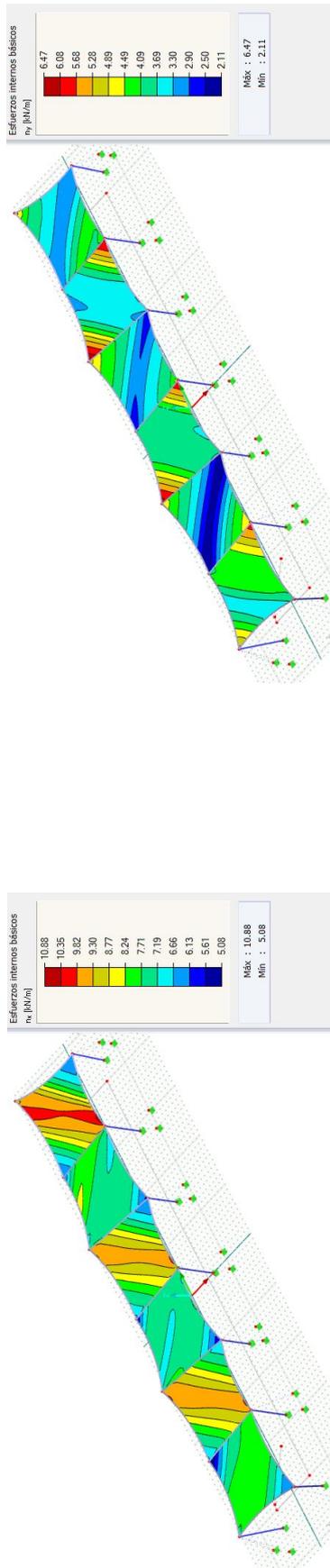


(b) Esfuerzo n_y (Trama)



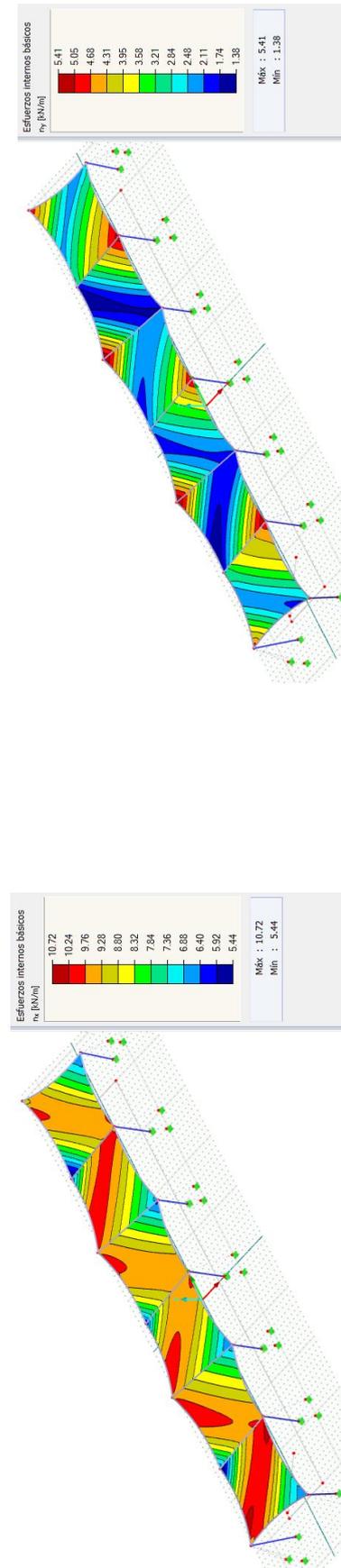
(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

Figura I.4.54: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE8. Elaboración: Propia.



(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

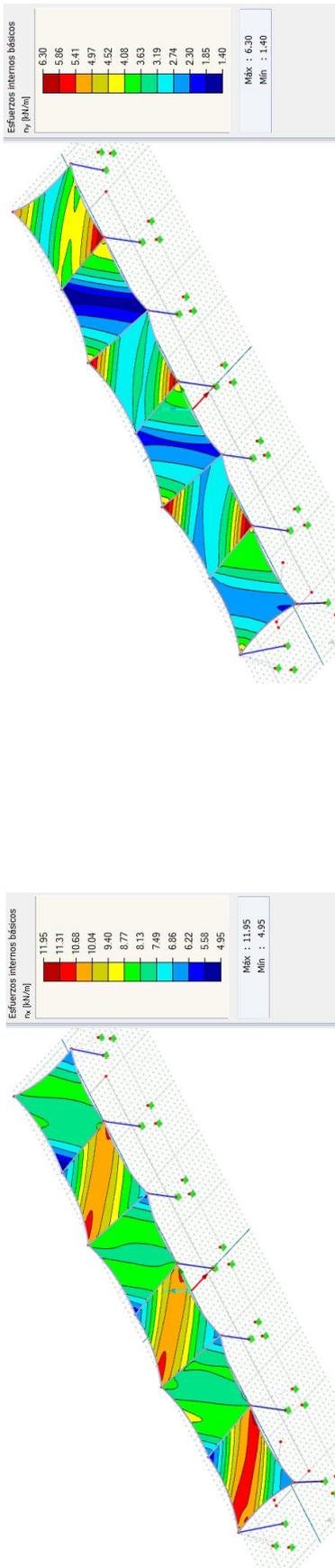
Figura I.4.55: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE9. Elaboración: Propia.



(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

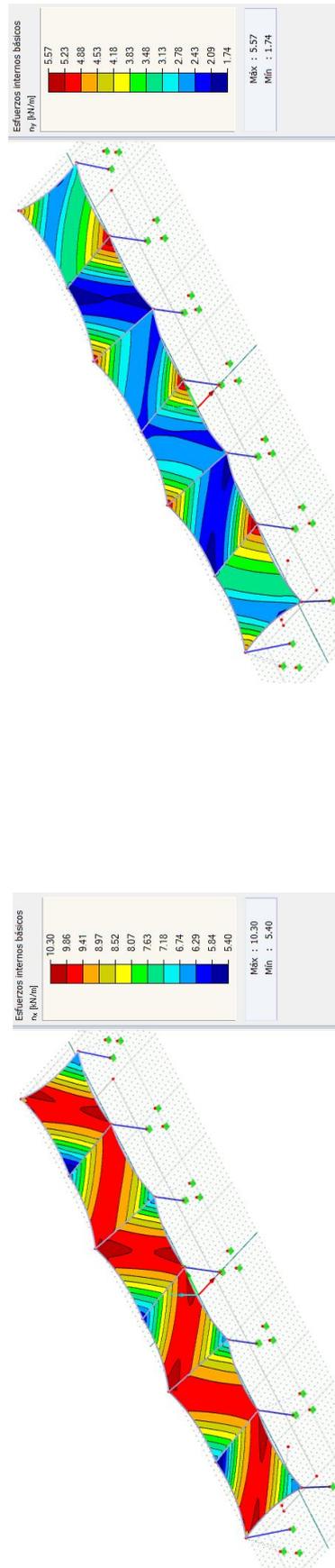
(b) Esfuerzo n_y (Trama)

Figura I.4.56: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE10. Elaboración: Propia.



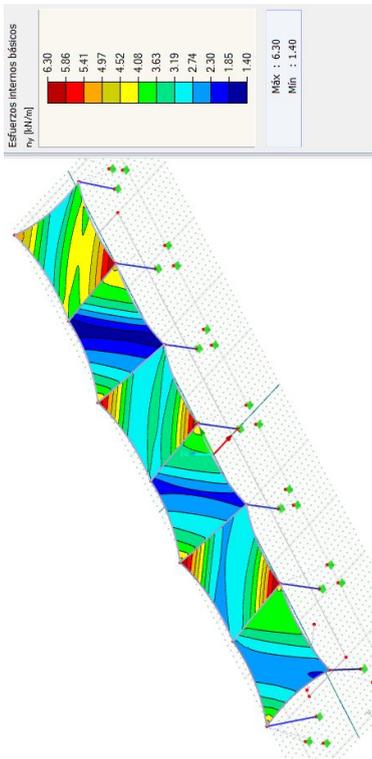
(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

Figura I.4.57: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE11. Elaboración: Propia.

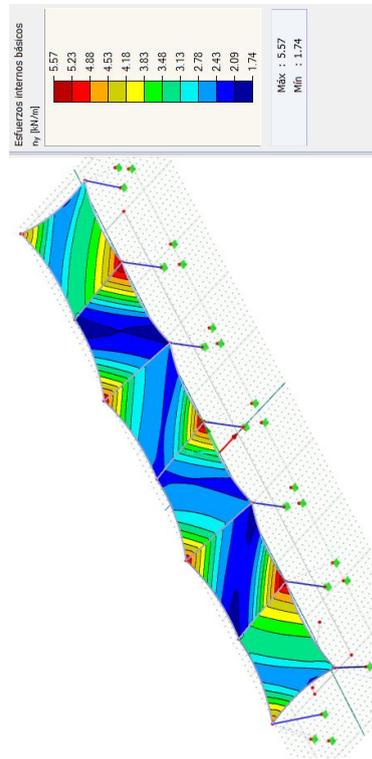


(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

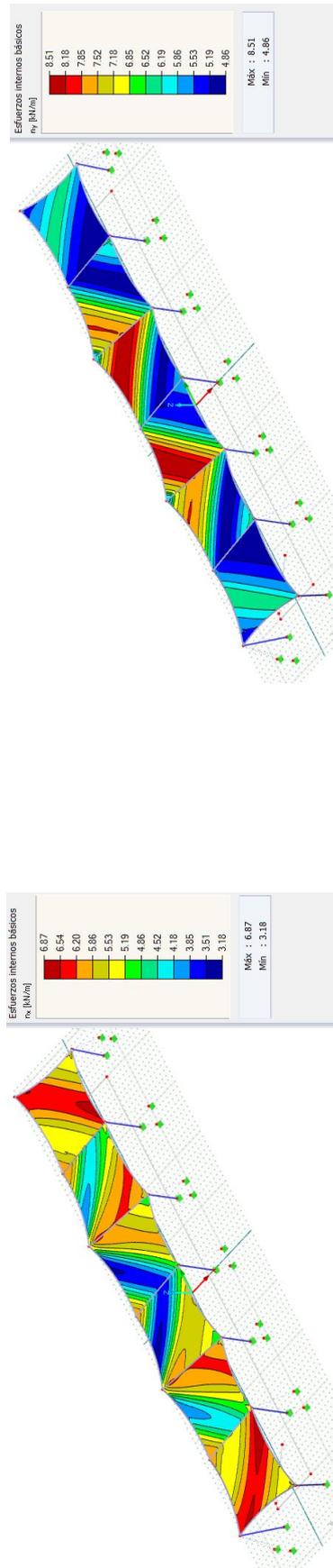
Figura I.4.58: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE12. Elaboración: Propia.



(b) Esfuerzo n_y (Trama)



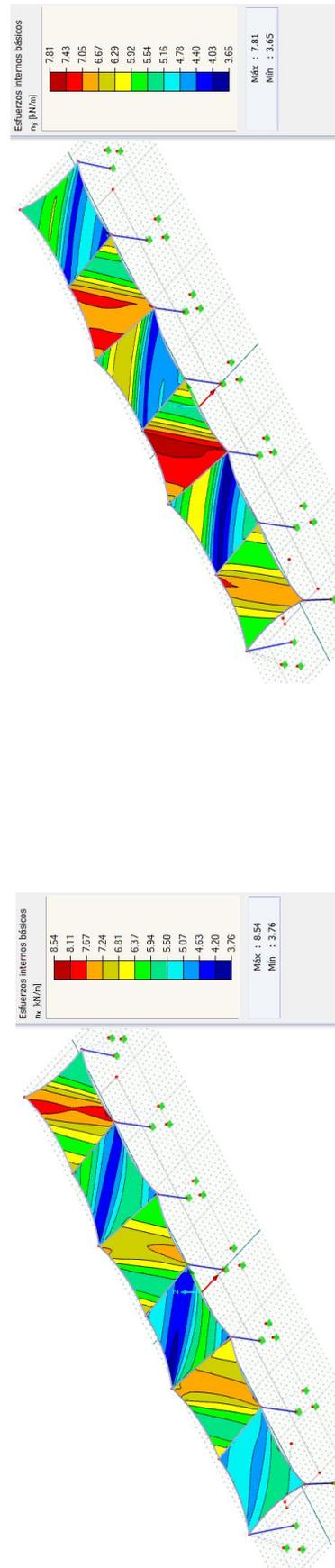
(b) Esfuerzo n_y (Trama)



(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

(b) Esfuerzo n_y (Trama)

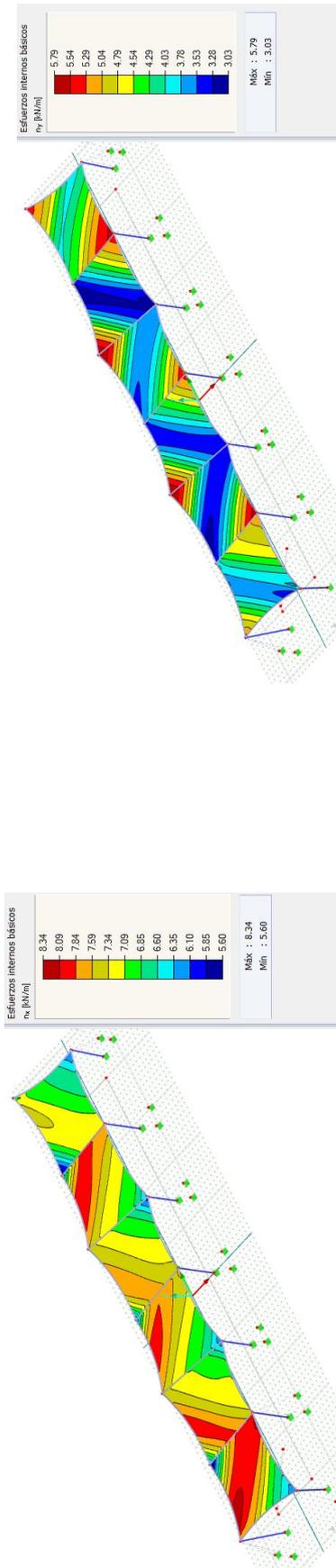
Figura I.4.59: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE13. Elaboración: Propia.



(a) Esfuerzo n_x (Urdimbre)

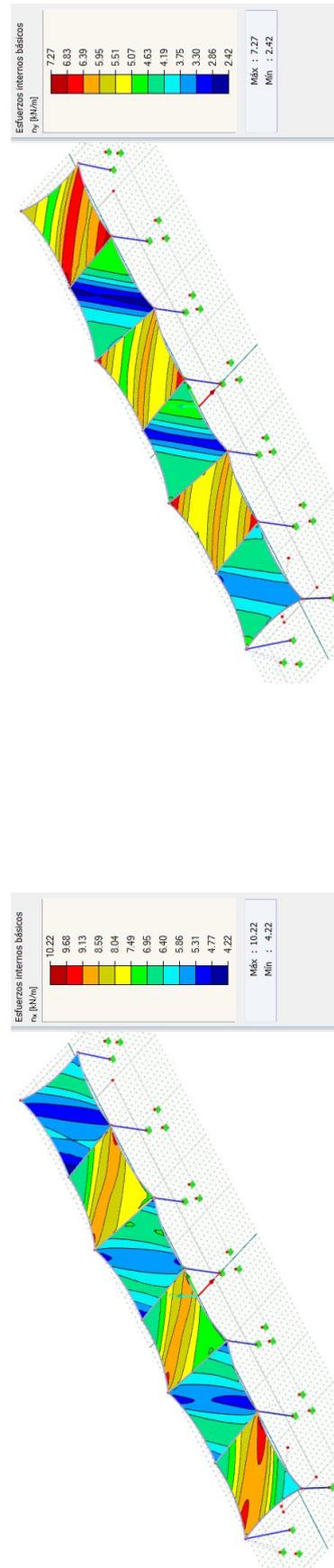
(b) Esfuerzo n_y (Trama)

Figura I.4.60: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE14. Elaboración: Propia.



(b) Esfuerzo n_y (Trama)

Figura I.4.61: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE15. Elaboración: Propia.



(b) Esfuerzo n_y (Trama)

Figura I.4.62: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE16. Elaboración: Propia.

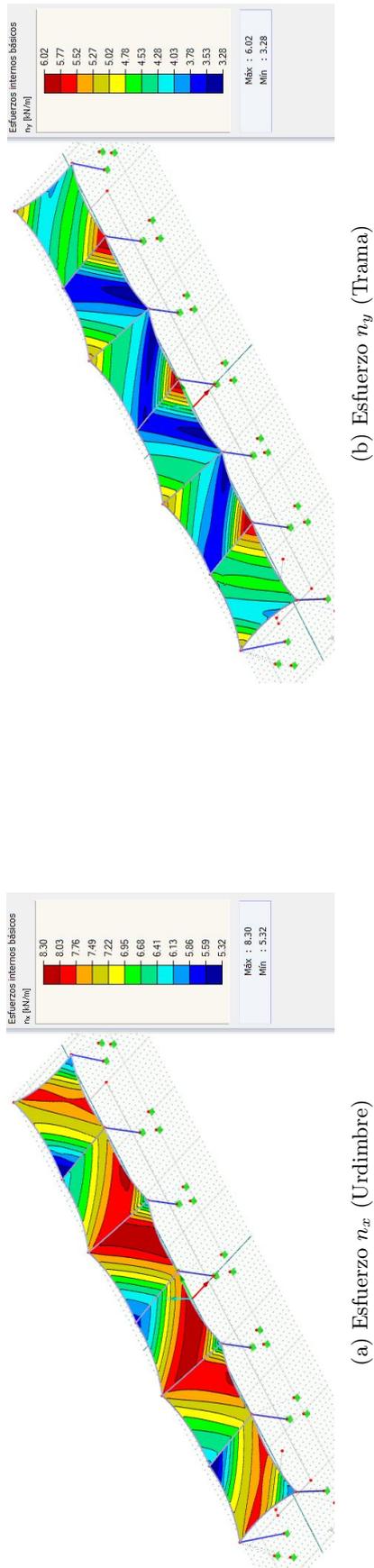


Figura I.4.63: Esfuerzos internos membrana en la combinación GE17. Elaboración: Propia.

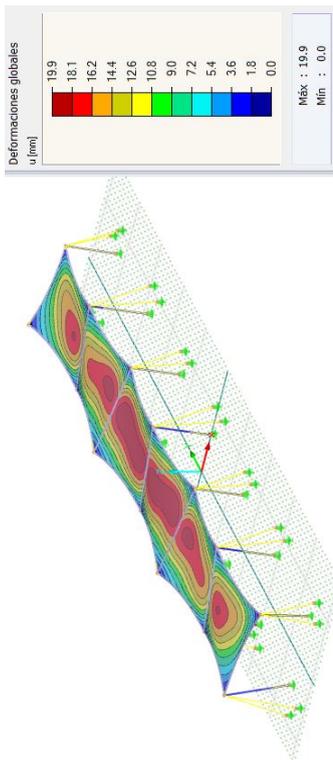


Figura I.4.64: Geometría deformada combinación GE1. Elaboración: Propia.

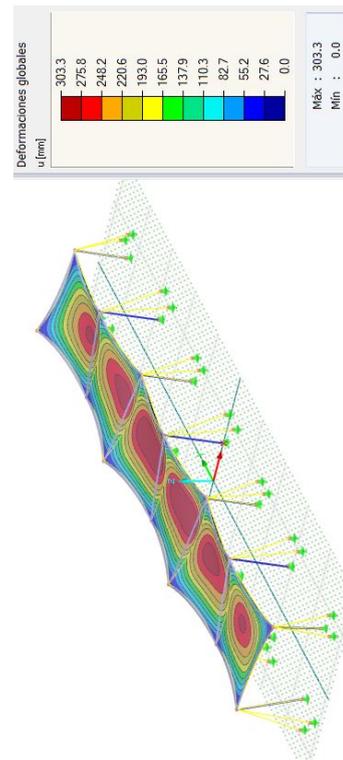


Figura I.4.65: Geometría deformada combinación GE2. Elaboración: Propia.

