



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO Y ANALISIS DE TENSO-
ESTRUCTURAS TEXTILES. APLICACION A
UNA CUBIERTA LIGERA SOBRE UN
ESPACIO PUBLICO.

STUDY AND ANALYSIS OF A TENSILE
STRUCTURE. APPLICATION TO A LIGHT
ROOF OVER A PUBLIC SPACE.

AUTOR

FELIPE DOSSET CLAVERIA

DIRECTOR

SERGIO PUÉRTOLAS BROTO

GRADO EN INGENIERIA DE TECNOLOGIAS INDUSTRIALES
ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

2021/2022

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado ha sido realizado por Felipe Dosset Claveria, estudiante del grado en ingeniería de tecnologías industriales en la universidad de Zaragoza. Tiene como título: "Estudio y análisis de tenso-estructuras textiles. Aplicación a una cubierta ligera sobre un espacio público." Se trata de un trabajo de investigación sobre un tipo de arquitectura poco convencional, en el que su estudio se inicia a principios del siglo pasado.

En este trabajo se muestran los resultados de una primera fase de documentación e investigación sobre la forma y fundamentos de las estructuras tensadas, como se emplean y cuáles son los fundamentos que les otorgan su estabilidad.

De igual manera se hace una búsqueda de información sobre los materiales que emplean, en el capítulo 3 de este trabajo esta recopilada toda la información con sus conclusiones sobre los diferentes tipos de material empleado en la arquitectura textil.

En una segunda fase, se procede al cálculo de un trabajo práctico sobre las tenso-estructuras, en el capítulo 4 se expone la metodología y el proceso de diseño seguido para el diseño y dimensionado de este tipo de estructuras. Y se muestran los resultados obtenidos en base a las simulaciones por elementos finitos realizados con el software Dlubal-RFEM.

Por último, se expresan las conclusiones obtenidas en este trabajo y las posibles líneas de actuación para seguir profundizando y desarrollando el tema.

ABSTRACT

The present project has been done by Felipe Dosset Claveria, a student of the degree of industrial engineering at the university of Zaragoza. The title of the project is: "Study and analysis of a tensile structure. Application to a light roof over a public space." It is an investigation project about a type of architecture non-conventional, textile-architecture, that it had been started to study recently, at the beginning of the last century.

In this document it is shown the results of a first phase of investigation of the form and fundamentals of the membrane structures, how they work and how they got their stability.

From another line of investigation, in the chapter 3 of this project there is a collection of the information about the different materials that are used in these structures, from a realistic point of view, showing the different suppliers.

With the results of the past lines of investigation, it is done a practice job with the software RFEM, which it is used to modulate a membrane structure designed by me. In these chapter it is shown the process that I have done to design it and the process to get the final dimensions according to the regular loads.

At the end, I express my conclusions about these technologies and the different line of investigation that can be followed.

INDICE

01. Introducción.....	5
1. Motivación.....	5
2. Objeto.....	5
3. Alcance	5
02. Estudio sobre las estructuras tensadas.....	6
1. Introducción	6
2. Antecedentes.....	7
3. Geometría y Forma de las Membranas Tensadas.....	8
Forma Sinclastica.....	9
Forma anticlastica	13
03. Materiales empleados en la arquitectura textil	18
1. Introducción	18
2. Membranas con base de Tejidos.....	19
Tipos de Fibras.....	19
Métodos de entrelazado de tejidos.....	20
Características y Propiedades.....	21
Membranas más utilizadas.....	27
3. Láminas de ETFE	31
Características y Propiedades.....	32
4. Comparativa de materiales	35
04. Proceso de diseño	36
1. Introducción	36
2. Búsqueda de la forma.....	37
3. Estabilización de la estructura portante.....	40
4. Casos de carga y combinaciones de carga.....	42
Carga de nieve.....	42
Carga de viento	42
Combinación de cargas	44
5. Elección de materiales y secciones	45
6. Resultados.....	47
05. Conclusiones e investigaciones futuras	51
06. Anexos	52

07.	Bibliografía.....	62
08.	Índice de figuras.....	65

01. Introducción

1. Motivación

Mi curiosidad y admiración sobre la edificación y las estructuras ya existía antes de empezar este grado, he visto de primera mano cómo en mi familia trabajaban para sacar proyectos adelante, desde las primeras fases de diseño y concepción del proyecto a las más técnicas y resolutivas para lograr crear lo que se tiene en la cabeza de forma funcional. Gracias a las asignaturas de este grado, que de forma progresiva te enseña a entender cómo se comporta la materia, desde el modelo de sólido rígido, hasta modelos de comportamiento del sólido deformable.