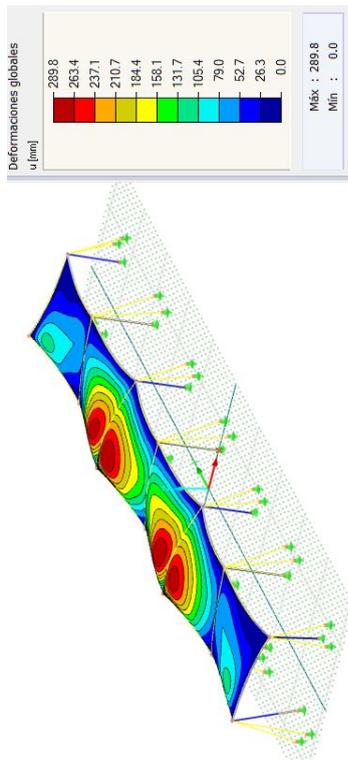


Figura I.4.66: Geometría deformada combinación GE3. Elaboración: Propia.

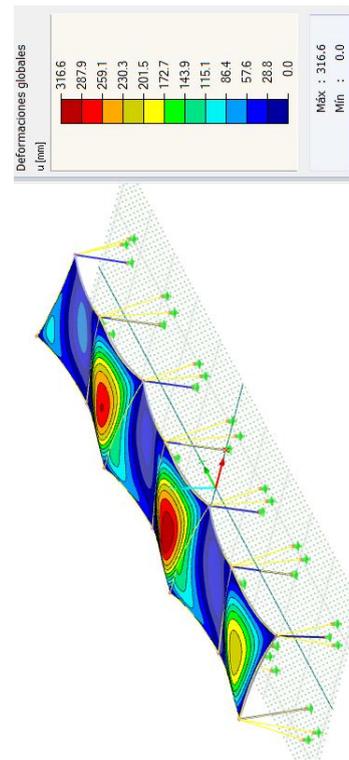


Figura I.4.67: Geometría deformada combinación GE4. Elaboración: Propia.

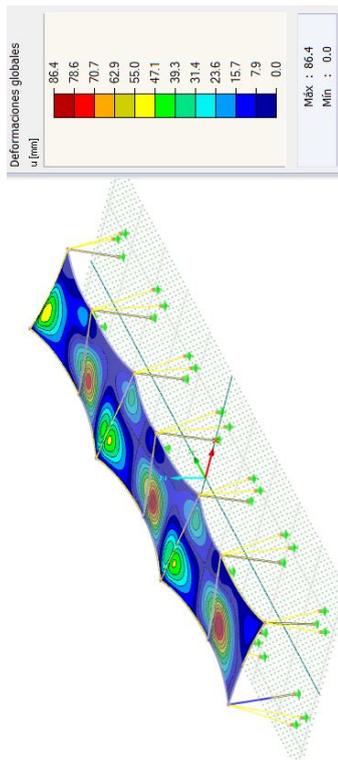


Figura I.4.68: Geometría deformada combinación GE5. Elaboración: Propia.

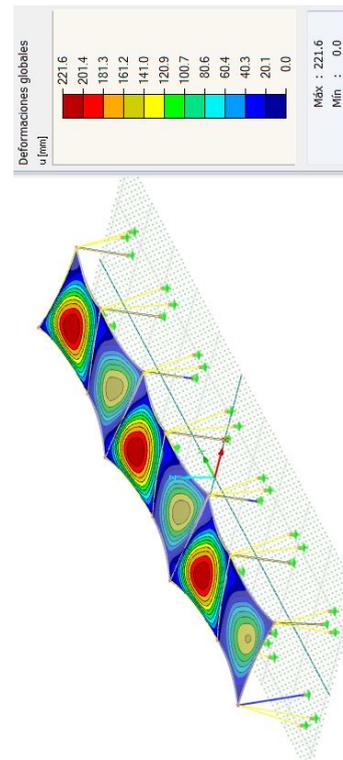


Figura I.4.69: Geometría deformada combinación GE6. Elaboración: Propia.

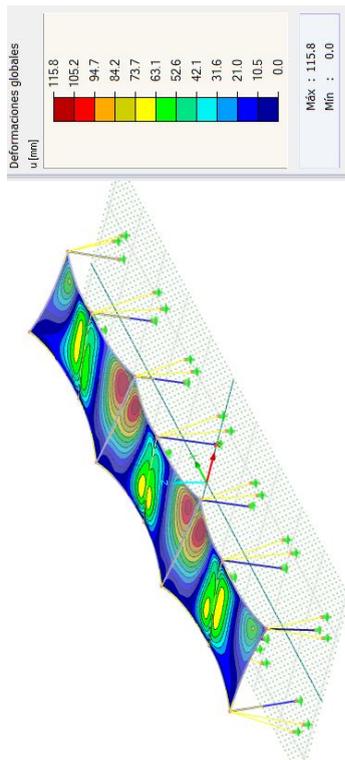


Figura I.4.70: Geometría deformada combinación GE7. Elaboración: Propia.

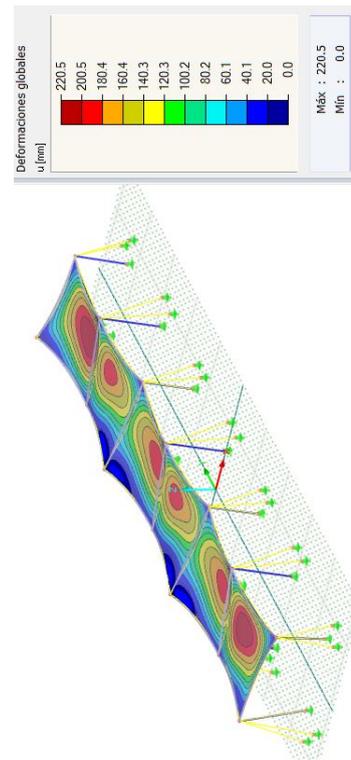


Figura I.4.71: Geometría deformada combinación GE8. Elaboración: Propia.

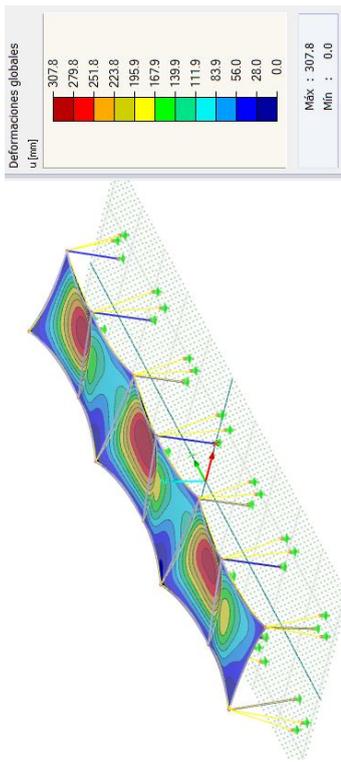


Figura I.4.72: Geometría deformada combinación GE9. Elaboración: Propia.

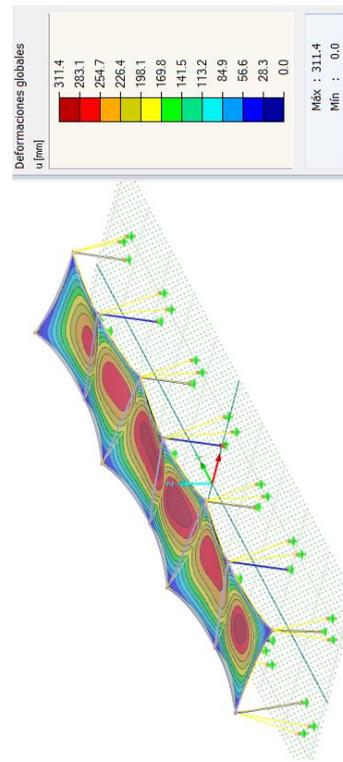


Figura I.4.73: Geometría deformada combinación GE10. Elaboración: Propia.

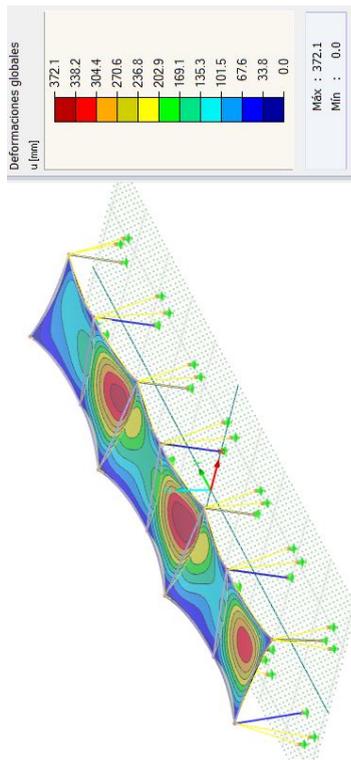


Figura I.4.74: Geometría deformada combinación GE11. Elaboración: Propia.

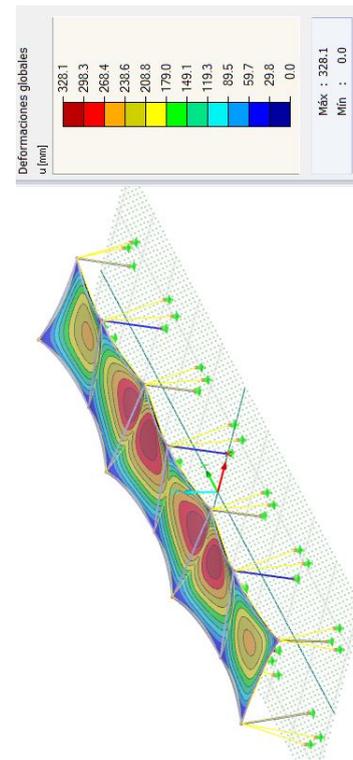


Figura I.4.75: Geometría deformada combinación GE12. Elaboración: Propia.

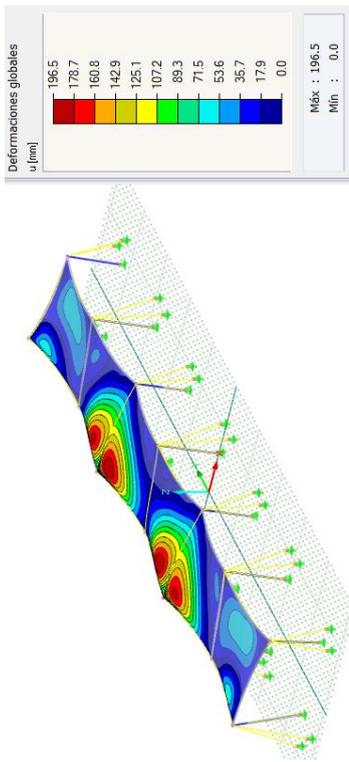


Figura I.4.76: Geometría deformada combinación GE13. Elaboración: Propia.

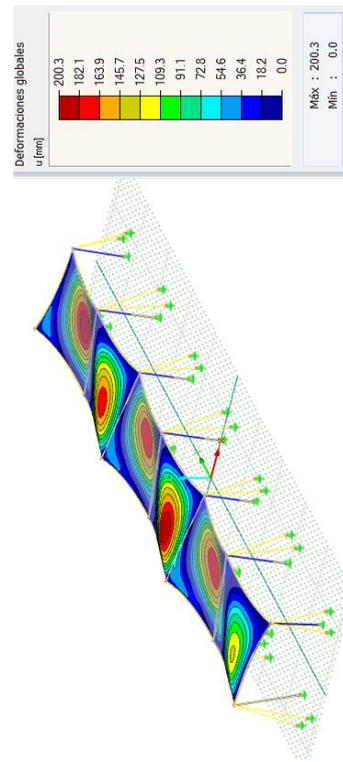


Figura I.4.77: Geometría deformada combinación GE14. Elaboración: Propia.

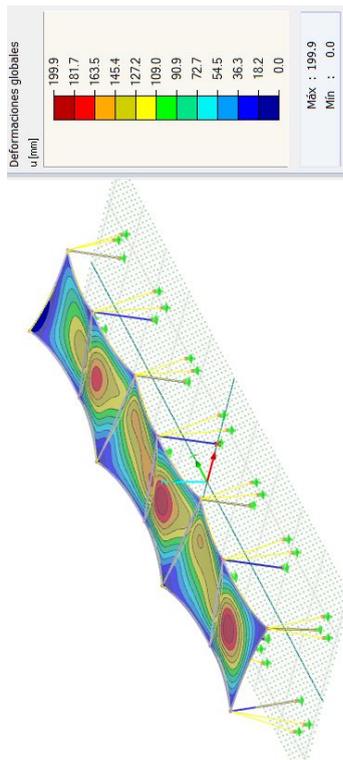


Figura I.4.78: Geometría deformada combinación GE15. Elaboración: Propia.

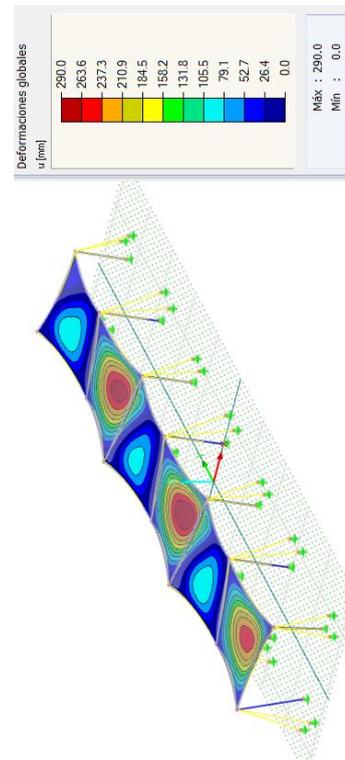


Figura I.4.79: Geometría deformada combinación GE16. Elaboración: Propia.

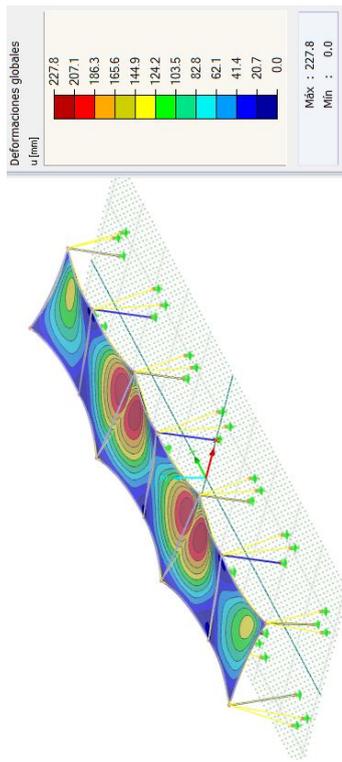


Figura I.4.80: Geometría deformada combinación GE17. Elaboración: Propia.

APÉNDICE 04. REACCIONES EN APOYOS

BA/S/1	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R_{X,Ed}	69,84	64,45	73,55	78,69	68,84	68,54	74,72	64,24	66,97
R_{Y,Ed}	68,98	63,19	74,43	77,14	67,54	66,19	72,03	64,11	65,64
R_{Z,Ed}	660,96	603,37	714,41	757,02	651,44	639,64	693,37	610,45	632,94
BA/S/1	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R_{X,Ed}	63,77	63,33	67,03	68,49	73,79	65,28	65,06	71,13	
R_{Y,Ed}	62,21	61,24	64,84	69,42	72,38	63,84	62,64	68,47	
R_{Z,Ed}	596,72	587,64	619,8	661,92	706,04	614,09	603,57	656,21	

Tabla I.4.92: Resultados apoyo BA/S/1 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

AL/S/1	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R_{X,Ed}	75,69	102,89	61,23	64,18	75,03	73,75	75,97	91,77	94,36
R_{Y,Ed}	0,02	0,06	0,18	1,37	0,68	0,94	0,09	0,06	1,11
R_{Z,Ed}	498,99	688,61	406	423,73	494,62	480,09	493,86	613,41	630,38
AL/S/1	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R_{X,Ed}	103,09	99,41	101,14	71,74	75,45	88,39	84,45	87,1	
R_{Y,Ed}	0,45	0,34	0,1	0,16	1,51	0,66	0,77	0,03	
R_{Z,Ed}	690,22	660,38	671,82	477,11	500,43	586,87	553,47	570,57	

Tabla I.4.93: Resultados apoyo AL/S/1 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

BA/S/2	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	44,26	30,46	61,74	55,3	43,83	50,09	47,49	33,92	32,69
R _{Y,Ed}	0,01	0,01	0,1	1,3	0,32	0,49	0,11	0,05	0,47
R _{Z,Ed}	291,44	197,9	417,61	371,07	288,44	326,65	309,39	222,9	214,28
BA/S/2	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	29,99	34,4	33,94	49,16	44,2	35,25	42,76	40,89	
R _{Y,Ed}	0,21	0,51	0,05	0,06	1,01	0,34	0,67	0,1	
R _{Z,Ed}	194,76	221,25	218,72	328,35	293,41	229,99	275,89	263,98	

Tabla I.4.94: Resultados apoyo BA/S/2 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

AL/S/2	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	57,57	84,09	38,77	43,99	56,12	55,78	60,13	69,3	73,57
R _{Y,Ed}	0,01	0,01	0,14	0,82	0,64	0,99	0,07	0,08	0,78
R _{Z,Ed}	385,56	578,42	263,84	297,42	375,77	364,22	391,75	474,33	504,34
AL/S/2	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	83,88	81,19	84,13	48,03	54,2	69,28	66,54	71,38	
R _{Y,Ed}	0,35	0,24	0,04	0,14	0,93	0,61	0,78	0,07	
R _{Z,Ed}	577,14	551,07	571,04	327,15	368,1	469,7	440,4	472,18	

Tabla I.4.95: Resultados apoyo AL/S/2 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

BA/S/3	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	44,26	30,46	61,51	55,3	43,89	48,82	47,3	33,85	33,17
R _{Y,Ed}	0,01	0,01	0,06	1,14	0,42	0,12	0,14	0,04	0,43
R _{Z,Ed}	291,44	197,9	415,9	371,29	288,58	317,86	308,2	222,4	217,64
BA/S/3	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	29,85	33,27	33,85	48,93	44,52	35,18	41,15	40,71	
R _{Y,Ed}	0,28	0,32	0,07	0,04	0,93	0,44	0,35	0,13	
R _{Z,Ed}	193,75	213,73	218,19	326,72	295,85	229,3	264,99	262,94	

Tabla I.4.96: Resultados apoyo BA/S/3 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

AL/S/3	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	75,69	102,89	61,26	63,23	73,47	72,62	75,97	91,8	93,42
R _{Y,Ed}	0,02	0,06	0,31	1,21	0,95	1,16	0,09	0,13	0,98
R _{Z,Ed}	498,99	688,61	405,95	419,82	483,33	472,89	493,75	613,42	625,11
AL/S/3	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	102,02	98,94	101,23	71,76	74,17	86,64	83,48	87,17	
R _{Y,Ed}	0,47	0,32	0,1	0,29	1,34	0,93	0,94	0,02	
R _{Z,Ed}	682,25	657,62	672,41	477,03	494,06	574,13	547,46	570,89	

Tabla I.4.97: Resultados apoyo AL/S/3 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

BA/S/4	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	69,84	64,45	73,47	69,19	72,2	82,75	74,8	64,2	62,42
R _{Y,Ed}	68,98	63,19	74,36	72,06	72,43	79,5	72,03	64,07	63,25
R _{Z,Ed}	660,96	603,37	713,88	675,51	682,67	776,18	693,95	610,15	594,51
BA/S/4	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	65,45	70,08	67,07	68,4	64,74	68,39	78,34	71,21	
R _{Y,Ed}	64,8	68,03	64,84	69,35	67,4	68,5	75,41	68,47	
R _{Z,Ed}	611,69	652,65	620,1	661,34	628,4	642,56	731,05	656,78	

Tabla I.4.98: Resultados apoyo BA/S/4 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

AL/N/1	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	80,36	92,26	82,5	76,08	81,71	84,49	76,78	90,5	86,64
R _{Y,Ed}	79,22	91,31	78,28	72,63	79,07	82,46	77,97	88,31	84,77
R _{Z,Ed}	760,12	883,86	754,13	704,41	770,62	810,83	741,62	851,77	820,52
AL/N/1	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	93,01	93,82	89,83	85,96	79,34	87,1	89,57	81,91	
R _{Y,Ed}	91,04	92,45	90,54	82,23	76,34	84,55	87,71	83,53	
R _{Z,Ed}	889,06	905,89	870,96	792,1	739,77	826,44	864,26	796,24	

Tabla I.4.99: Resultados apoyo AL/N/1 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

BA/N/1	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	58,21	43,13	70,89	69,34	57,88	60,72	59	48,71	48,75
R _{Y,Ed}	0,06	0,01	0,28	0,63	0,53	1,25	0,05	0,01	0,57
R _{Z,Ed}	382,94	280,43	466,79	454,53	381,06	404,07	392,58	315	314,77
BA/N/1	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	43,56	43,11	41,79	61,15	60,39	49,64	51,16	48,96	
R _{Y,Ed}	0,33	0,55	0,09	0,13	0,78	0,55	1,06	0,12	
R _{Z,Ed}	283,51	282,35	273,91	398,42	392,05	324,66	338,22	323,81	

Tabla I.4.100: Resultados apoyo BA/N/1 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

AL/N/2	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	63,87	94,73	50,62	53,44	62,6	58,05	61,47	78,01	82,89
R _{Y,Ed}	0,01	0,01	0,07	1,56	0,81	1,05	0,05	0,08	0,69
R _{Z,Ed}	422,73	639,56	327,03	346,15	413,95	386,93	411,39	517,4	551,73
AL/N/2	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	93,94	90,9	94,58	57,95	62,99	77	72,26	77,31	
R _{Y,Ed}	0,53	1,01	0,02	0,11	1,46	0,83	1,31	0,03	
R _{Z,Ed}	633,87	614,67	641,92	376,52	411,01	513,61	484,71	521,19	

Tabla I.4.101: Resultados apoyo AL/N/2 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

BA/N/2	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	40,25	24,95	57,88	52,28	40,12	43,47	39,78	33,23	30,57
R _{Y,Ed}	0,01	0,01	0,01	0,72	0,59	0,81	0,07	0,01	0,71
R _{Z,Ed}	268,3	163,31	389,89	350,61	267,51	294,51	270,91	215,36	198,67
BA/N/2	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	25,29	25,6	23,28	48,2	42,85	31,62	33,99	29,95	
R _{Y,Ed}	0,36	0,3	0,04	0,01	0,97	0,59	0,58	0,07	
R _{Z,Ed}	165,64	169,48	155,41	318,31	282,36	208,52	227,97	202,72	

Tabla I.4.102: Resultados apoyo BA/N/2 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

AL/N/3	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	63,87	94,73	50,88	53,26	62,66	58,43	61,68	78,27	83,49
R _{Y,Ed}	0,01	0,01	0,13	1,17	0,9	1	0,05	0,12	0,41
R _{Z,Ed}	422,73	639,56	328,47	345,95	413,74	390,36	412,83	519,02	556,54
AL/N/3	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	93,86	90,91	94,72	58,28	63,37	76,95	72,39	77,54	
R _{Y,Ed}	0,54	0,95	0,02	0,17	1,02	0,91	1,24	0,02	
R _{Z,Ed}	632,91	615,33	642,93	378,45	414,62	512,62	486,47	522,83	

Tabla I.4.103: Resultados apoyo AL/N/3 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

BA/N/3	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	58,21	43,13	70,84	68,57	59,32	62,77	58,87	48,67	48,08
R _{Y,Ed}	0,06	0,01	0,26	0,27	1	1,67	0,01	0,02	0,44
R _{Z,Ed}	382,94	280,43	466,54	450,8	389,41	418,7	391,78	314,76	310,93
BA/N/3	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	44	44,28	41,78	61,09	59,37	50,75	53,27	48,87	
R _{Y,Ed}	0,56	0,72	0,06	0,1	0,5	0,95	1,39	0,08	
R _{Z,Ed}	285,58	290,64	273,94	398,06	386,45	330,72	353,2	323,3	

Tabla I.4.104: Resultados apoyo BA/N/3 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

AL/N/4	ELU1	ELU2	ELU3	ELU4	ELU5	ELU6	ELU7	ELU8	ELU9
R _{X,Ed}	80,36	92,26	82,51	86,55	80,61	71,98	76,78	90,53	93,39
R _{Y,Ed}	79,22	91,31	78,33	83,47	81,05	74,65	77,94	88,35	91,44
R _{Z,Ed}	760,12	883,86	754,35	803,91	758,46	696,38	741,29	852,1	884,53
AL/N/4	ELU10	ELU11	ELU12	ELU13	ELU14	ELU15	ELU16	ELU17	
R _{X,Ed}	92,09	85,42	89,84	85,99	90,45	85,76	75,97	81,91	
R _{Y,Ed}	92,02	87,26	90,54	82,3	87,54	86,35	79,13	83,51	
R _{Z,Ed}	879,13	828,55	870,89	792,48	845,04	811,97	739,25	796	

Tabla I.4.105: Resultados apoyo AL/N/4 (fuerzas en kN). Elaboración: Propia.

ANEJO 05. PATRONAJE Y DETALLES CONSTRUCTIVOS

05.1. Objeto del anejo	2
05.2. Patronaje	2
05.3. Despiece	4
05.3.1. Patrones Módulo 1	6
05.3.2. Patrones Módulo 2	7
05.3.3. Patrones Módulo 3	8
05.3.4. Patrones Módulo 4	9
05.3.5. Patrones Módulo 5	10
05.3.6. Patrones Módulo 6	11
05.4. Detalles constructivos	12
05.4.1. Puños en cabezas de mástiles	12
05.4.2. Relinga perimetral	14
05.4.3. Unión entre paños	14
05.4.4. Apoyos pilares internos	15
05.4.5. Apoyos pilares esquina	15
05.4.6. Anclajes de cables	16
05.4.7. Detalles constructivos en cables	16
05.4.8. Detalles constructivos en mástiles	18

05.1. Objeto del anejo

El objeto del presente anejo es describir los aspectos relacionados con la materialización de la estructura modelada. Por un lado, se detalla el proceso de patronaje; y por otro lado, se recogen los detalles constructivos que resuelven las uniones entre los elementos lineales y la membrana, y los elementos lineales con el terreno.

05.2. Patronaje

El patronaje tiene como finalidad definir las formas bidimensionales planas del tejido que una vez ensambladas y pretensadas, producen la geometría tridimensional de la membrana calculada y proyectada.

Este proceso se lleva a cabo, de igual manera que el análisis estructural, haciendo uso del software RFEM5, concretamente del módulo CUTTING-PATTERN que el software incorpora expresamente para realizar este tipo de cálculos.

En primer lugar, se definen las líneas de contorno de los patrones. Los patrones están definidos por 4 líneas de contorno, excepto los patrones de las esquinas de cada módulo que se limitan por 3. Se considera como módulo la parte delimitada por los 4 cables que unen un par de mástiles contiguos de una alineación y el par de mástiles de la alineación opuesta.

En los patrones de 4 lados, los lados que limitan longitudinalmente los patrones, se definen por las relingas de bordes de cada módulo; los lados alienados con la dirección de la urdimbre, se definen por líneas geodésicas. Estas líneas geodésicas se crean de la forma siguiente:

- En primer lugar se toma para cada módulo la diagonal que une las cabezas de los mástiles (ya utilizadas previamente para definir las direcciones de urdimbre de las membranas).
- Se proyecta esta línea sobre el plano horizontal de cota 0. En la Figura I.5.1 se identifican en amarillo las proyecciones de las diagonales sobre el plano de cota 0; y las propias diagonales en magenta.
- Se dividen las relingas internas (aquellas que unen los mástiles altos y bajos enfrentados de un mismo módulo) en 5 segmentos de igual distancia, se crean por tanto 4 nodos intermedios. Se observan estos nodos en rojo sobre las relingas en la Figura I.5.1.
- Se generan 9 planos por módulo: cada uno de los planos contiene la proyección horizontal de la diagonal del módulo y uno de los 4 puntos internos de cada una de las 2 relingas internas, el noveno plano contiene la diagonal y los nodos de cabezas de los mástiles altos.
- Se generan las 9 líneas geodésicas en el módulo como resultado de la intersección de la membrana y cada uno de los 9 planos generados. Se muestran en la Figura I.5.2 estas líneas geodésicas en cian.

Se escoge el uso de las líneas geodésicas y esta orientación, con la finalidad de optimizar el uso del material. Ya que al alinear el eje del patrón con la dirección de la urdimbre y al definir los contornos como líneas geodésicas se ha observado que se logra se logra representar la forma 3D con mayor precisión y se utiliza una menor cantidad de tejido. Estas líneas geodésicas representan la distancia más corta entre dos puntos de la membrana, que supone la trayectoria que puede seguir una banda plana de material sin sufrir deformación angular del tejido. [Koch and Habermann, 2004]

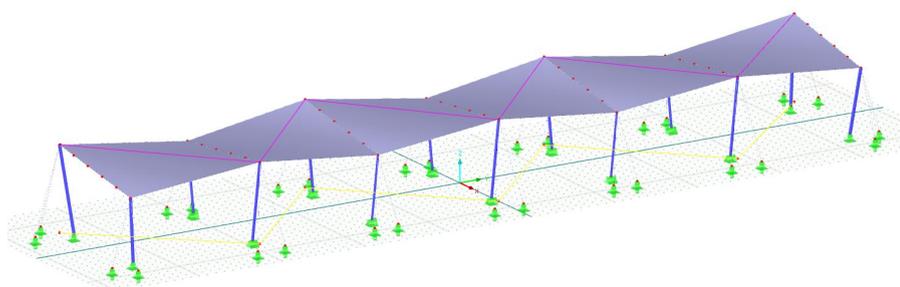


Figura I.5.1: Posiciones de rectas y puntos generadores de planos de corte de la membrana. Elaboración: Propia.

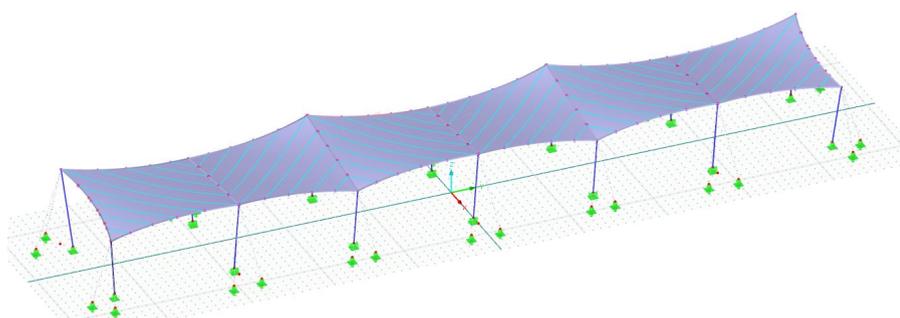


Figura I.5.2: Identificación de líneas geodésicas delimitadoras de patrones. Elaboración: Propia.

La elección del número de patrones por módulo se realiza en función del ancho de los rollos en los cuales el fabricante suministra el material, tratando de aprovechar de forma óptima las dimensiones de los rollos. El ancho de estos rollos es de 267 cm, con lo que 10 patrones por módulo es el mínimo número de patrones que permite que sean lo más anchos posible.

En el proceso de patronaje deben tenerse en cuenta los incrementos de dimensiones que deben asignarse a los patrones con el fin de que una vez ensamblados, la superficie resultante de la unión de los patrones sea lo más próxima posible a la superficie teórica modelada. Estas desviaciones en las dimensiones se deben a:

- Compensaciones: reducciones según un porcentaje en cada una de las dos direcciones que permiten introducir las tensiones necesarias para obtención del pretensado. Se recomienda en diversos textos disponer valores entre el 2-3 %, se obtiene este valor tras hacer ensayos biaxiales del material y observar la deformación que debe producirse en el material hasta llegar a un comportamiento lineal. Atendiendo a los resultados de [Ambroziak, 2020], de igual modo que para determinar las propiedades a tiempo infinito del material como se menciona en el ANEJO 02. BASES DE CÁLCULO, se adopta una compensación del 3 % para la dirección de la urdimbre y del 2 % en la dirección de la trama.
- Descompensaciones: en las proximidades a los bordes se reducen en la práctica estas compensaciones para adaptarse a la mayor rigidez de los elementos lineales, y reproducir que en el entorno de las uniones la deformación que se permite a la membrana es menor que en el resto de la superficie. No se llega a tener en consideración en este proceso debido a que el software utilizado no permite este tipo de condición.
- Tolerancias en bordes para soldadura y contorno. Se debe asignar un sobrecancho: en las líneas de soldadura, para asegurar un solape suficiente que permita realizar la unión y tenga la resistencia suficiente; en las líneas de contorno, para asegurar que hay suficiente material para formar los bolsillos en los que se introducen las relingas del perímetro. Los valores

considerados son 80 mm en las soldaduras, recomendado en [Forster and Mollaert, 2004] para PES/PVC de Tipo IV, y 140 mm en las líneas de contorno.

05.3. Despiece

En la presente sección se muestran los patrones obtenidos. Se muestra en la Figura I.5.3 una vista de la estructura en la que se observan estos patrones en su configuración final.

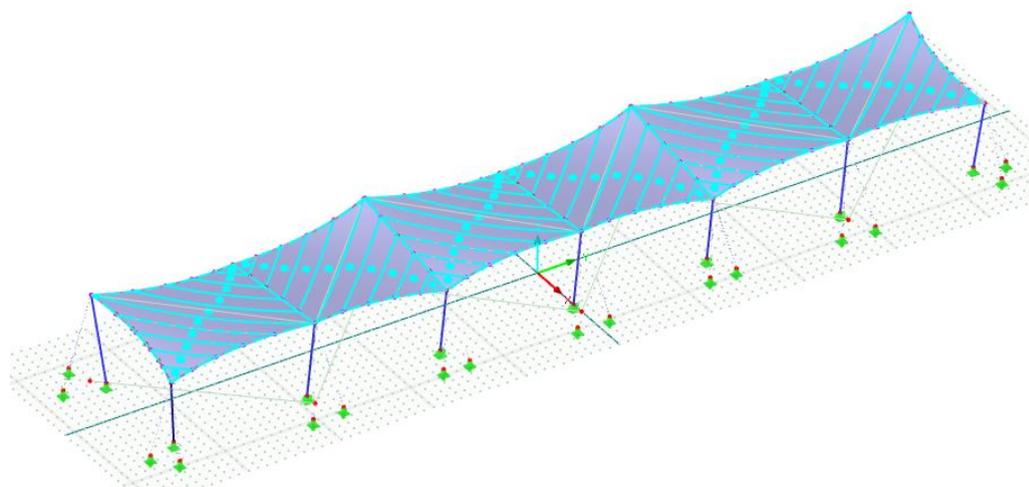


Figura I.5.3: Vista de la estructura con patrones de corte. Elaboración: Propia.

Tras el cálculo de la forma de los patrones, el software produce como resultado las coordenadas de los puntos que definen los patrones referidas a la geometría en 2 dimensiones. No se incluye este resultado ya que se trata de más de 17.000 puntos que no resulta práctico mostrar en forma de tablas en el presente documento. Por una parte debido a su elevada extensión, y por otra parte al corresponderse con datos de utilidad únicamente en la fase de fabricación de la estructura, que no se va a producir.

Únicamente se procesan estos datos y se crean las formas de cada uno de los patrones, las cuales se muestran en los apartados 05.3.1 a 05.3.6 como figuras. En estas figuras: las líneas discontinuas negras delimitan el ancho de los rollos en los cuales el fabricante suministra el material; el eje horizontal marca la longitud de cada uno de los patrones; los polígonos azules representan la forma del patrón que quedaría visible en la superficie de la membrana una vez ensamblados entre sí; y en verde se representa la dimensión real del tejido que debe cortarse, incluyendo las tolerancias que permiten la ejecución de las soldaduras y la formación de los bolsillos de relingas.

El orden de los patrones en los gráficos de abajo a arriba, corresponde con el mismo orden en la estructura final de norte a sur.

Junto a los patrones de cada módulo, se añaden tablas en las cuales se recogen las propiedades de cada patrón del módulo: A_{2D} , área del patrón; $A_{2D,a}$, área del patrón incluyendo tolerancias; A_{3D} , área teórica del patrón en su posición dentro de la estructura tras la colocación y aplicación de la tensión; L , longitud del patrón en la dirección de la urdimbre; L_a , longitud del patrón en la dirección de la urdimbre considerando tolerancias; W , anchura del patrón; y W_a , anchura del patrón considerando tolerancias. Estas longitudes y anchuras corresponden con las dimensiones del cuadrilátero que inscribe al patrón.

En la Tabla I.5.1 se muestra el área de cada uno de los módulos en la estructura ejecutada como (A_{2D}); el área de tejido necesaria en cada módulo, suma del área de los patrones que lo componen

teniendo en cuenta las tolerancias como ($A_{2D,a}$); y el área total de tejido necesaria para ejecutar la construcción de la estructura.

La reproducción de los patrones a escala se incluye en el Documento II PLANOS.

Módulo	A_{2D} [m²]	A_{2D,a} [m²]
1	172,957	196,039
2	176,615	199,942
3	176,344	199,633
4	176,344	199,635
5	176,616	199,941
6	172,957	196,04
Totales:	1051,833	1191,23

Tabla I.5.1: Resumen áreas de módulo y tejido. Elaboración: Propia.

05.3.1. Patrones Módulo 1

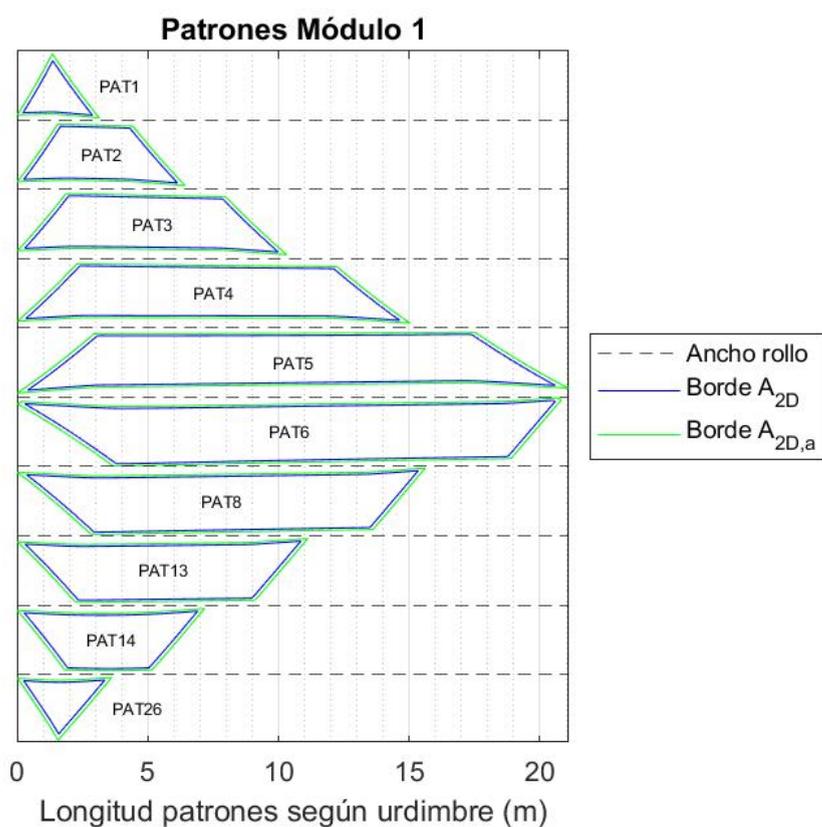


Figura I.5.4: Patrones módulo 1. Elaboración: Propia.

Patrón	Áreas del patrón [m ²]			Longitud [m]		Anchura [m]	
	A_{2D}	$A_{2D,a}$	A_{3D}	L	L_a	W	W_a
1	2,53	3,507	2,675	2,651	3,132	2,096	2,466
2	8,367	9,852	8,837	5,886	6,416	2,179	2,363
3	14,855	16,955	15,688	9,703	10,31	2,164	2,347
4	22,241	25,099	23,487	14,308	15,021	2,097	2,282
5	31,361	35,222	33,113	20,192	21,086	2,152	2,343
6	36,548	40,421	38,586	20,296	20,816	2,439	2,61
8	26,3	29,291	27,772	14,982	15,608	2,364	2,542
13	17,726	19,988	18,719	10,554	11,121	2,273	2,448
14	9,99	11,613	10,549	6,636	7,164	2,213	2,392
26	3,039	4,091	3,206	3,102	3,607	2,077	2,416

Tabla I.5.2: Dimensiones de los patrones del módulo 1. Elaboración: Propia.