Tenía claro que quería estudiar una estructura, y desarrollar mis habilidades con software de elementos finitos, pero muchos proyectos que ofrecía la universidad no sacaban de mí la motivación que necesitaba.

Al conocer esta propuesta del profesor Sergio Puértolas, me convenció al momento, el estudio de una tecnología nueva de construcción que empleaba membranas textiles. Tenía mucho trabajo por delante, ya que era un ámbito completamente nuevo para mí, tenía que estudiar y desarrollar mis propias conclusiones sobre cómo funcionan estas estructuras para posteriormente desarrollar una cubierta utilizando esta tecnología.

2. Objeto

El objeto del presente trabajo es la investigación de los fundamentos que sustentan la arquitectura textil, en particular las estructuras de membranas tensadas, este estudio está íntimamente relacionado con el material que utiliza, por ello se realiza un estudio sobre los diferentes materiales que emplean las membranas.

Estos conocimientos adquiridos en el estudio teórico se ponen a prueba en el desarrollo de un caso práctico, en el que se desarrolla una cubierta en un lugar público de Zaragoza. Se pretende sintetizar los conocimientos adquiridos en el grado sobre el análisis de estructuras mediante elementos finitos en softwares de uso profesional como ABAQUS, ANSYS, o RFEM, siendo este último el utilizado en este trabajo.

3. Alcance

El alcance del proyecto tiene 3 fases muy diferenciadas, en la primera tenemos que familiarizarnos con la arquitectura textil, que la compone, cómo funciona y las obras más relevantes que existen. De este modo tenemos un esquema claro de qué tipos hay y qué fundamentos emplea.

Una vez adquirido este primer conocimiento, hacemos un estudio de los materiales reales que se emplean en el mercado, cuáles son sus propiedades, ventajas y desventajas y cuáles son sus aplicaciones. También se introduce en el mercado real de este tipo de arquitectura, investigando sobre cuáles son los proveedores de cada materia.

Como sinterización de esta información anterior, se desarrolla un caso práctico, empleando el software RFEM para la resolución de la estructura, aplicando en ella elementos comerciales. Se dimensiona la estructura acorde con la aplicación de cargas que propone la legislación aplicable vigente y se extraen conclusiones de los resultados.

02. Estudio sobre las estructuras tensadas

1. Introducción

Las tenso-estructuras, son un tipo de estructuras dentro de la arquitectura textil. Esta se entiende como, aquella que utiliza membranas tejidas o laminadas como elemento estructural principal para la definición y creación de espacios habitables. Este tipo de arquitectura combinan estructuras rígidas con membranas textiles, logrando amplios y estéticos cerramientos de gran variedad de forma, muy atractivos por la eficacia, sencillez y ligereza de la forma obtenida.



Fig. 2 Interior Palacio de la minería en Ciudad de México

Obtenido en la Web:

<https://arkin.mx/tenso-estructuras/>



Fig. 1 Exterior Palacio de la minería en Ciudad de México

Obtenida en la Web:

<https://www.pinterest.com.mx/pin/38069559327313882/?mt=login>

Las estructuras de membrana, logran la estabilidad del componente textil mediante equilibrio tensado, es decir, la tracción permanente de su superficie. En general, incluyen elementos de soporte que trabajan a compresión y absorberán estas fuerzas de tracción de la membrana, formando una estructura en equilibrio que trabaja a esfuerzos de tracción y compresión.

A diferencia de los anteriores usos que se les ha dado a las membranas, prácticamente elementos decorativos, en la arquitectura textil este componente cumple una función estructural o conforma el aspecto general del conjunto.

Por lo tanto, este tipo de estructuras tienen unas características muy diferentes a las obras de edificación convencionales, formadas por hormigón, acero y ladrillo. Estas se pueden englobar en ligereza, eficacia, luminosidad, temporalidad y atractivo estético.



Fig. 3 Cubierta de hormigón.