05.3.2. Patrones Módulo 2

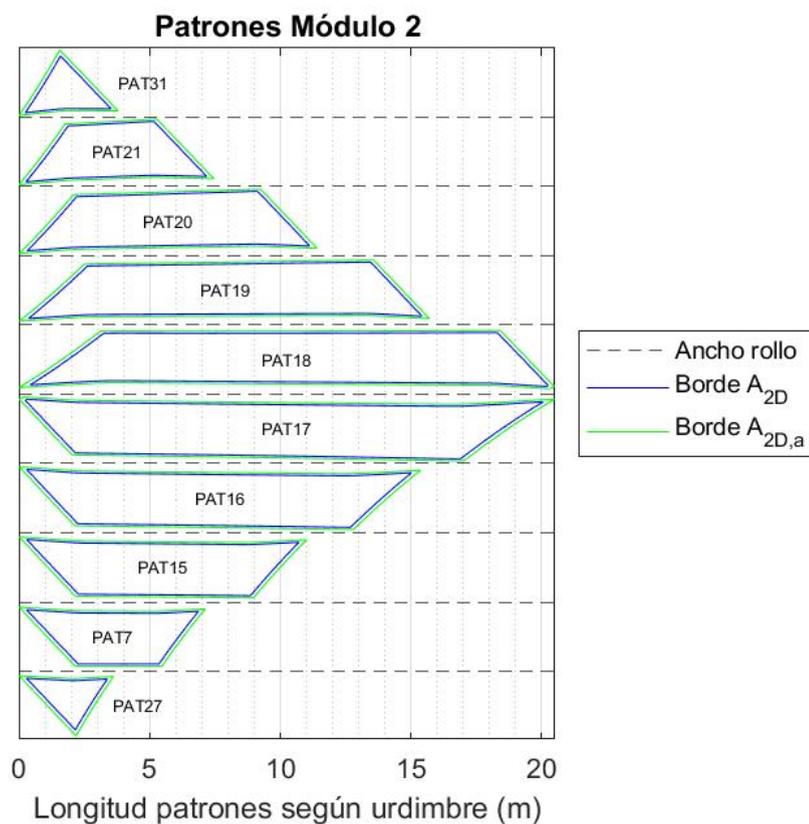


Figura I.5.5: Patrones módulo 2. Elaboración: Propia.

Patrón	Áreas del patrón [m ²]			Longitud [m]		Anchura [m]	
	A _{2D}	A _{2D,a}	A _{3D}	L	L _a	W	W _a
31	3,289	4,383	3,476	3,278	3,787	2,188	2,529
21	10,38	12,047	10,962	6,912	7,451	2,331	2,519
20	17,576	19,866	18,561	10,819	11,402	2,295	2,476
19	24,851	27,822	26,242	15,058	15,7	2,178	2,349
18	32,758	36,509	34,586	19,82	20,483	2,077	2,247
17	34,056	37,835	35,957	19,817	20,491	2,297	2,467
16	24,677	27,604	26,058	14,734	15,364	2,234	2,412
15	16,698	18,919	17,633	10,425	11,005	2,166	2,34
7	9,443	11,038	9,973	6,581	7,126	2,092	2,271
27	2,887	3,919	3,051	3,092	3,606	1,987	2,313

Tabla I.5.3: Dimensiones de los patrones del módulo 2. Elaboración: Propia.

05.3.3. Patrones Módulo 3

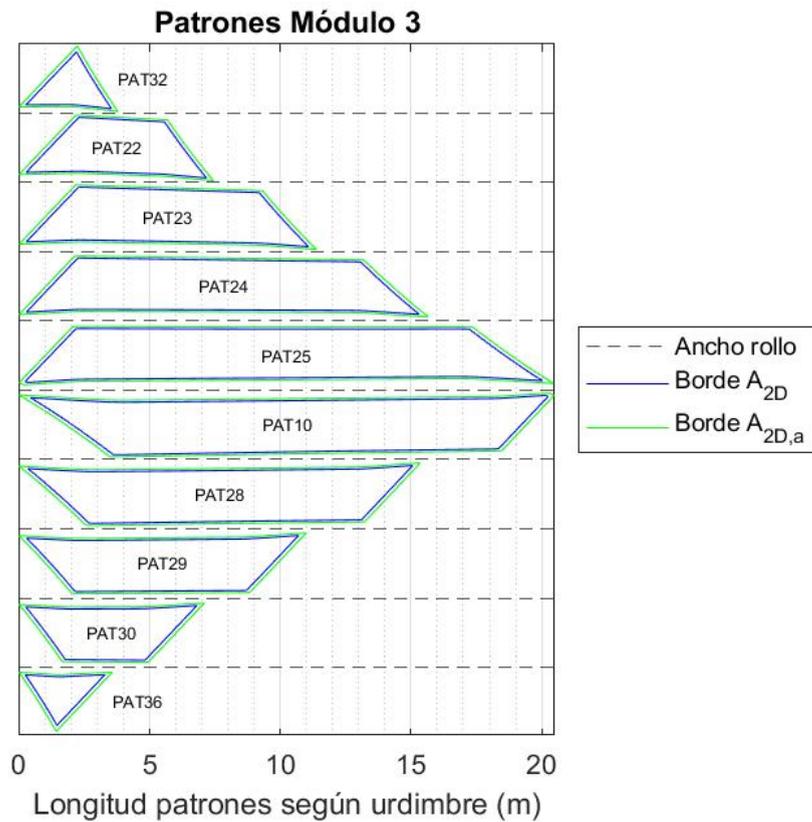


Figura I.5.6: Patrones módulo 3. Elaboración: Propia.

Patrón	Áreas del patrón [m ²]			Longitud [m]		Anchura [m]	
	A_{2D}	$A_{2D,a}$	A_{3D}	L	L_a	W	W_a
32	3,282	4,375	3,469	3,271	3,78	2,187	2,528
22	10,366	12,031	10,947	6,901	7,441	2,336	2,524
23	17,546	19,832	18,529	10,8	11,377	2,299	2,486
24	24,803	27,769	26,192	15,035	15,666	2,172	2,354
25	32,732	36,478	34,559	19,792	20,456	2,079	2,248
10	34,017	37,793	35,915	19,804	20,478	2,288	2,458
28	24,677	27,604	26,058	14,725	15,354	2,229	2,407
29	16,714	18,934	17,65	10,411	10,988	2,164	2,338
30	9,398	10,989	9,926	6,55	7,091	2,104	2,282
36	2,809	3,828	2,969	3,048	3,566	1,951	2,275

Tabla I.5.4: Dimensiones de los patrones del módulo 3. Elaboración: Propia.

05.3.4. Patrones Módulo 4

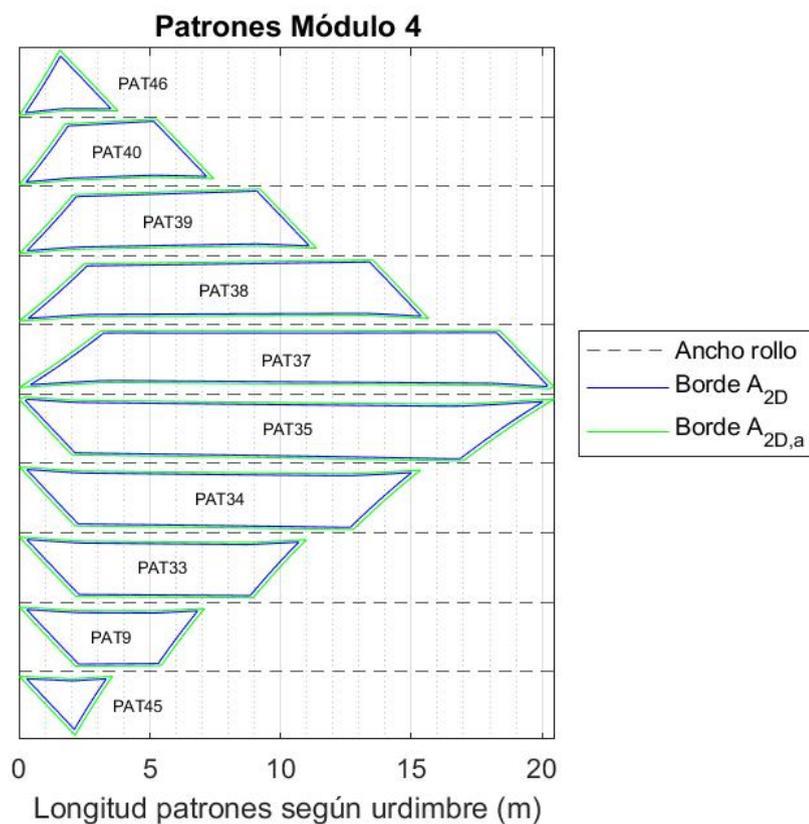


Figura I.5.7: Patrones módulo 4. Elaboración: Propia.

Patrón	Áreas del patrón [m ²]			Longitud [m]		Anchura [m]	
	A _{2D}	A _{2D,a}	A _{3D}	L	L _a	W	W _a
46	3,282	4,375	3,469	3,271	3,78	2,187	2,528
40	10,366	12,031	10,947	6,901	7,441	2,336	2,524
39	17,545	19,831	18,527	10,8	11,377	2,299	2,486
38	24,804	27,771	26,193	15,035	15,666	2,172	2,355
37	32,732	36,478	34,559	19,792	20,456	2,079	2,248
35	34,015	37,792	35,913	19,804	20,478	2,289	2,458
34	24,687	27,613	26,069	14,725	15,354	2,23	2,408
33	16,702	18,922	17,637	10,409	10,987	2,162	2,336
9	9,403	10,995	9,931	6,551	7,093	2,105	2,283
45	2,808	3,827	2,968	3,047	3,566	1,951	2,275

Tabla I.5.5: Dimensiones de los patrones del módulo 4. Elaboración: Propia.

05.3.5. Patrones Módulo 5

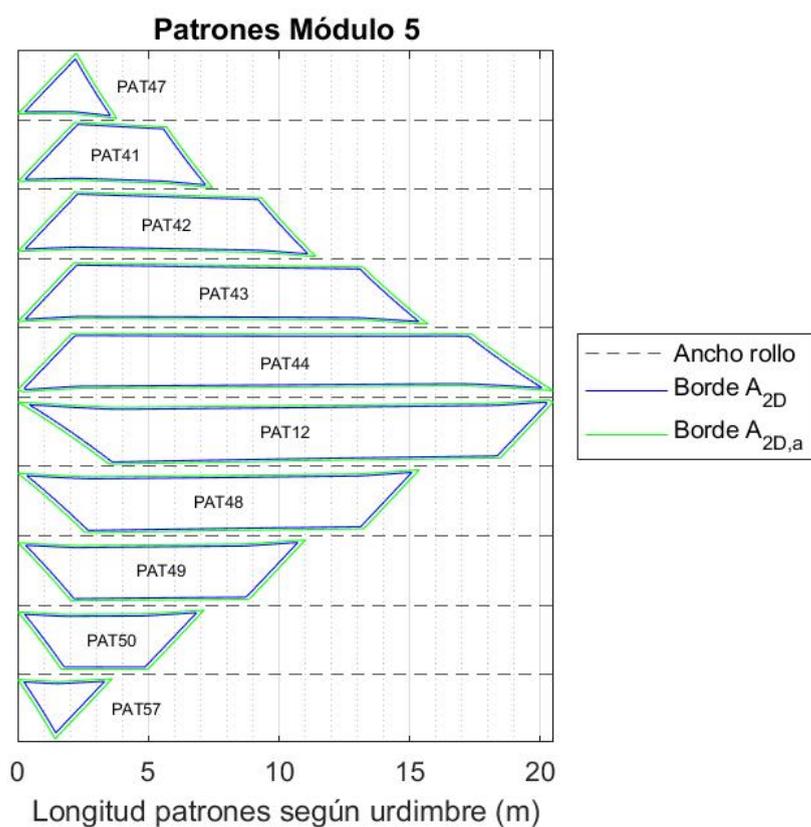


Figura I.5.8: Patrones módulo 5. Elaboración: Propia.

Patrón	Áreas del patrón [m ²]			Longitud [m]		Anchura [m]	
	A_{2D}	$A_{2D,a}$	A_{3D}	L	L_a	W	W_a
47	3,289	4,383	3,476	3,278	3,787	2,188	2,529
41	10,368	12,034	10,95	6,909	7,448	2,329	2,517
42	17,588	19,878	18,574	10,819	11,402	2,297	2,478
43	24,851	27,822	26,242	15,058	15,7	2,177	2,349
44	32,758	36,509	34,586	19,82	20,483	2,077	2,247
12	34,059	37,838	35,96	19,817	20,491	2,298	2,467
48	24,674	27,601	26,055	14,733	15,363	2,234	2,413
49	16,697	18,917	17,632	10,425	11,005	2,166	2,341
50	9,447	11,042	9,977	6,582	7,126	2,094	2,272
57	2,885	3,917	3,049	3,091	3,605	1,986	2,312

Tabla I.5.6: Dimensiones de los patrones del módulo 5. Elaboración: Propia.

05.3.6. Patrones Módulo 6

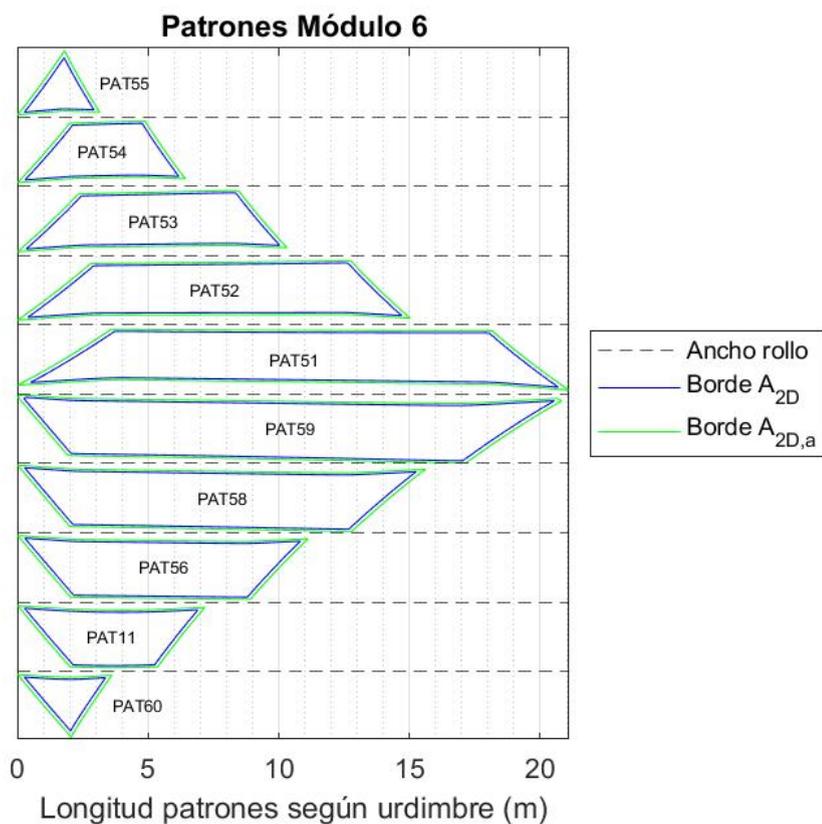


Figura I.5.9: Patrones módulo 6. Elaboración: Propia.

Patrón	Áreas del patrón [m ²]			Longitud [m]		Anchura [m]	
	A _{2D}	A _{2D,a}	A _{3D}	L	L _a	W	W _a
55	2,53	3,507	2,675	2,651	3,132	2,096	2,466
54	8,367	9,852	8,837	5,886	6,416	2,179	2,363
53	14,855	16,955	15,688	9,703	10,31	2,164	2,347
52	22,241	25,099	23,487	14,308	15,021	2,097	2,282
51	31,362	35,223	33,114	20,192	21,087	2,152	2,344
59	36,543	40,416	38,581	20,296	20,816	2,441	2,611
58	26,297	29,288	27,769	14,982	15,608	2,364	2,542
56	17,734	19,997	18,728	10,555	11,122	2,274	2,449
11	9,989	11,612	10,547	6,635	7,164	2,212	2,392
60	3,039	4,091	3,206	3,102	3,607	2,077	2,416

Tabla I.5.7: Dimensiones de los patrones del módulo 6. Elaboración: Propia.

05.4. Detalles constructivos

Si el proceso de patronaje consiste en determinar las dimensiones de las piezas de tejido que deben fabricarse para que una vez ensambladas se obtenga la forma de la superficie proyectada. El mismo proceso debe realizarse para los nodos, que en el modelo representan puntos sin dimensión en los que confluyen varios elementos representados como líneas, también sin dimensiones, que en la realidad corresponden con elementos de dimensiones finitas.

En la presente sección se describen los tipos de unión que se disponen entre: los mástiles y la membrana; paños contiguos de membrana; los mástiles y los cables; los mástiles y las zapatas; y los cables y las placas de los anclajes.

05.4.1. Puños en cabezas de mástiles

Los puños suponen los puntos de unión entre las cabezas de los mástiles y la membrana. La membrana transmite los esfuerzos a las relingas, y en estos puntos estas fuerzas son transmitidas a los mástiles.

Se resuelven con pletinas metálicas unidas a las cabezas de los mástiles en las que confluyen 3 relingas (2 en el caso de las esquinas) que limitan 2 paños de membrana (1 en los mástiles de esquina), como los ejemplos mostrados en la Figura I.5.10.

La membrana se corta formando un sector circular que aloja al mástil y los elementos de unión.

Los cables se unen a las pletinas por medio de los terminales en horquilla colocadas en sus extremos, como el ejemplo mostrado en la Figura I.5.11. Se escogen los elementos TBF del catálogo proporcionado por el fabricante de los cables [Redaelli Tecna S.P.A.] en función del diámetro de cada uno de los cables.

La geometría de esta pletina se ajusta en función del tipo de puño, según se trate de mástil alto o bajo, interno o de esquina.

Se disponen además cintas de ajuste para prevenir el deslizamiento de la membrana a lo largo de los cables, como el ejemplo mostrado en la Figura I.5.12.

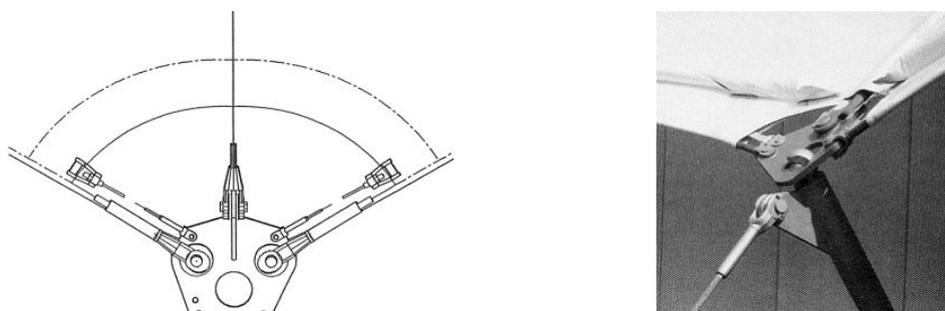


Figura I.5.10: Ejemplos de pletina para unión de relingas y membrana a mástiles. Fuente: [Llorens, 2015].

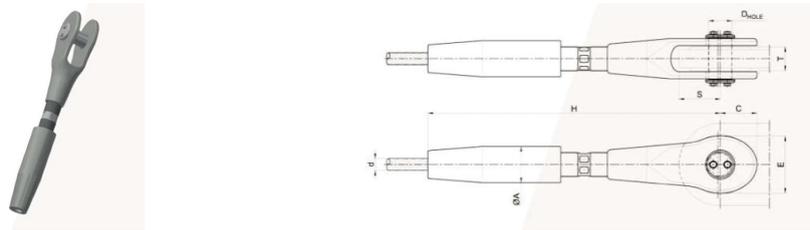


Figura I.5.11: Ejemplo de terminal en horquilla para cable. Fuente: [Redaelli Tecna S.P.A.].



Figura I.5.12: Ejemplo de cinta ajuste de membrana en puño. Fuente: [Llorens, 2015].

En las cabezas de los mástiles, además de las relingas y los módulos de membrana, confluyen también los cables de vientos. Esta confluencia supone el punto en el cual se introducen las fuerzas de estabilización a la cubierta. La unión de estos cables a los mástiles se realiza soldando unas orejetas a los mástiles en las cuales se alojan los extremos de los cables. Ejemplos de uniones de cables a mástiles resueltos de esta forma son los mostrados en la Figura I.5.13.



Figura I.5.13: Ejemplos de orejetas para unión de vientos con horquillas a mástiles. Fuente: [Llorens, 2015].

05.4.2. Relinga perimetral

El perímetro de la membrana es la zona en la que se transmiten los esfuerzos entre esta y el elemento o sistema de borde. En este caso se considera un perímetro flexible curvado que permite el pretensado de la tela por medio de aplicación de tensión al elemento de borde.

En este caso se resuelve realizando un dobladillo en los bordes de la membrana que corresponden con el perímetro de la cubierta mediante una unión cosida, por el cual se pasa la relinga.

En la Figura I.5.14 se muestra un esquema del tipo de borde de la membrana. El ángulo de los lados del dobladillo debe ser menor a 15° para evitar que se despeguen.

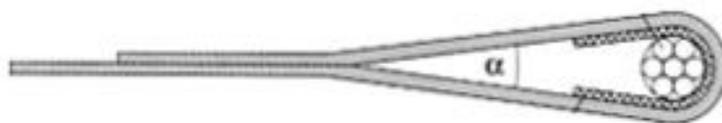
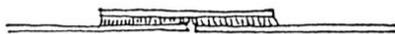


Figura I.5.14: Ejemplo de dobladillo interno para relinga perimetral. Fuente: [Llorens, 2015].

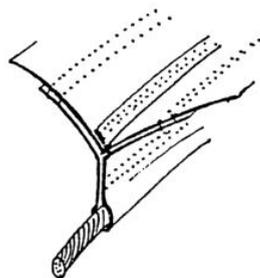
05.4.3. Unión entre paños

Además de a los elementos de borde, los módulos de membrana también se deben unir entre sí para dar continuidad a la tela en toda la superficie de la membrana.

Esta unión se resuelve mediante soldadura de alta frecuencia por solape de los patrones en taller, y se dispone además un cable interior (r/int) que une los pares del mástiles enfrentados en el interior de un espacio que forma una banda del mismo tejido soldada bajo la intersección entre los patrones. En la Figura I.5.15a se muestra un ejemplo de la unión soldada con empalme simple que se plantea para los módulos, en la Figura I.5.15b se muestra un ejemplo de la unión de la relinga interior a la membrana.



(a) Ejemplo de soldadura entre módulos



(b) Ejemplo de relinga entre módulos

Figura I.5.15: Ejemplos de detalles de unión entre paños de membrana. Fuente: [Llorens, 2015].

05.4.4. Apoyos pilares internos

En cuanto a las uniones de los mástiles al terreno, se tienen dos tipos distintos correspondientes a los dos tipos de condiciones de contorno consideradas en el cálculo en la base de estos.

En los mástiles interiores de las alineaciones se considera en el modelo que se permite el giro de eje paralelo al eje Y global del modelo (paralelo a las alineaciones de mástiles). Para que el comportamiento de los mástiles sea lo más próximo al modelado posible, se plantea una unión bulonada como la mostrada en la Figura I.5.16. A diferencia del ejemplo mostrado, en la unión proyectada se suelda una placa perpendicular en el extremo del mástil y se colocan dos orejetas soldadas a la placa base y una soldada a la placa del mástil interior a las otras dos.



Figura I.5.16: Ejemplo de unión en base de mástiles tipo pasador. Fuente: [Llorens, 2015].

05.4.5. Apoyos pilares esquina

En los mástiles de esquina se considera en el modelo que se restringen únicamente las traslaciones y se permiten las rotaciones libremente. Para que el comportamiento del mástil sea lo más próximo al modelado posible, se plantea una unión tipo rótula mediante una esfera, como el ejemplo mostrado en la Figura I.5.17.



Figura I.5.17: Ejemplo de unión en base de mástiles tipo rótula. Fuente: [Llorens, 2015].

05.4.6. Anclajes de cables

Además de los mástiles, los otros elementos de la estructura que se unen al terreno son los vientos, que en este caso transmiten tracciones en lugar de compresiones. Para la transferencia de estos esfuerzos, debe disponerse un sistema de unión que permita la regulación de los valores de tensiones en los cables.

El sistema planteado está formado por varillas roscadas que se atornillan contra un pasador en la parte más próxima al anclaje y contra una pletina que recoge también las horquillas de los cables en la parte superior. Al apretar o desapretar estas varillas, se aumenta o disminuye la tensión en el cable. Se escogen estos elementos del mismo fabricante de los cables [Redaelli Tecna S.P.A.].

En la Figura I.5.18 se muestran ejemplos de los distintos elementos que conforman esta unión. La unión mostrada en la Figura I.5.18a dispone de los pasadores en la parte inferior y varillas roscadas que se plantean para este caso, que se unen a la placa de anclaje del mismo modo, introduciendo el pasador en una orejeta soldada a la placa. La unión mostrada en la Figura I.5.18b dispone en la parte superior de elementos similares a los planteados para este caso: una pletina contra la que se atornillarían las varillas roscadas, y que alojaría las horquillas de los extremos de los vientos.



(a) Ejemplo varillas+pasador



(b) Ejemplo pletina para varilla y horquilla

Figura I.5.18: Ejemplos unión vientos a anclaje. Fuente: [Llorens, 2015].

05.4.7. Detalles constructivos en cables

Debido a la presencia de los elementos de unión, la longitud de los cables obtenida en el proceso de búsqueda de forma no se corresponde con la longitud que tienen los cables en la estructura ejecutada. En los vientos se restan de esta longitud obtenida en el cálculo las distancias entre los puntos que representan los extremos del cable en la estructura real (intersecciones del eje del cable con la placa de anclaje y con el eje del mástil) y los centros de los agujeros de las horquillas dispuestas en cada extremo del cable 500 mm. En las relingas se resta de la distancia calculada, la distancia entre los ejes de los mástiles y los centros de las horquillas de los extremos de los cables 250 mm.

Además, en cada uno de los cables se añade una segunda unidad para prevenir que la rotura de uno de los cables pueda suponer la inestabilidad de la estructura. Este segundo cable añadido no

se espera que entre en tensión mientras el cable primario no pierda sus propiedades, su longitud sin tensión corresponde con la longitud del cable primario una vez tensado. Con ello, se muestra en la Tabla I.5.8 la longitud de cable sin tensión necesaria en cada uno de los cables y cada tipo de cable (l_{prim} primario y l_{sec} secundario); y en la Tabla I.5.9 se muestra la longitud total de cada tipo necesaria así como la masa total de acero de cables.

Cable	Tipo	l_{prim} [m]	l_{sec} [m]	l_{tot} [m]
ba/s/1-a	FLC36	7,029	7,056	14,085
ba/s/1-b	FLC32	7,029	7,056	14,085
al/s/1-a	FLC32	8,702	8,723	17,425
al/s/1-b	FLC32	8,702	8,722	17,424
ba/s/2-a	FLC28	7,029	7,046	14,075
ba/s/2-b	FLC28	7,029	7,046	14,075
al/s/2-a	FLC24	8,702	8,729	17,431
al/s/2-b	FLC24	8,702	8,729	17,431
ba/s/3-a	FLC28	7,029	7,046	14,075
ba/s/3-b	FLC28	7,029	7,046	14,075
al/s/3-a	FLC32	8,702	8,722	17,424
al/s/3-b	FLC32	8,702	8,723	17,425
ba/s/4-b	FLC32	7,029	7,056	14,085
ba/s/4-a	FLC36	7,029	7,056	14,085
al/n/1-a	FLC36	9,434	9,469	18,903
al/n/1-b	FLC32	9,434	9,469	18,903
ba/n/1-a	FLC28	7,238	7,256	14,494
ba/n/1-b	FLC28	7,238	7,256	14,494
al/n/2-a	FLC24	9,434	9,456	18,89
al/n/2-b	FLC24	9,434	9,456	18,89
ba/n/2-a	FLC24	7,238	7,261	14,499
ba/n/2-b	FLC24	7,238	7,261	14,499
al/n/3-a	FLC24	9,434	9,456	18,89
al/n/3-b	FLC24	9,434	9,456	18,89
ba/n/3-a	FLC28	7,238	7,256	14,494
ba/n/3-b	FLC28	7,238	7,256	14,494
al/n/4-b	FLC32	9,434	9,469	18,903
al/n/4-a	FLC36	9,434	9,469	18,903
r/mod1/s	OSS24	15,116	15,165	30,281
r/mod1/n	OSS24	15,408	15,459	30,867
r/mod2/s	OSS24	14,356	14,401	28,757
r/mod2/n	OSS24	14,424	14,469	28,893
r/mod3/s	OSS24	14,354	14,399	28,753
r/mod3/n	OSS24	14,42	14,465	28,885
r/mod4/s	OSS24	14,354	14,399	28,753
r/mod4/n	OSS24	14,42	14,465	28,885
r/mod5/s	OSS24	14,356	14,401	28,757
r/mod5/n	OSS24	14,424	14,469	28,893

Cable	Tipo	l_{prim} [m]	l_{sec} [m]	l_{tot} [m]
r/mod6/s	OSS24	15,116	15,165	30,281
r/mod6/n	OSS24	15,408	15,459	30,867
r/int/1	OSS24	13,437	13,476	26,913
r/int/2	OSS20	13,866	13,898	27,764
r/int/3	OSS20	14,073	14,094	28,167
r/int/4	OSS20	13,853	13,871	27,724
r/int/5	OSS20	14,073	14,094	28,167
r/int/6	OSS20	13,866	13,898	27,764
r/int/7	OSS24	13,437	13,476	26,913

Tabla I.5.8: Longitudes de cables primarios y secundarios. Elaboración: Propia.

Tipo	l_{tot} [m]	Masa lineal [kg/m]	Masa tipo [kg]
FLC36	69,976	7,2	503,827
FLC32	103,868	5,7	592,048
FLC28	162,082	4,3	696,953
FLC24	147,42	3,2	471,744
OSS24	413,698	2,9	1199,724
OSS20	142,086	2,0	284,172
		Total:	3.748,468

Tabla I.5.9: Longitudes y masas totales de cables en estructura con cables secundarios. Elaboración: Propia.

Por último, se añaden en la estructura tubos rígidos por los cuales se pasan los contravientos para reducir su exposición y prevenir la corrosión.

05.4.8. Detalles constructivos en mástiles

Debido a la presencia de los aparatos de apoyo, la longitud de los mástiles obtenida en el proceso de búsqueda de forma no se corresponde con la longitud que tienen los mástiles en la estructura ejecutada. En los mástiles internos se resta de esta longitud la distancia entre el nivel superior de la zapata y el nivel superior de la placa de testa soldada en la base de los mástiles, que son 465 mm; en los mástiles de esquina, esta longitud son 490 mm. Con ello, se muestra en la Tabla I.5.10 la longitud de mástil real de cada mástil, y en la Tabla I.5.11 se muestra la longitud total de cada sección necesaria, así como la masa total de acero estructural.

Mástil	Sección	L [m]
BA/S/1	244,5x8	6,799
AL/S/1	273x10	8,444

Mástil	Sección	L [m]
BA/S/2	219,1x6,3	6,824
AL/S/2	273x10	8,445
BA/S/3	219,1x6,3	6,824
AL/S/3	273x10	8,444
BA/S/4	244,5x8	6,799
AL/N/1	323,9x10	9,129
BA/N/1	244,5x6,3	7,026
AL/N/2	273x12,5	9,154
BA/N/2	244,5x6,3	7,027
AL/N/3	273x12,5	9,154
BA/N/3	244,5x6,3	7,026
AL/N/4	323,9x10	9,129

Tabla I.5.10: Longitudes reales de mástiles. Elaboración: Propia.

Sección	l _{tot} [m]	Masa lineal [kg/m]	Masa sección [kg]
219,1x6,3	13,648	33,06	451,18
244,5x6,3	21,079	37,00	780,02
244,5x8	13,598	46,65	634,41
273x10	25,333	64,85	1.642,91
273x12,5	18,308	80,30	1.470,04
323,9x10	18,258	77,40	1.413,24
Total:			6.391,80

Tabla I.5.11: Longitudes y masas según tipos de sección empleados en mástiles. Elaboración: Propia.

ANEJO 06. PROCESO CONSTRUCTIVO Y PROGRAMA DE TRABAJOS

06.1. Objeto del anejo	2
06.2. Proceso constructivo	2
06.2.1. Fase 1: Actuaciones previas	2
06.2.2. Fase 2: Movimientos de tierra	2
06.2.3. Fase 3: Cimentaciones	2
06.2.4. Fase 4: Montaje de estructura metálica	3
06.2.5. Fase 5: Instalación de la membrana	3
06.2.6. Fase 6: Acabados	4
06.3. Programa de trabajos	4

06.1. Objeto del anejo

El objeto del presente anejo es describir las operaciones necesarias para ensamblar los distintos elementos estructurales y construir la cubierta. Además se define el orden en el que deberían realizarse estas operaciones y se estima la duración que supondría su realización.

06.2. Proceso constructivo

El proceso constructivo se compone de las fases siguientes.

06.2.1. Fase 1: Actuaciones previas

En primer lugar se realizan los trabajos de acondicionamiento de la parcela. Consistentes en el desbroce de la parte de terreno contigua a la estructura existente, la retirada de los árboles que por su posición en planta coinciden con las zapatas o anclajes, y la poda del resto de árboles.

La duración estimada para esta fase es de 3 días.

06.2.2. Fase 2: Movimientos de tierra

Tras el acondicionamiento de la zona de trabajos, se realizan las operaciones de excavación necesarias para la instalación de las cimentaciones.

Se establece un talud 3:2 de excavación y una profundidad de 0,9m. Se acopia el volumen de tierras extraído bajo la capa de tierra vegetal para el posterior relleno, y el resto se traslada en camión a vertedero. Tratándose el terreno de un relleno en la parte superficial, y arcillas de baja consistencia por debajo de los 0,5 de profundidad: la excavación se realiza mediante métodos mecánicos convencionales.

La duración estimada para esta fase es de 6 días.

06.2.3. Fase 3: Cimentaciones

Una vez finalizados los trabajos de movimientos de tierras, se ejecutan las zapatas. En primer lugar se vierte una capa de hormigón de limpieza de 10 cm de espesor para la nivelación de la superficie. Posteriormente se ejecutan las zapatas: se colocan las armaduras, se vierte el hormigón, se colocan las placas embebidas de apoyo de los mástiles, se realiza el vibrado y curado del hormigón, se rellena el trasdós de las zapatas, y se sueldan a las placas las pletinas a las cuales se atornillan los mástiles.

Tras la ejecución de las zapatas, se ejecutan los anclajes: se realiza la perforación, se instalan los tirantes, se realiza la inyección monitorizando que no se produzcan pérdidas, se realiza el tesado del anclaje, se cortan las longitudes sobrantes de los anclajes y se protegen las cabezas de los anclajes.

La duración estimada para esta fase es de 7 días.

06.2.4. Fase 4: Montaje de estructura metálica

Tras la ejecución de las cimentaciones, se instala la estructura metálica. Primeramente se unen los mástiles con los bulones a las orejetas dispuestas en las zapatas, y se apean en una posición cercana a la final a la espera de la instalación de la membrana. El mismo procedimiento se realiza con los mástiles de esquina y las rótulas.

Sucesivamente se unen los extremos de los cables a las placas de los anclajes y a las orejetas de las cabezas de los mástiles. En este paso de la construcción los cables se encuentran sin tensión, la estructura se mantiene estable debido al sistema de apeo de los mástiles.

En esta fase se debería incluir la sustitución propuesta de la malla existente por un cerramiento formado por paneles de aluminio perforados.

La duración estimada para esta fase es de 7 días.

06.2.5. Fase 5: Instalación de la membrana

Tras la instalación de la parte metálica de la estructura, se realiza la instalación de la membrana textil.

En primer lugar se dispone la membrana desplegada en el recinto de juego actual, tras la recepción desde taller y habiéndose ya realizado las uniones soldadas entre los módulos. Se colocan por el interior de los dobladillos las relingas.

La siguiente fase es el levantamiento de la membrana, por medios mecánicos y la unión de las relingas a las cabezas de los mástiles. Tras haber unido las relingas a los mástiles, se encuentra inicialmente la membrana sin tensión, se inicia la aplicación de la tensión, apretando las varillas dispuestas en los extremos inferiores de los vientos hasta que la distancia entre la cara superior del pasador y la cara inferior de la placa que contiene el extremo de los cables y las varillas sea de 300 mm. Se introduce la tensión estirando los vientos, estos las transmiten a las relingas en las cabezas de los mástiles, que se transmite de las relingas a la membrana a lo largo de todo el perímetro de los módulos.

En primer lugar se aplica la tensión en los cables de los mástiles altos, desde el centro hacia los extremos hasta alcanzar su longitud tensada prevista. En segundo lugar se aplica la tensión a los cables de los mástiles bajos, de la misma manera desde el centro a los extremos, controlando las posiciones de las cabezas de los mástiles, hasta que estas alcancen las posiciones previstas, hecho que da por finalizado el proceso de aplicación de la tensión. Finalmente se retiran los elementos de apeo utilizados.

La duración estimada para esta fase es de 5 días.

06.2.6. Fase 6: Acabados

La última fase del montaje comprende los acabados, que en la propia estructura consiste en la aplicación de pintura protectora de la corrosión en los mástiles.

En la zona cercana a la estructura se realiza el acondicionamiento del suelo con una capa de gravas, en una franja delimitada por la estructura existente y un perímetro exterior a 2,0 m de la alineación que forman los anclajes de los vientos.

A excepción de las zonas de acceso al recinto desde la Avenida de la Pau, en las que se dispone una banda de pavimento de hormigón impreso.

La duración estimada para esta fase es de 5 días.

06.3. Programa de trabajos

Tras establecer las operaciones necesarias para conformar la estructura, se realiza la planificación de los trabajos, en la que se estima el tiempo de duración de cada una de ellas y las dependencias entre cada una de las tareas. Esto se representa en el Diagrama de Gantt mostrado en la Figura I.6.1. La duración total estimada del proyecto es de 31 días laborables, que equivalen a 6 semanas y 1 día.

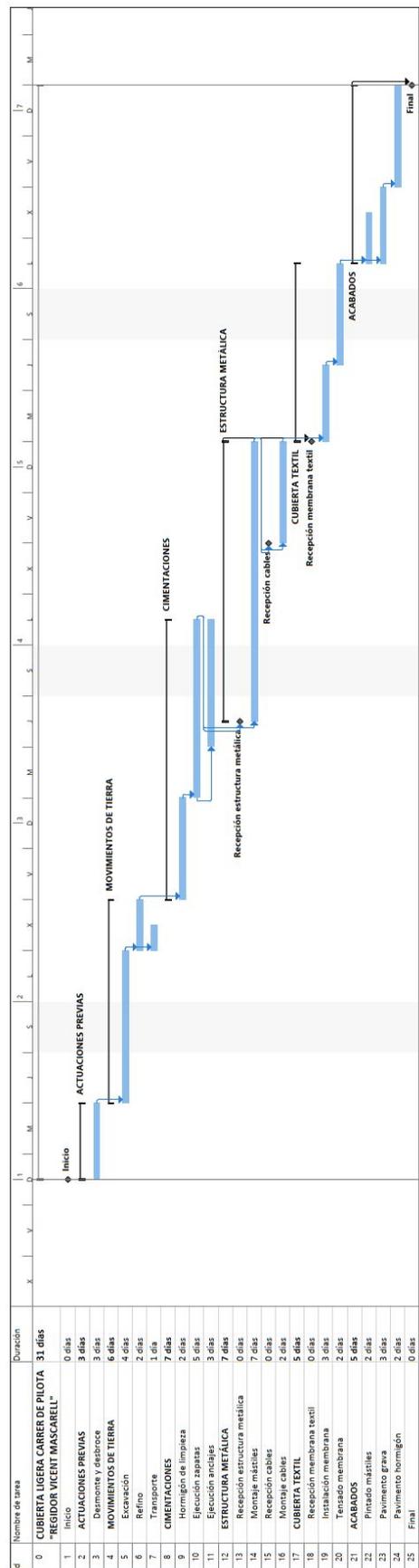


Figura I.6.1: Planificación de los trabajos de construcción. Elaboración: Propia.