Obtenida en la web:

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/790390/premio-europeo-del-espacio-publico-urbano-2016-25->



Fig. 4 Cubierta metálica y de policarbonato

Obtenida en la web:

<https://www.ypestructuras.com/nuestros-trabajos-de-soldadura/>

2. Antecedentes

Históricamente se ha utilizado este tipo de arquitectura para albergar y proteger la vida de los seres humanos. Algunos ejemplos de estas antiguas comunidades son los beduinos, pueblo nómada del norte de África, que utilizaban y utilizan las tiendas tensadas para resistir las inclemencias del desierto. Al igual los pueblos kazajos utilizaban las denominadas Yurts para refugiarse del frío, y las conocidas tiendas tipi de los indios americanos, se sujetaban bajo estos fundamentos.



Fig. 5. Tienda beduina

Obtenida en la Web:

<https://ar.pinterest.com/pin/320670435960917816/visual-search/?x=14&y=9&w=438&h=296>



Fig. 6. Velarium en el Coliseo Romano

Obtenido de la web:

<https://www.glosarioarquitectonico.com/glossary/velarium/>

Pero no solo en los pueblos nómadas se observan esta tecnología, los griegos y romanos crearon los primeros toldos retractiles, llegando al apogeo de la arquitectura textil de la antigüedad con la creación del “velarium” del coliseo romano, que se estima que tenía una extensión entre 8000 y 16000 m².

Tras la caída del imperio romano, la arquitectura en general sufre un estancamiento e incluso retroceso en algunos aspectos. No es hasta finales del siglo XIX, 15 siglos después cuando vuelven aparecer los grandes espacios encerrados bajo una estructura textil, impulsado por el mundo del espectáculo ambulante. Estos necesitaban generar grandes cubiertas en poco espacio de tiempo y ligeras para luego desmontarlas y trasladarlas a otro lugar. Gracias a los avances en materiales textiles provocados por la revolución industrial, se logran crear telas más resistentes.

Tras la segunda guerra mundial se retoma el estudio y desarrollo de la arquitectura textil. El arquitecto Frei Otto contribuyó junto con otros técnicos a impulsar la evolución de las arquitecturas tensadas. Debido a su investigación sobre la obtención de formas estructurales eficientes y resolver los complejos cálculos de resistencia de materiales, representa el punto de partida para la arquitectura textil contemporánea. Esto añadido a la utilización de membranas que podían soportar mayores tensiones de tracción, provocó la posibilidad de utilizar las membranas como material de construcción.



Fig. 7 Carpa de Circo en Elche

Obtenida en la Web:

<https://sendasyleyendas.com/2018/03/viaje->

En los últimos años del siglo XX y actualmente, la arquitectura textil continúa su desarrollo exponencial, gracias a la evolución de los programas informáticos, la innovación en nuevos materiales y el perfeccionamiento de las técnicas de ingeniería. Estas estructuras generan superficies innovadoras y rompedoras con ventajas como la flexibilidad de su diseño, la eficiencia estructural y energética y su gran atracción estética.

3. Geometría y Forma de las Membranas Tensadas.

Las Membranas tensadas ofrecen una gran variedad de formas esbeltas y de atractiva sencillez. Pero esta aparente simplicidad esconde un complejo equilibrio de tensiones que se deben tener en cuenta en el proceso de diseño, Frei Otto definió este proceso como Form Finding o búsqueda de la forma.

En él se determinan unos apoyos o restricciones a las moviidades de ciertos puntos de la membrana y una tensión inicial. De esta manera la membrana responde desplazándose, deformándose y obteniendo una disposición estable, en la que su superficie está sometida a una doble curvatura, configurándole de una homogeneidad de tensiones en su interior.

En función del signo de las curvaturas podemos tener dos tipos de estructuras tensadas, anticlasticas o gaussiana inversa y sinclasticas o gaussiana positiva.

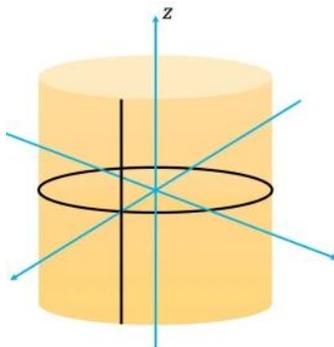


Fig. 8 Cilindro. Geometría de curvatura simple.