ANEJO 07. PLAN DE CONSERVACIÓN

07.1. Objeto del anejo	2
07.2. Introducción	2
07.3. Requisitos de mantenimiento	2
07.3.1. Limpieza	2
07.3.2. Corrosión	3
07.3.3. Drenaje	3
07.3.4. Pretensado	3
07.3.5. Reparación	3
07.3.6. Sustitución	4
07.4. Controles en elementos estructurales	4
07.4.1. Cimentación	4
07.4.2. Mástiles	4
07.4.3. Cables	5
07.4.4. Membrana textil	5
07.5. Situaciones accidentales	6
07.5.1. Incendio	6
07.5.2. Nevada	6
07.5.3. Temporales de viento	7

07.1. Objeto del anejo

El objeto del presente anejo es definir las operaciones necesarias a realizar durante la fase de uso y explotación de la estructura, y la frecuencia con la que deben realizarse, con la finalidad de lograr que permanezca durante un mayor periodo de tiempo en condiciones aceptables sin ver comprometida su estabilidad, ni llegar a suponer un riesgo para los usuarios de la instalación.

07.2. Introducción

En las tensoestructuras, como ya se ha comentado previamente, es fundamental que se mantenga a lo largo de su vida útil un estado tensional determinado en los elementos para asegurar su estabilidad. Es por ello que adquiere relevante importancia el hecho de controlar el estado de la estructura con el paso del tiempo, y asegurar que se mantiene en condiciones seguras que reduzcan la probabilidad de fallo.

Para ello deben establecerse una serie de operaciones destinadas a verificar que los elementos estructurales proyectados están en estado adecuado para cumplir la función estructural que han sido proyectados. Y revisar que sea esta función estructural asignada la que desempeñan, y no otra.

Con un mantenimiento adecuado, no solo se asegura la integridad de la estructura, sino que se previene además que deba hacerse un excesivo número de reparaciones, y que se propaguen los problemas de la estructura. La aparición de estos problemas supondría por un lado que la estructura permanecería inoperativa durante mayores periodos de tiempo, y por otro lado supondría un sobrecoste para el propietario.

Es decir, una cubierta en buen estado es más segura y da servicio durante un mayor número de años que aquella en que no se controlara su estado a lo largo del tiempo y se produce una degradación progresiva de sus propiedades. Se detallan en las siguientes secciones un programa con revisiones y operaciones que sería aconsejable realizar en la estructura durante su vida útil para mantenerla en un estado óptimo.

Se recomienda en la Guía Europea [Forster and Mollaert, 2004], la incorporación en los proyectos de tensoestructuras de programas de mantenimiento con el requisito mínimo de una revisión anual, además de inspecciones tras condiciones meteorológicas extremas.

07.3. Requisitos de mantenimiento

Se establecen en primer lugar una serie de operaciones de mantenimiento con el fin de mantener la estructura en un estado adecuado que cumpla con las necesidades funcionales y estructurales.

07.3.1. Limpieza

La limpieza en las estructuras de membrana no es una operación estrictamente necesaria; la limpieza no alarga la expectativa de vida útil, pero puede reducirla si se realiza de forma defectuosa.

Esta limpieza debe llevarse a cabo según el manual de limpieza proporcionado por el fabricante, y efectuarse en modo que no dañe el revestimiento del tejido.

Debe realizarse evitando los productos de limpieza abrasivos, los disolventes fuertes, los cepillos duros y el agua a alta presión.

El acceso a la cubierta deberá realizarse por medio de grúas o equipos elevadores similares, con el empleo de arneses o sistemas de líneas de vida.

07.3.2. Corrosión

Se debe inspeccionar regularmente la cubierta para controlar la corrosión en mástiles y cables, especialmente las zonas en las que los cables se unen a pletinas, pernos o anclajes.

En caso de detección de corrosión en zonas de uniones, se deberá retirar y reemplazar el elemento afectado.

07.3.3. Drenaje

La evacuación del agua de la cubierta se produce por la propia pendiente de la membrana, no se disponen elementos de canalización o desagüe.

Debe observarse de forma habitual que no se produzcan sobre la membrana zonas de acumulación de agua, hojas de los árboles adyacentes, o basura. Si se detectan zonas de este tipo, debe retirarse el material acumulado y controlar que la membrana vuelva a su forma de doble curvatura original.

07.3.4. Pretensado

Mantener un estado tensional en la estructura cercano al establecido en la geometría de equilibrio es fundamental para la estabilidad de la estructura.

Este valor de pretensado varía como consecuencia de la fluencia, relajación, deterioro y otros múltiples factores. Se establece una revisión cada 6 meses del estado tensional de la estructura.

Esta medición se hace en los cables mediante tensiómetros, en la membrana manualmente aplicando una fuerza perpendicular y observando el movimiento de la estructura. Cuando en los cables se detecte una tensión inferior a un tercio del pretensado inicial, se realizará un retensado de la estructura ajustando los tensores de la longitud de los cables.

07.3.5. Reparación

Las operaciones de reparación se llevarán a cabo cuando se observen sobre la tela base o el revestimiento daños de pequeño tamaño, no superiores a 5 cm. Para ello se limpiará la zona alrededor del rasgado y con soldadura por aire caliente se dispondrán parches del mismo material original.

07.3.6. Sustitución

Las operaciones de sustitución se llevarán a cabo cuando el estado de la tela sea incompatible con la función estructural que debe cumplir. Puede deberse a roturas, excesivas deformaciones o efectos de acciones accidentales.

Para esta operación podría ser necesario un nuevo proceso de búsqueda de forma debido a la desviación entre la estructura ejecutada respecto de la geometría modelada inicialmente.

Los elementos estructurales y los elementos de unión deben ser revisados y evaluar si su estado es apto para la reutilización o deben ser también sustituidos.

07.4. Controles en elementos estructurales

Para preservar la durabilidad de la estructura, se plantea un programa de mantenimiento compuesto por una serie de inspecciones periódicas de la estructura y de sus componentes.

Se establece una inspección general de la estructura cada 10 años en las que se examina la presencia de daños estructurales y daños potenciales.

Adicionalmente, se realizan inspecciones concretas en cada uno de los tipos de elementos estructurales con mayor frecuencia.

07.4.1. Cimentación

Se establece una revisión cada dos años con el fin de detectar posibles fisuraciones, carbonataciones u otros daños en el paramento superior de las zapatas. En caso de observarse este tipo de daños, se deben reparar con resinas o pinturas con el fin de evitar que los daños alcancen las armaduras del elemento.

En los elementos de acero, se revisa cada año la no aparición de corrosión en los elementos de unión entre mástiles y zapatas, y entre cables y placas de anclajes.

07.4.2. Mástiles

Se establece una revisión cada tres años con el fin de detectar puntos de inicio de oxidación. En caso de detectarse, se retira la parte de material degradada y se protege la zona con la aplicación de pintura antioxidante.

Se revisan con el mismo periodo los desplazamientos de las cabezas de los mástiles con el fin de comprobar que no han sufrido desplomes permanentes elevados. Debe controlarse que no se hubieran suspendido ningún tipo de carga muerta no prevista de la estructura, con el fin de evitar posibles inestabilidades.

Se establece cada diez un nuevo pintado total de la estructura.

07.4.3. Cables

De igual manera que en los mástiles, se realizan revisiones para detectar puntos de corrosión. En caso de detectarse, se retira la parte de material degradada y se protege la zona con la aplicación de pintura antioxidante.

Se realizan además comprobaciones del estado tensional, tras las cuales se realizan retenciones en los casos que esta tensión sea inferior a un valor umbral, que se fija en un 30 % del valor de pretensado inicial en cada cable. Si se detecta que alguno de los cables ha perdido sus propiedades mecánicas o ha sufrido una rotura, se debe proceder a su sustitución por un nuevo cable idéntico al original posteriormente a un estudio de la longitud que sería necesaria de cable en la configuración de la estructura en ese momento.

07.4.4. Membrana textil

Se establece una inspección visual semestral de la membrana con el fin de detectar:

- Zonas de inversión de curvatura en las que se pudiera acumular agua o suciedad, en caso de detectarse deberá ser restituida la forma original.
- Zonas de cortes o aberturas en la tela, en caso de detectarse debe ser reparada con parches si el tamaño es reducido.
- Zonas de arrugas en los bordes de la membrana, en caso de detectarse debe plantearse un nuevo ajuste de la tensión en los extremos de las relingas y en las uniones de la membrana con los postes.
- Presencia de hojas de los árboles presentes entre la estructura y la avenida, que deberán ser retiradas en el caso que su acumulación sea notable. Por otro lado, si el crecimiento de los árboles es tal que las ramas se acercan a poca distancia de la membrana, deberán realizarse trabajos de poda para reducir el volumen de los árboles y alejarlos de la membrana.

Además es conveniente una inspección anual más profunda para conocer el estado de la membrana. Es conveniente su programación para el final del verano para asegurar que la estructura se encuentra en un estado aceptable antes de los meses de otoño e invierno en los que son más probables los temporales, que provocan las condiciones más críticas de la estructura.

Esta revisión se realiza con el fin de comprobar el estado de los elementos de anclaje de la membrana y de las soldaduras de membrana. En caso de que el estado de estos elementos no fuera adecuado, debe considerarse su reparación o sustitución.

Con la misma frecuencia se deberá revisar el estado tensional de la membrana. En caso de que la tensión observada fuera inferior a 1 kN/m, deberían realizarse operaciones de retensado para devolver la estructura a un estado tensional que sea más conveniente para la estabilidad de la estructura.

Por último, se fija un periodo de tiempo de 15 años tras los cuales debe sustituirse el material textil de la estructura, pues habría alcanzado el tiempo de vida útil del tejido.

07.5. Situaciones accidentales

Por otro lado se establecen las actuaciones que deberían realizarse en la estructura en el caso que tuvieran lugar sucesos accidentales como incendios en zonas cercanas, fuertes nevadas o temporales de viento.

07.5.1. Incendio

El tejido PES/PVC es un material que en caso de incendio se comporta como un material autoextinguible, se desintegra pero no produce llamas ni propaga el incendio.

Por lo que tras un eventual incendio la membrana habría desaparecido permaneciendo únicamente los componentes metálicos de la estructura, probablemente con peores propiedades mecánicas que las que tenían al inicio de la fase de uso.

Como primera actuación, se debe sostener la estructura metálica hasta asegurar que el estado de los materiales es seguro. Tras asegurar que no se produciría el colapso de la estructura, se evalúan las propiedades de los materiales. El acero es un material que en caso de incendio pierde rigidez y disminuye su resistencia, debe analizarse si los valores de estas propiedades tras el evento son suficientes para resistir las cargas a largo plazo de nuevo, solo a corto plazo hasta que pueda realizarse un reemplazo, o si se requiere el desmantelamiento inmediato de la estructura.

En función de los resultados de esta evaluación, se plantea la sustitución de los elementos metálicos que lo requieran y la instalación de nuevo de una membrana, o la instalación de una nueva estructura por completo.

07.5.2. Nevada

En el caso de producirse una nevada, debe considerarse el modo de retirar la nieve acumulada, y que esta operación sea lo más inmediata posible. En la Guía se apunta a un calentamiento de la membrana desde el interior de la estructura. Este calentamiento necesario podría estudiarse si fuera suficiente con mantener activo los elementos de iluminación del espacio de juego durante la nevada, o si fuera necesario disponer algún tipo de elemento adicional que hiciera aumentar la temperatura de la membrana. El bajo valor de inercia térmica del material textil, hace que no retenga el calor del interior y sea más fácil conseguir una temperatura en la superficie exterior que evite la acumulación de nieve y facilite el deshielo.

Se contempla también la retirada de la nieve vertiendo materiales fundentes que no sean químicamente peligrosos para el tejido. En cualquier caso, esta operación debe realizarse sin acceder a la cubierta, con ayuda de aparatos de elevación; por una parte para garantizar la seguridad de los operarios, y por otro lado para no añadir cargas puntuales sobre la cubierta, que conjuntamente con el peso de la nieve pueden producir inestabilidades de la membrana.

Tras la finalización del episodio de nevadas, debe evaluarse la membrana con el fin de detectar zonas de posibles deformaciones permanentes excesivas, o zonas de pérdida de tensión. Y si estas existen, se debe considerar la sustitución de las zonas afectadas o la realización de retensados de la estructura.

En el caso de fuertes nevadas, debe impedirse el uso de las instalaciones durante el periodo de tiempo en que se acumula la nieve sobre la cubierta o al menos hasta que se haya podido verificar que no se ha producido un embolsamiento, que podría producir el colapso de la estructura.

07.5.3. Temporales de viento

Los temporales de viento, del mismo modo que las nevadas, son acciones que inducen sobre la estructura cargas que alejan la estructura de su estado habitual y la acercan al fallo. Si bien el viento y la nieve difieren en su naturaleza pues una acción es variable y cíclica, y la otra es unidireccional y constante, ambas pueden ocasionar el colapso de la estructura y debe revisarse su estado tras uno de estos temporales.

En el caso de los temporales de viento, los daños más frecuentes son los desgarros de la tela o las uniones y la pérdida de tensión de los elementos. Debe revisarse tras los temporales que los elementos no han sufrido estos daños y en caso de que ocurrieran, sustituirse.

El principal efecto ocasionado por el viento en las tensoestructuras es la aparición del flameo, vibraciones de la membrana que producen grandes desplazamientos pudiendo suponer la aparición de deformaciones permanentes o la rotura de la tela. Se debe controlar la presencia de este efecto durante los temporales de viento, y en caso que fuera significativo (grandes deformaciones e inversiones de la curvatura), realizar inspecciones para detectar zonas con deformaciones plásticas o pérdida de tensión.

Bibliografía

- A. Ambroziak. Mechanical properties of Preconstraint 1202S coated fabric under biaxial tensile test with different load ratios. *Construction and Building Materials*, 80:210–224, apr 2015. ISSN 0950-0618. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.01.074.
- A. Ambroziak. Characterization study on mechanical properties of polyester coated fabric. *Archives of Civil Engineering*, Vol. 66(nr 2):105–118, 2020. ISSN 1230-2945. doi: 10.24425/ACE.2020.131799.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación (UNE-EN 1992-1-1:2013). 2013a.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación (UNE-EN 1993-1-1:2013). 2013b.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-8: Uniones (UNE-EN 1993-1-8:2013). 2013c.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 3-1: Torres, mástiles y chimeneas. Torres y chimeneas (UNE-EN 1993-3-1:2013). 2013d.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-11: Cables y tirantes (UNE-EN 1993-1-11:2015). 2015.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales (UNE-EN 1997-1). 2016a.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). UNE-EN 13782 Estructuras temporales Carpas Seguridad. 2016b.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Eurocódigos: Bases de cálculo de estructuras (UNE-EN 1990:2019). 2019.
- J. Aznar Bellver. Nuevos métodos de valoración : modelos multicriterio. *Universitat Politècnica de València*, 2012.
- L. Basset Salom. Tensoestructuras. jul 2012. URL <https://riunet.upv.es/handle/10251/16499>.
- P. G. Bergan and C. A. Felippa. A triangular membrane element with rotational degrees of freedom. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 50(1):25–69, 1985. ISSN 00457825. doi: 10.1016/0045-7825(85)90113-6.
- K. U. Bletzinger and E. Ramm. A General Finite Element Approach to the form Finding of Tensile Structures by the Updated Reference Strategy:. 14(2):131–144, 1999. ISSN 02663511. doi: 10.1260/0266351991494759. URL <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/0266351991494759>.
- O. P. i. V. d. T. Conselleria d’Habitatge. Real de Gandía. Modificación Puntual reajuste dotaciones (EXPTE. 20180256 - SG). URL <https://politicaterritorial.gva.es/auto/urbanismo/reg-planeamiento/4VALENCIA/46211REALDEGAND-{}CDA/1P.GENERAL/46211-1001NNSMODdotac.2018-0256/1APROBACI-{}D3N/46211-10012018-0256ACUERDO.pdf>.

-
- Dirección General de Carreteras. Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera. 2001. URL <https://www.mitma.gob.es/recursos{ }mfom/0710300.pdf>.
- Dlupal. Manual RWIND — Dlupal Software, 2019. URL <https://www.dlupal.com/es/productos/software-de-analisis-estructural-independiente/rwind-simulation>.
- Dlupal. Manual RFEM 5 — Dlupal Software, 2021. URL <https://www.dlupal.com/en/downloads-and-information/documents/online-manuals/rfem-5/01/01>.
- H. Engel. Sistemas de estructuras, 2001.
- B. Forster and M. Mollaert. *Arquitectura textil : guía europea de diseño de las estructuras superficiales tensadas*. 2004. ISBN 9788489150829.
- G2G Consultores. Informe Geotécnico. Pabellón deportivo en Av de la Pau N 10. Real de Gandía (Valencia). Technical report, Tavernes de la Valldigna, 2018.
- Grupo Condesa. Condesa. URL <http://www.condesa.com/inicio.html>.
- C. Hsieh and Y.-C. Tseng. Tensile Creep Behavior of a PVC Coated Polyester Geogrid at Different Temperatures. 2008. URL www.cwb.gov.tw.
- IVE. Base de datos — Instituto valenciano de la edificación (IVE), 2022. URL <https://www.five.es/base-de-datos/>.
- K.-M. Koch and K. J. Habermann. Membrane structures : innovative building with film and fabric, 2004.
- J. Llorens. Fabric Structures in Architecture. *Fabric Structures in Architecture*, (January 2015):283–387, 2015. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782422334000115>.
- L. Meng and M. Wu. Study on stress relaxation of membrane structures in the prestress state by considering viscoelastic properties of coated fabrics. *Thin-Walled Structures*, 106:18–27, sep 2016. ISSN 0263-8231. doi: 10.1016/J.TWS.2016.04.016.
- Ministerio de Fomento. Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la Norma de construcción sismorresistente: Parte general y edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 11 de octubre de 2002, núm. 244, pages 35898–35967, 2002.
- Ministerio de Hacienda. Sede Electrónica del Catastro, a. URL <https://www.sedecatastro.gob.es/>.
- Ministerio de Hacienda. Plataforma de Contratación del Sector Público, b. URL <https://contrataciondelestado.es/wps/portal/plataforma>.
- Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural. *Boletín Oficial del Estado*, 10 de agosto de 2021, núm. 190, pages 97664–99452, 2021.
- Ministerio de Vivienda. Orden VIV/984/2009, de 15 de abril, por la que se modifican determinados documentos básicos del Código Técnico de la Edificación aprobados por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, y el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre. *Boletín Oficial del Estado*, 23 de abril de 2009, núm. 99, pages 36395–36450, 2009. URL <https://www.codigotecnico.org/>.
- M. Mollaert, L. D. Laet, L. Pyl, and R. Devos. The design of tensile surface structures. *Steel Construction*, 8(4):251–258, nov 2015. ISSN 1867-0539. doi: 10.1002/STCO.201510035. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/stco.201510035>.
- Redaelli Tecna S.P.A. REDAELLI — Home. URL <https://www.redaelli.com/>.

BIBLIOGRAFÍA

M. Seidel. *Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction*. John Wiley and Sons, 2009. ISBN 9783433029220. doi: 10.1002/9783433600269. URL <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaupves-ebooks/reader.action?docID=481254>.

TensiNet Association. Tensinet. URL <https://www.tensinet.com/>.

V. Yepes. Introducción a la toma de decisiones – El blog de Víctor Yepes, 2018. URL <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/16/introduccion-a-la-toma-de-decisiones/>.

Documento II

PLANOS

Documento III

VALORACIÓN ECONÓMICA

CUADRO DE PRECIOS N° 1	5
MEDICIONES Y PRESUPUESTOS PARCIALES	13
PRESUPUESTO GENERAL	29

CUADRO DE PRECIOS N° 1

Cuadro de precios nº 1

Nº	Designación	Importe (Euros)	
		En cifra	En letra
	1 ACTUACIONES PREVIAS		
1.1	<i>Ud</i> Desmonte de árbol con tocón, incluso tala de ramas, troceado con medios mecánicos y la retirada de material, sin incluir la carga y transporte.	144,00	CIENTO CUARENTA Y CUATRO EUROS
	2 MOVIMIENTOS DE TIERRA		
2.1	M^3 Excavación de pozos para cimentaciones hasta una profundidad de 2 m, en suelo de arcilla semidura, con medios mecánicos, y carga a camión.	24,52	VEINTICUATRO EUROS CON CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS
2.2	M^2 Refino y acabado del fondo de la excavación en cajeados de cimentaciones.	2,85	DOS EUROS CON OCHENTA Y CINCO CÉNTIMOS
2.3	M^3 Transporte de tierras con camión de los productos procedentes de la excavación de cualquier tipo de terreno a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos, situado a una distancia máxima de 20 km.	4,96	CUATRO EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS
2.4	M^3 Canon de vertido por entrega de tierras procedentes de la excavación, en vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos.	2,25	DOS EUROS CON VEINTICINCO CÉNTIMOS
	3 CIMENTACIONES		
3.1	M^2 Capa de hormigón de limpieza y nivelado de fondos de cimentación, de 10 cm de espesor, de hormigón HL-150/B/20, fabricado en central y vertido desde camión, en el fondo de la excavación previamente realizada.	7,78	SIETE EUROS CON SETENTA Y OCHO CÉNTIMOS
3.2	M^3 Hormigón para armar en zapatas de cimentación, HA-25/F/20/XC2, fabricado en central, y vertido desde camión.	100,76	CIEN EUROS CON SETENTA Y SEIS CÉNTIMOS
3.3	<i>kg</i> Acero UNE-EN 10080 B 500 S para elaboración de la ferralla (corte, doblado y conformado de elementos) en taller industrial y montaje en zapata de cimentación. Incluso alambre de atar y separadores.	1,82	UN EURO CON OCHENTA Y DOS CÉNTIMOS

CUADRO DE PRECIOS Nº 1

Cuadro de precios nº 1			
Nº	Designación	Importe (Euros)	
		En cifra	En letra
3.4	M Anclaje permanente de zapata al terreno, con inclinación de 75° respecto al plano horizontal, hasta 17,5 m de longitud, compuesto de los siguientes trabajos: extracción de tierras con medios mecánicos, mediante perforación del muro pantalla y del terreno, con entubación de 152 mm de diámetro exterior; introducción de 3 cables formados por cordones trenzados de acero de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, engrasados y envainados en tubo de PE; inyección a presión mediante el sistema de inyección única global (IU), de lechada de cemento CEM I 42,5N, con una relación agua/cemento de 0,4, dosificada en peso, para protección y formación del bulbo; para recibir la cabeza de anclaje permanente, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.	110,81	CIENTO DIEZ EUROS CON OCHENTA Y UN CÉNTIMOS
3.5	M Anclaje permanente de zapata al terreno, con inclinación de 75° respecto al plano horizontal, hasta 17,5 m de longitud, compuesto de los siguientes trabajos: extracción de tierras con medios mecánicos, mediante perforación del muro pantalla y del terreno, con entubación de 152 mm de diámetro exterior; introducción de 4 cables formados por cordones trenzados de acero de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, engrasados y envainados en tubo de PE; inyección a presión mediante el sistema de inyección única global (IU), de lechada de cemento CEM I 42,5N, con una relación agua/cemento de 0,4, dosificada en peso, para protección y formación del bulbo; para recibir la cabeza de anclaje permanente, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.	113,87	CIENTO TRECE EUROS CON OCHENTA Y SIETE CÉNTIMOS

Cuadro de precios nº 1			
Nº	Designación	Importe (Euros)	
		En cifra	En letra
3.6	<i>M</i> Anclaje permanente de zapata al terreno, con inclinación de 75° respecto al plano horizontal, hasta 17,5 m de longitud, compuesto de los siguientes trabajos: extracción de tierras con medios mecánicos, mediante perforación del muro pantalla y del terreno, con entubación de 152 mm de diámetro exterior; introducción de 5 cables formados por cordones trenzados de acero de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, engrasados y envainados en tubo de PE; inyección a presión mediante el sistema de inyección única global (IU), de lechada de cemento CEM I 42,5N, con una relación agua/cemento de 0,4, dosificada en peso, para protección y formación del bulbo; para recibir la cabeza de anclaje permanente, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.	116,93	CIENTO DIECISEIS EUROS CON NOVENTA Y TRES CÉNTIMOS
3.7	<i>Ud</i> Transporte, puesta en obra y retirada de equipo completo de perforación y tesado, para la realización de anclajes al terreno en muros, a una distancia de entre 50 y 100 km.	4.882,76	CUATRO MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y DOS EUROS CON SETENTA Y SEIS CÉNTIMOS
3.8	<i>Ud</i> Cabeza de anclaje permanente, para 3 cables trenzados de acero, de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, formada por placa de reparto de 250x250x25 mm, cuña triangular de fricción de acero, protección externa con caperuza de plástico de 160 mm de diámetro, juntas de neopreno y tornillería.	148,62	CIENTO CUARENTA Y OCHO EUROS CON SETENTA Y DOS CÉNTIMOS
3.9	<i>Ud</i> Cabeza de anclaje permanente, para 4 cables trenzados de acero, de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, formada por placa de reparto de 250x250x25 mm, cuña triangular de fricción de acero, protección externa con caperuza de plástico de 160 mm de diámetro, juntas de neopreno y tornillería.	154,98	CIENTO CINCUENTA Y CUATRO EUROS CON NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS
3.10	<i>Ud</i> Cabeza de anclaje permanente, para 5 cables trenzados de acero, de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, formada por placa de reparto de 250x250x25 mm, cuña triangular de fricción de acero, protección externa con caperuza de plástico de 160 mm de diámetro, juntas de neopreno y tornillería.	161,36	CIENTO SESENTA Y UN EUROS CON TREINTA Y SEIS CÉNTIMOS
3.11	<i>Ud</i> Tesado de anclajes permanentes, durante una jornada laboral, mediante equipo formado por gato de tesado multifilar y central hidráulica.	1.394,02	MIL TRESCIENTOS NOVENTA Y CUATRO EUROS CON DOS CÉNTIMOS

CUADRO DE PRECIOS Nº 1

Cuadro de precios nº 1			
Nº	Designación	Importe (Euros)	
		En cifra	En letra
3.12	<p><i>Ud</i> Placa de anclaje de acero UNE-EN 10025 S275JR en perfil plano, con taladro central biselado, de 350x350 mm y espesor 15 mm, con 8 pernos soldados, de acero corrugado UNE-EN 10080 B 500 S de 16 mm de diámetro y 40 cm de longitud total.</p> <p>4 ESTRUCTURA METÁLICA</p>	57,77	CINCUENTA Y SIETE EUROS CON SETENTA Y SIETE CÉNTIMOS
4.1	<p><i>kg</i> Acero UNE-EN 10219-1 S275J0H, en pilares formados por piezas simples de perfiles huecos conformados en caliente, redondos, acabado con imprimación antioxidante, colocado con uniones soldadas en taller y uniones bulonadas en obra, a una altura de más de 3 m.</p>	2,40	DOS EUROS CON CUARENTA CÉNTIMOS
4.2	<p><i>M</i> Cables de acero tipo Full Locked Coil de Redaelli, o equivalente, de ϕ 36 mm, compuesto por una capa exterior en forma de "Z", una superficie externa bloqueada, el compuesto interno Tensofill y con revestimiento de aleación de zinc y aluminio (Zn95Al5) de cada alambre externo que permite una alta protección contra la corrosión, mejorado con ceras especiales y revestimiento de HDPE extruido o coextruido, color y acabado a elegir por DF. Incluidos terminales de horquilla y casquillo en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmento montado y terminado.</p>	142,81	CIENTO CUARENTA Y DOS EUROS CON OCHENTA Y UN CÉNTIMOS
4.3	<p><i>M</i> Cables de acero tipo Full Locked Coil de Redaelli, o equivalente, de ϕ 32 mm, compuesto por una capa exterior en forma de "Z", una superficie externa bloqueada, el compuesto interno Tensofill y con revestimiento de aleación de zinc y aluminio (Zn95Al5) de cada alambre externo que permite una alta protección contra la corrosión, mejorado con ceras especiales y revestimiento de HDPE extruido o coextruido, color y acabado a elegir por DF. Incluidos terminales de horquilla y casquillo en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmento montado y terminado.</p>	126,26	CIENTO VEINTISEIS EUROS CON VEINTISEIS CÉNTIMOS

Cuadro de precios nº 1

Nº	Designación	Importe (Euros)	
		En cifra	En letra
4.4	<i>M</i> Cables de acero tipo Full Locked Coil de Redaelli, o equivalente, de ϕ 28 mm, compuesto por una capa exterior en forma de "Z", una superficie externa bloqueada, el compuesto interno Tensofill y con revestimiento de aleación de zinc y aluminio (Zn95Al5) de cada alambre externo que permite una alta protección contra la corrosión, mejorado con ceras especiales y revestimiento de HDPE extruido o coextruido, color y acabado a elegir por DF. Incluidos terminales de horquilla y casquillo en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmente montado y terminado.	110,82	CIENTO DIEZ EUROS CON OCHENTA Y DOS CÉNTIMOS
4.5	<i>M</i> Cables de acero tipo Full Locked Coil de Redaelli, o equivalente, de ϕ 24 mm, compuesto por una capa exterior en forma de "Z", una superficie externa bloqueada, el compuesto interno Tensofill y con revestimiento de aleación de zinc y aluminio (Zn95Al5) de cada alambre externo que permite una alta protección contra la corrosión, mejorado con ceras especiales y revestimiento de HDPE extruido o coextruido, color y acabado a elegir por DF. Incluidos terminales de horquilla y casquillo en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmente montado y terminado.	98,68	NOVENTA Y OCHO EUROS CON SESENTA Y OCHO CÉNTIMOS
5.1	5 CUBIERTA TEXTIL <i>M</i> ² Membrana tipo Flexlight Advanced 1302 S2 de Serge Ferrari, o equivalente. Color blanco, compuesto por hilo de poliéster de alta tenacidad urdimbre trama 1.100/2.200 Dtex y resistencia a tracción 800/700 daN/5cm, reacción al fuego C-s2, d0 y tratamiento de superficie S2 PVDF/PVDF, resultando un peso de 1.350 g/m ² . Totalmente confeccionada mediante soldadura por solape de borde caliente de 80 mm, y terminada con dobladillos de 140 mm preparada para conectar los cables de relinga. Incluye: desperdicios, refuerzos, totalmente acabada e instalada en obra, y tensada a 6,20 kN/m, medida en su superficie 2D de patrones sin tensión.	98,42	NOVENTA Y OCHO EUROS CON CUARENTA Y DOS CÉNTIMOS

Cuadro de precios nº 1			
Nº	Designación	Importe (Euros)	
		En cifra	En letra
5.2	M Cables de acero tipo Open spiral strands de Redaelli, o equivalente, de ϕ 24 mm, compuesto por múltiples capas de alambres redondos enrollados en forma de hélice alrededor del núcleo central, protección contra la corrosión garantizada por el tampón interno Tensofil y por una protección superficial Zn o Zn95Al5, mejorada con una cubierta de HD-PE extruido, color y acabado a elegir por DF. Incluidos terminales de horquilla en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmente montado y terminado.	95,38	NOVENTA Y CINCO EUROS CON TRENTA Y OCHO CÉNTIMOS
5.3	M Cables de acero tipo Open spiral strands de Redaelli, o equivalente, de ϕ 20 mm, compuesto por múltiples capas de alambres redondos enrollados en forma de hélice alrededor del núcleo central, protección contra la corrosión garantizada por el tampón interno Tensofil y por una protección superficial Zn o Zn95Al5, mejorada con una cubierta de HD-PE extruido, color y acabado a elegir por DF. Incluidos terminales de horquilla en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmente montado y terminado. 6 ACABADOS	85,45	OCHENTA Y CINCO EUROS CON CUARENTA Y CINCO CÉNTIMOS
6.1	M ² Esmalte de poliuretano, color a elegir, acabado brillante; previa aplicación de una mano de imprimación fosfocromatante de un solo componente, color negro, acabado mate. Sobre estructura de acero galvanizado.	21,77	VEINTIUN EUROS CON SETENTA Y SIETE CÉNTIMOS
6.2	M ² Pavimento terrizo peatonal, de 10 cm de espesor, realizado con grava caliza, extendida y refinada a mano. Incluso colocación inferior de malla orgánica, biodegradable, elaborada con fibras naturales de coco 100%, entretejadas con mallas e hilo de polipropileno fotodegradable, 250 g/m ² de masa superficial, para el control de la erosión y función antihierbas en la realización de plantaciones, permeable al agua, al aire y a los nutrientes, fijada al terreno donde se vaya a realizar la plantación, a razón de 1 planta/m ² con piqueta de anclaje de acero, en forma de L, de 6 mm de diámetro.	10,29	DIEZ EUROS CON VEINTINUEVE CÉNTIMOS

Cuadro de precios nº 1			
Nº	Designación	Importe (Euros)	
		En cifra	En letra
6.3	M ² Pavimento continuo de hormigón impreso de 10 cm de espesor, con juntas, realizado con hormigón HM-20/B/20/X0 fabricado en central y vertido desde camión, extendido y vibrado manual; acabado impreso en relieve y tratado superficialmente con mortero decorativo de rodadura para pavimento de hormigón, color rojo, rendimiento 4,5 kg/m ² ; desmoldeante en polvo, color burdeos y capa de sellado final con resina impermeabilizante.	34,34	TRENTA Y CUATRO EUROS CON TRENTA Y CUATRO CÉNTIMOS

MEDICIONES Y PRESUPUESTOS PARCIALES

Presupuesto parcial N° 1 ACTUACIONES PREVIAS

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
1.1	Ud	Desmante de árbol con tocón, incluso tala de ramas, troceado con medios mecánicos y la retirada de material, incluso la carga y transporte.			
		Uds.	Parcial		Subtotal
		4	4		
		Total Ud:	4,00	144,00	576,00
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL N° 1 ACTUACIONES PREVIAS:					576,00

Presupuesto parcial N° 2 MOVIMIENTOS DE TIERRA								
N°	Ud	Descripción	Medición		Precio	Importe		
2.1	M ³	Excavación de pozos para cimentaciones hasta una profundidad de 2 m, en suelo de arcilla semidura, con medios mecánicos, y carga a camión. Criterio de valoración económica: El precio no incluye el transporte de los materiales excavados. Incluye: Replanteo general y fijación de los puntos y niveles de referencia. Colocación de las camillas en las esquinas y extremos de las alineaciones. Excavación en sucesivas franjas horizontales y extracción de tierras. Refinado de fondos y laterales a mano, con extracción de las tierras. Carga a camión de los materiales excavados. Criterio de medición de proyecto: Volumen medido sobre las secciones teóricas de la excavación, según documentación gráfica de Proyecto, sin duplicar esquinas ni encuentros. Criterio de medición de obra: Se medirá el volumen teórico ejecutado según especificaciones de Proyecto, sin duplicar esquinas ni encuentros y sin incluir los incrementos por excesos de excavación no autorizados, ni el relleno necesario para reconstruir la sección teórica por defectos imputables al Contratista. Se medirá la excavación una vez realizada y antes de que sobre ella se efectúe ningún tipo de relleno. Si el Contratista cerrase la excavación antes de conformada la medición, se entenderá que se aviene a lo que unilateralmente determine el director de la ejecución de la obra.						
		Uds.	Largo	Ancho	Alto	Parcial	Subtotal	
	Z1	3	1,6	1,6	0,9	6,91		
	Z2	3	1,8	1,8	0,9	8,75		
	Z3	4	2	2	0,9	14,40		
	Z4	2	2,2	2,2	0,9	8,71		
	Z5	2	2,4	2,4	0,9	10,37		
		Total m³:				49,14	24,52	1.204,91
2.2	M ²	Refino y acabado del fondo de la excavación en cajeados de cimentaciones.						
		Uds.	Largo	Ancho		Parcial	Subtotal	
	Z1	3	1,6	1,6		7,68		
	Z2	3	1,8	1,8		9,72		
	Z3	4	2	2		16,00		
	Z4	2	2,2	2,2		9,68		
	Z5	2	2,4	2,4		11,52		
		Total m²:				54,60	2,85	155,61

Presupuesto parcial N° 2 MOVIMIENTOS DE TIERRA

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2.3	M ³	Transporte de tierras con camión de los productos procedentes de la excavación de cualquier tipo de terreno a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos, situado a una distancia máxima de 20 km. Criterio de valoración económica: El precio incluye el tiempo de espera en obra durante las operaciones de carga, el viaje de ida, la descarga y el viaje de vuelta, pero no incluye la carga en obra. Incluye: Transporte de tierras a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos, con protección de las mismas mediante su cubrición con lonas o toldos. Criterio de medición de proyecto: Volumen medido sobre las secciones teóricas de las excavaciones, incrementadas cada una de ellas por su correspondiente coeficiente de esponjamiento, de acuerdo con el tipo de terreno considerado. Criterio de medición de obra: Se medirá, incluyendo el esponjamiento, el volumen de tierras realmente transportado según especificaciones de Proyecto.			
			Parcial		Subtotal
		Excavación zapatas	49,14		
		Extracción anclajes	4,32		
		Esponjamiento 30 %	16,04		
		Total m³:	69,50	4,96	344,71
2.4	M ³	Canon de vertido por entrega de tierras procedentes de la excavación, en vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos. Criterio de valoración económica: El precio no incluye el transporte. Criterio de medición de proyecto: Volumen medido sobre las secciones teóricas de las excavaciones, incrementadas cada una de ellas por su correspondiente coeficiente de esponjamiento, de acuerdo con el tipo de terreno considerado. Criterio de medición de obra: Se medirá, incluyendo el esponjamiento, el volumen de tierras realmente entregado según especificaciones de Proyecto.			
			Parcial		Subtotal
		Igual transporte	69,50		
		Total m³:	69,50	2,25	156,37
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL N° 2 MOVIMIENTOS DE TIERRA:					1.861,60

Presupuesto parcial N° 3 CIMENTACIONES

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
3.1	M ²	Capa de hormigón de limpieza y nivelado de fondos de cimentación, de 10 cm de espesor, de hormigón HL-150/B/20, fabricado en central y vertido desde camión, en el fondo de la excavación previamente realizada. Incluye: Replanteo. Colocación de toques y/o formación de maestras. Vertido y compactación del hormigón. Coronación y enrase del hormigón. Criterio de medición de proyecto: Superficie medida sobre la superficie teórica de la excavación, según documentación gráfica de Proyecto. Criterio de medición de obra: Se medirá la superficie teórica ejecutada según especificaciones de Proyecto, sin incluir los incrementos por excesos de excavación no autorizados.			
		Uds. Largo Ancho	Parcial		Subtotal
Z1		3 1,6 1,6	7,68		
Z2		3 1,8 1,8	9,72		
Z3		4 2 2	16,00		
Z4		2 2,2 2,2	9,68		
Z5		2 2,4 2,4	11,52		
		Total m²:	54,60	7,78	424,79
3.2	M ³	Hormigón para armar en zapatas de cimentación, HA-25/F/20/XC2, fabricado en central, y vertido desde camión. Incluye: Vertido y compactación del hormigón. Curado del hormigón. Criterio de medición de proyecto: Volumen teórico, según documentación gráfica de Proyecto. Criterio de medición de obra: Se medirá el volumen teórico ejecutado según especificaciones de Proyecto, sin incluir los incrementos por excesos de excavación no autorizados.			
		Uds. Largo Ancho Alto	Parcial		Subtotal
Z1		3 1,6 1,6 0,75	5,76		
Z2		3 1,8 1,8 0,75	7,29		
Z3		4 2 2 0,75	12,00		
Z4		2 2,2 2,2 0,75	7,26		
Z5		2 2,4 2,4 0,75	8,64		
		Total m³:	40,95	100,76	4.126,12
3.3	kg	Acero UNE-EN 10080 B 500 S para elaboración de la ferralla (corte, doblado y conformado de elementos) en taller industrial y montaje en zapata de cimentación. Incluso alambre de atar y separadores. Incluye: Corte y doblado de la armadura. Montaje y colocación de la armadura con separadores homologados. Sujeción de la armadura. Criterio de medición de proyecto: Peso teórico calculado según documentación gráfica de Proyecto. Criterio de medición de obra: Se calculará el peso teórico de la armadura ejecutada según especificaciones de Proyecto.			
		Uds. ϕ/Z L c/ ϕ kg/m ϕ	Parcial		Subtotal
Z1		3 32 2,55 2,55	624,24		

Presupuesto parcial N° 3 CIMENTACIONES

N°	Ud	Descripción			Medición	Precio	Importe
Z2		3	36	2,55	2,55	702,27	
Z3		4	40	2	2,55	816,00	
Z4		2	52	2,4	2,55	636,48	
Z5		2	64	2,6	2,55	848,64	
caballetes		84		2,2	0,92	170,02	
mermas %	10					379,76	
Total kg:					4.177,41	1,82	7.602,89

3.4 M Anclaje permanente de zapata al terreno, con inclinación de 75° respecto al plano horizontal, hasta 17,5 m de longitud, compuesto de los siguientes trabajos: extracción de tierras con medios mecánicos, mediante perforación del muro pantalla y del terreno, con entubación de 152 mm de diámetro exterior; introducción de 3 cables formados por cordones trenzados de acero de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, engrasados y envainados en tubo de PE; inyección a presión mediante el sistema de inyección única global (IU), de lechada de cemento CEM I 42,5N, con una relación agua/cemento de 0,4, dosificada en peso, para protección y formación del bulbo; para recibir la cabeza de anclaje permanente, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor. Incluye: Perforación de la pantalla y el terreno. Colocación de los cables. Inyección de la lechada. Limpieza de los restos generados. Carga manual de escombros sobre camión o contenedor. Realización de pruebas de servicio.

	Uds.	Largo	Parcial	Subtotal
ba/s/2-a	1	6	6,00	
ba/s/2-b	1	6	6,00	
ba/s/3-a	1	6	6,00	
ba/s/3-b	1	6	6,00	
Total m:			24,00	110,81
				2.659,44

3.5 M Anclaje permanente de zapata al terreno, con inclinación de 75° respecto al plano horizontal, hasta 17,5 m de longitud, compuesto de los siguientes trabajos: extracción de tierras con medios mecánicos, mediante perforación del muro pantalla y del terreno, con entubación de 152 mm de diámetro exterior; introducción de 4 cables formados por cordones trenzados de acero de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, engrasados y envainados en tubo de PE; inyección a presión mediante el sistema de inyección única global (IU), de lechada de cemento CEM I 42,5N, con una relación agua/cemento de 0,4, dosificada en peso, para protección y formación del bulbo; para recibir la cabeza de anclaje permanente, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor. Incluye: Perforación de la pantalla y el terreno. Colocación de los cables. Inyección de la lechada. Limpieza de los restos generados. Carga manual de escombros sobre camión o contenedor. Realización de pruebas de servicio.

Presupuesto parcial N° 3 CIMENTACIONES

N°	Ud	Descripción		Medición	Precio	Importe
		Uds.	Largo			
al/s/1-a		1	8		8,00	
al/s/1-b		1	8		8,00	
al/s/2-a		1	8		8,00	
al/s/2-b		1	8		8,00	
al/s/3-a		1	8		8,00	
al/s/3-b		1	8		8,00	
ba/n/1-a		1	8		8,00	
ba/n/1-b		1	8		8,00	
al/n/2-a		1	8		8,00	
al/n/2-b		1	8		8,00	
al/n/3-a		1	8		8,00	
al/n/3-b		1	8		8,00	
ba/n/3-a		1	8		8,00	
ba/n/3-a		1	8		8,00	
Total m:				112,00	113,87	12.753,44

3.6 M

Anclaje permanente de zapata al terreno, con inclinación de 75° respecto al plano horizontal, hasta 17,5 m de longitud, compuesto de los siguientes trabajos: extracción de tierras con medios mecánicos, mediante perforación del muro pantalla y del terreno, con entubación de 152 mm de diámetro exterior; introducción de 5 cables formados por cordones trenzados de acero de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, engrasados y envainados en tubo de PE; inyección a presión mediante el sistema de inyección única global (IU), de lechada de cemento CEM I 42,5N, con una relación agua/cemento de 0,4, dosificada en peso, para protección y formación del bulbo; para recibir la cabeza de anclaje permanente, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor. Incluye: Perforación de la pantalla y el terreno. Colocación de los cables. Inyección de la lechada. Limpieza de los restos generados. Carga manual de escombros sobre camión o contenedor. Realización de pruebas de servicio.

	Uds.	Largo	Parcial	Subtotal
ba/s/1-a	1	10	10,00	
ba/s/1-b	1	10	10,00	
ba/s/4-a	1	10	10,00	
ba/s/4-b	1	10	10,00	
al/n/1-a	1	10	10,00	
al/n/1-b	1	10	10,00	
al/n/4-a	1	10	10,00	
al/n/4-b	1	10	10,00	
Total m:			80,00	116,93
				9.354,40

Presupuesto parcial N° 3 CIMENTACIONES

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
3.7	Ud	Transporte, puesta en obra y retirada de equipo completo de perforación y tesado, para la realización de anclajes al terreno en muros, a una distancia de entre 50 y 100 km. Criterio de valoración económica: El precio incluye el desplazamiento a la obra del personal especializado y el traslado del equipo entre diferentes emplazamientos dentro de la misma obra. Incluye: Transporte a la obra. Montaje del equipo. Desmontaje del equipo. Retirada del equipo.			
		Uds.	Parcial		Subtotal
		1	1,00		
		Total Ud:	1,00	4.882,76	4.882,76
3.8	Ud	Cabeza de anclaje permanente, para 3 cables trenzados de acero, de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, formada por placa de reparto de 250x250x25 mm, cuña triangular de fricción de acero, protección externa con caperuza de plástico de 160 mm de diámetro, juntas de neopreno y tornillería. Incluye: Colocación de la cabeza de anclaje.			
		Uds.	Parcial		Subtotal
		ba/s/2-a	1,00		
		ba/s/2-b	1,00		
		ba/s/3-a	1,00		
		ba/s/3-b	1,00		
		Total Ud:	4,00	148,62	594,48
3.9	Ud	Cabeza de anclaje permanente, para 4 cables trenzados de acero, de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, formada por placa de reparto de 250x250x25 mm, cuña triangular de fricción de acero, protección externa con caperuza de plástico de 160 mm de diámetro, juntas de neopreno y tornillería. Incluye: Colocación de la cabeza de anclaje.			
		Uds.	Parcial		Subtotal
		al/s/1-a	1,00		
		al/s/1-b	1,00		
		al/s/2-a	1,00		
		al/s/2-b	1,00		
		al/s/3-a	1,00		
		al/s/3-b	1,00		
		ba/n/1-a	1,00		
		ba/n/1-b	1,00		
		al/n/2-a	1,00		
		al/n/2-b	1,00		
		al/n/3-a	1,00		
		al/n/3-b	1,00		
		ba/n/3-a	1,00		
		ba/n/3-a	1,00		
		Total Ud:	14,00	154,98	2.169,72

Presupuesto parcial N° 3 CIMENTACIONES

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
3.10	Ud	Cabeza de anclaje permanente, para 5 cables trenzados de acero, de 0,6" (15,2 mm) de diámetro nominal, formada por placa de reparto de 250x250x25 mm, cuña triangular de fricción de acero, protección externa con caperuza de plástico de 160 mm de diámetro, juntas de neopreno y tornillería. Incluye: Colocación de la cabeza de anclaje.			
		Uds.	Parcial		Subtotal
	ba/s/1-a	1	1,00		
	ba/s/1-b	1	1,00		
	ba/s/4-a	1	1,00		
	ba/s/4-b	1	1,00		
	al/n/1-a	1	1,00		
	al/n/1-b	1	1,00		
	al/n/4-a	1	1,00		
	al/n/4-b	1	1,00		
		Total Ud:	8,00	161,36	1.290,88
3.11	Ud	Tesado de anclajes permanentes, durante una jornada laboral, mediante equipo formado por gato de tesado multifilar y central hidráulica. Criterio de valoración económica: El precio incluye el desplazamiento a la obra del personal especializado. Incluye: Fijación de los cables a la cabeza de anclaje. Tesado de los cables.			
		Uds.	Parcial		Subtotal
		2	2,00		
		Total Ud:	2,00	1.394,02	2.788,04
3.12	Ud	Placa de anclaje de acero UNE-EN 10025 S275JR en perfil plano, con taladro central biselado, de 350x350 mm y espesor 15 mm, con 8 pernos soldados, de acero corrugado UNE-EN 10080 B 500 S de 16 mm de diámetro y 40 cm de longitud total. Criterio de valoración económica: El precio incluye los cortes, los despuntes, la preparación de bordes, las pletinas, las piezas especiales y los elementos auxiliares de montaje. Incluye: Limpieza y preparación del plano de apoyo. Replanteo y marcado de los ejes. Colocación y fijación provisional de la placa. Aplomado y nivelación.			
		Uds.	Parcial		Subtotal
		14	14,00		
		Total Ud:	14,00	57,77	808,78
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL N° 3 CIMENTACIONES:					49.455,74

Presupuesto parcial N° 4 ESTRUCTURA METÁLICA

N°	Ud	Descripción	Medición			Precio	Importe	
4.1	kg	Acero UNE-EN 10219-1 S275J0H, en mástiles formados por piezas simples de perfiles huecos conformados en frío, redondos, acabado con imprimación antioxidante, colocado con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. Criterio de valoración económica: El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, las placas de arranque, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje. Incluye: Limpieza y preparación del plano de apoyo. Replanteo y marcado de los ejes. Colocación y fijación provisional del mástil. Aplomado y nivelación. Ejecución de las uniones soldadas.						
			Uds.	Largo	kg/m	Parcial	Subtotal	
		BA/S/1 φ244.5X8	1	7,29	46,7	340,44		
		AL/S/1 φ273X10	1	8,91	64,9	578,26		
		BA/S/2 φ219.1X6.3	1	7,29	31,5	229,64		
		AL/S/2 φ273X10	1	8,91	64,9	578,26		
		BA/S/3 φ219.1X6.3	1	7,29	31,5	229,64		
		AL/S/3 φ273X10	1	8,91	64,9	578,26		
		BA/S/4 φ244.5X8	1	7,29	46,7	340,44		
		AL/N/1 φ323.9X10	1	9,62	77,4	744,59		
		BA/N/1 φ244.5X6.3	1	7,49	35,3	264,40		
		AL/N/2 φ273X12.5	1	9,62	80,5	774,41		
		BA/N/2 φ244.5X6.3	1	7,49	35,3	264,40		
		AL/N/3 φ273X12.5	1	9,62	80,5	774,41		
		BA/N/3 φ244.5X6.3	1	7,49	35,3	264,40		
		AL/N/4 φ323.9X10	1	9,62	77,4	744,59		
Total kg:						6.706,12	2,40	16.094,69

Presupuesto parcial N° 4 ESTRUCTURA METÁLICA						
N°	Ud	Descripción		Medición	Precio	Importe
4.2	M	Cables de acero tipo Full Locked Coil de Redaelli, o equivalente, de ϕ 36 mm, compuesto por una capa exterior en forma de "Z", una superficie externa bloqueada, el compuesto interno Tensofill y con revestimiento de aleación de zinc y aluminio (Zn95Al5) de cada alambre externo que permite una alta protección contra la corrosión, mejorado con ceras especiales y revestimiento de HDPE extruido o coextruido, color y acabado a elegir por DF. Incluidos terminales de horquilla y casquillo en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmento montado y terminado.				
		Uds.	Largo	Parcial		Subtotal
		ba/s/1-a	1 14,085	14,09		
		ba/s/4-a	1 14,085	14,09		
		al/n/1-a	1 18,903	18,90		
		al/n/4-a	1 18,903	18,90		
		Total m:		65,98	142,81	9.422,03
4.3	M	Cables de acero tipo Full Locked Coil de Redaelli, o equivalente, de ϕ 32 mm, compuesto por una capa exterior en forma de "Z", una superficie externa bloqueada, el compuesto interno Tensofill y con revestimiento de aleación de zinc y aluminio (Zn95Al5) de cada alambre externo que permite una alta protección contra la corrosión, mejorado con ceras especiales y revestimiento de HDPE extruido o coextruido, color y acabado a elegir por DF. Incluidos terminales de horquilla y casquillo en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmento montado y terminado.				
		Uds.	Largo	Parcial		Subtotal
		ba/s/1-b	1 14,085	14,09		
		al/s/1-a	1 17,425	17,43		
		al/s/1-b	1 17,424	17,42		
		al/s/3-a	1 17,424	17,42		
		al/s/3-b	1 17,425	17,43		
		ba/s/4-b	1 14,085	14,09		
		al/n/1-b	1 18,903	18,90		
		al/n/4-b	1 18,903	18,90		
		Total m:		135,67	126,26	17.130,20
4.4	M	Cables de acero tipo Full Locked Coil de Redaelli, o equivalente, de ϕ 28 mm, compuesto por una capa exterior en forma de "Z", una superficie externa bloqueada, el compuesto interno Tensofill y con revestimiento de aleación de zinc y aluminio (Zn95Al5) de cada alambre externo que permite una alta protección contra la corrosión, mejorado con ceras especiales y revestimiento de HDPE extruido o coextruido, color y acabado a elegir por DF. Incluidos terminales de horquilla y casquillo en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmento montado y terminado.				

Presupuesto parcial N° 4 ESTRUCTURA METÁLICA

N°	Ud	Descripción		Medición	Precio	Importe
		Uds.	Largo	Parcial		
		1	14,075	14,08		
		1	14,075	14,08		
		1	14,075	14,08		
		1	14,075	14,08		
		1	14,494	14,49		
		1	14,494	14,49		
		1	14,494	14,49		
		1	14,494	14,49		
Total m:				114,28	110,82	12.664,07
4.5	M	<p>Cables de acero tipo Full Locked Coil de Redaelli, o equivalente, de ϕ 24 mm, compuesto por una capa exterior en forma de "Z", una superficie externa bloqueada, el compuesto interno Tensofill y con revestimiento de aleación de zinc y aluminio (Zn95Al5) de cada alambre externo que permite una alta protección contra la corrosión, mejorado con ceras especiales y revestimiento de HDPE extruido o coextruido, color y acabado a elegir por DF. Incluidos terminales de horquilla y casquillo en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmente montado y terminado.</p>				
		1	17,431	17,43		
		1	17,431	17,43		
		1	18,89	18,89		
		1	18,89	18,89		
		1	14,494	14,49		
		1	14,494	14,49		
		1	18,903	18,90		
		1	18,903	18,90		
Total m:				18,90	98,68	1.865,35
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL N° 4 ESTRUCTURA METÁLICA:						57.176,33

Presupuesto parcial N° 5 CUBIERTA TEXTIL

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
5.1	M ²	Membrana tipo Flexlight Advanced 1302 S2 de Serge Ferrari, o equivalente. Color blanco, compuesto por hilo de poliéster de alta tenacidad urdimbre trama 1100/2200 Dtex y resistencia a tracción 800/700 daN/5cm, reacción al fuego C-s2, d0 y tratamiento de superficie S2 PVD-F/PVDF, resultando un peso de 1350 g/m ² . Totalmente confeccionada mediante soldadura de alta frecuencia por solape de 80 mm, y terminada con dobladillos de 140 mm preparada para conectar los cables de relinga. Incluye: desperdicios, refuerzos, totalmente acabada e instalada en obra, y tensada a 6,20 kN/m, medida en su superficie 2D de patrones sin tensión.			
		Uds.	Superf	Parcial	Subtotal
Módulo 1		1	196,039	196,04	
Módulo 2		1	199,942	199,94	
Módulo 3		1	199,633	199,63	
Módulo 4		1	199,635	199,64	
Módulo 5		1	199,941	199,94	
Módulo 6		1	196,04	196,04	
		Total m³:		1.191,23	98,42
					117.240,86
5.2	M	Cables de acero tipo Open Spiral Strands de Redaelli, o equivalente, de ϕ 24 mm, compuesto por múltiples capas de alambres redondos enrollados en forma de hélice alrededor del núcleo central, protección contra la corrosión garantizada por el tampón interno Tensofil y por una protección superficial Zn o Zn95Al5, mejorada con una cubierta de HDPE extruido, color y acabado a elegir por DF . Incluidos terminales de horquilla en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmento montado y terminado.			
		Uds.	Largo	Parcial	Subtotal
r/mod1/n		1	30,281	30,28	
r/mod1/s		1	30,867	30,87	
r/mod2/n		1	28,757	28,76	
r/mod2/s		1	28,893	28,89	
r/mod3/n		1	28,735	28,74	
r/mod3/s		1	28,885	28,89	
r/mod4/n		1	28,753	28,75	
r/mod4/s		1	28,885	28,89	
r/mod5/n		1	28,757	28,76	
r/mod5/s		1	28,893	28,89	
r/mod6/n		1	30,281	30,28	
r/mod6/s		1	30,867	30,87	
r/int/1		1	26,913	26,91	
r/int/7		1	26,913	26,91	
		Total m³:		406,68	95,38
					38.789,14

Presupuesto parcial N° 5 CUBIERTA TEXTIL

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
5.3	M	Cables de acero tipo Open Spiral Strands de Redaelli, o equivalente, de ϕ 20 mm, compuesto por múltiples capas de alambres redondos enrollados en forma de hélice alrededor del núcleo central, protección contra la corrosión garantizada por el tampón interno Tensofil y por una protección superficial Zn o Zn95Al5, mejorada con una cubierta de HDPE extruido, color y acabado a elegir por DF . Incluidos terminales de horquilla en extremos de cables según planos de detalle y repercusión del tesado. Totalmento montado y terminado.			
		Uds.	Largo	Parcial	Subtotal
		r/int/2	1 27,764	27,76	
		r/int/3	1 28,167	28,17	
		r/int/4	1 27,724	27,72	
		r/int/5	1 28,167	28,17	
		r/int/6	1 27,764	27,76	
		Total m³:	139,59	85,45	11.927,62
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL N° 5 CUBIERTA TEXTIL:					167.957,62

Presupuesto parcial N° 6 ACABADOS

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe		
6.1	M³	Aplicación manual de dos manos de esmalte de poliuretano, color a elegir, acabado brillante, (rendimiento: 0,077 l/m² cada mano); previa aplicación de una mano de imprimación fosfocromatante de un solo componente, color negro, acabado mate (rendimiento: 0,057 l/m²), sobre mástil formado por piezas simples de tubos circulares huecos de acero galvanizado en caliente.					
		Uds.	Long.	Perim.	Parcial	Subtotal	
		φ219.1X6.3	2	7,289	0,688	10,03	
		φ244.5X6.3	3	7,491	0,768	17,26	
		φ244.5X8	2	7,289	0,768	11,20	
		φ273X10	3	8,909	0,858	22,92	
		φ273X12.5	2	9,619	0,858	16,50	
		φ323.9X10	2	9,619	1,018	19,58	
		Total m³:			36,08	21,77	785,36
6.2	M²	Pavimento terrizo peatonal, de 10 cm de espesor, realizado con grava caliza, extendida y refinada a mano. Incluso colocación inferior de malla orgánica, biodegradable, elaborada con fibras naturales de coco 100 %, entrecosidas con mallas e hilo de polipropileno fotodegradable, 250 g/m² de masa superficial, para el control de la erosión y función antihierbas en la realización de plantaciones, permeable al agua, al aire y a los nutrientes, fijada al terreno donde se vaya a realizar la plantación, a razón de 1 planta/m² con piqueta de anclaje de acero, en forma de L, de 6 mm de diámetro.					
					Parcial	Subtotal	
					1.362,47		
		Total m³:			1.362,47	10,29	14.019,82
6.3	M²	Pavimento continuo de hormigón impreso de 10 cm de espesor, con juntas, realizado con hormigón HM-20/B/20/X0 fabricado en central y vertido desde camión, extendido y vibrado manual; acabado impreso en relieve y tratado superficialmente con mortero decorativo de rodadura para pavimento de hormigón, color rojo, rendimiento 4,5 kg/m²; desmoldeante en polvo, color burdeos y capa de sellado final con resina impermeabilizante.					
		Uds.	Largo	Ancho	Parcial	Subtotal	
		Acceso E	1	5,65	3	16,95	
		Acceso W	1	5,65	3	16,95	
		Total m³:			33,90	34,34	1.164,13
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL N° 6 ACABADOS:						15.969,30	

PRESUPUESTO GENERAL

RESUMEN DEL PRESUPUESTO

1	ACTUACIONES PREVIAS	576,00 €
2	MOVIMIENTOS DE TIERRA	1.861,60 €
3	CIMENTACIONES	49.455,74 €
4	ESTRUCTURA METÁLICA	57.176,33 €
5	CUBIERTA TEXTIL	167.957,62 €
6	ACABADOS	15.969,30 €
	Total:	292.996,60 €

Asciende el presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad de DOSCIENTOS NOVENTA Y DOS MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y SEIS EUROS CON SESENTA CÉNTIMOS.

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	292.996,60 €
13 % Gastos generales	38.089,56 €
6 % Beneficio industrial	17.579,80 €
SUMA DE G.G. y B.I.	55.669,35 €
VALOR ESTIMADO	348.665,95 €
21 % IVA	73.219,85 €
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	421.885,80 €

Asciende el presupuesto base de licitación a la expresada cantidad de CUATROCIENTOS VEINTIÚN MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y CINCO EUROS CON OCHENTA CÉNTIMOS.

En València, a julio de 2022



Francisco Fabregat Barberán