Obtenido en la web:

<https://temasdecalculo.com/2020/03/30/superficies-cilindricas->

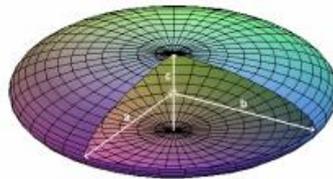


Fig. 10 Elipsoide. Geometría Sinclastica.

Obtenida en la web:

<https://www.preparadores.eu/secundaria/Matematicas/Matematicas-Tema.pdf>

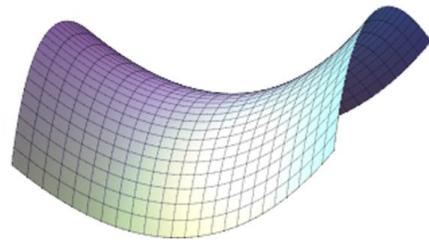


Fig. 9. Hiperboloide. Geometría anticlastica.

Obtenida en la Web:

<https://arquimed3s.com/noticias/>

Esta doble curvatura otorga a la membrana resistencia a cargas externas mediante la forma y no por la masa, por ello la eficiencia de estas estructuras es tan alta, se logran valores consistentes de rigidez para membranas textiles de espesor mínimo.

Estas formas geométricas que adapta la membrana son impuestas por las condiciones de borde que hemos introducido, como la pretensión, anclajes, cables, cumbreras, arcos y apoyos. Como método de estudio se utilizan pompas de jabón, debido al aumento de la tensión superficial que produce el jabón en la disolución, explorando diferentes geometrías. En función de las condiciones de diseño la lámina adoptara una forma u otra.

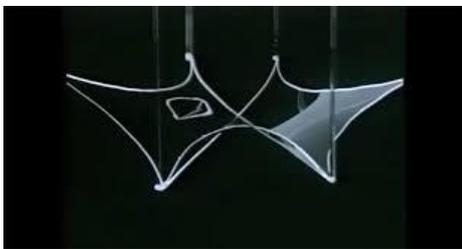


Fig. 12 Modelo de membranas de jabón estructuras de paraboloides hiperbólicos.

Obtenida en la web:

<http://www.etsididesign.com/disenos/arquitectura-burbujeante/>

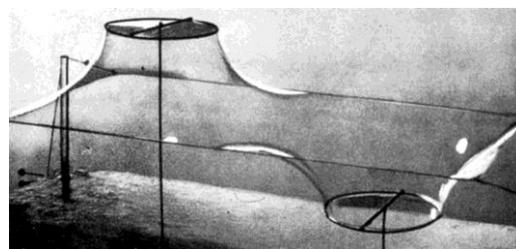


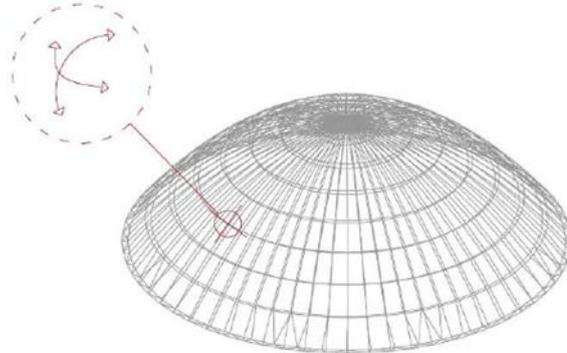
Fig. 11 Modelo de membranas de jabón de estructuras tronco conoides

Obtenida en la web:

<http://www.etsididesign.com/disenos/arquitectura-burbujeante/>

Forma Sinclastica

Las estructuras tensadas con forma sinclastica se corresponden a formas con una doble curvatura en la que los centros de la curvatura se encuentran en el mismo lado de la superficie, obteniéndose una forma cóncava observándola desde los centros.



*Fig. 13 Geometría sinclastica, cúpula esférica.
Obtenida: Tesis Doctoral, Fundamentos en la morfogénesis de las tenso estructuras, Beatriz Arnaiz Barrio.*

Este espacio cóncavo logra la estabilidad mediante una diferencia de presión entre el interior y el exterior, con el uso de un gas o un líquido. En función de la técnica empleada la estructura puede estar constituida por una capa de membrana estabilizada con una baja presión o mediante cojinetes hinchados, con dos o más capas, en las que se mantiene una mayor presión interior, liberando al espacio encerrado habitable de la sobrepresión.

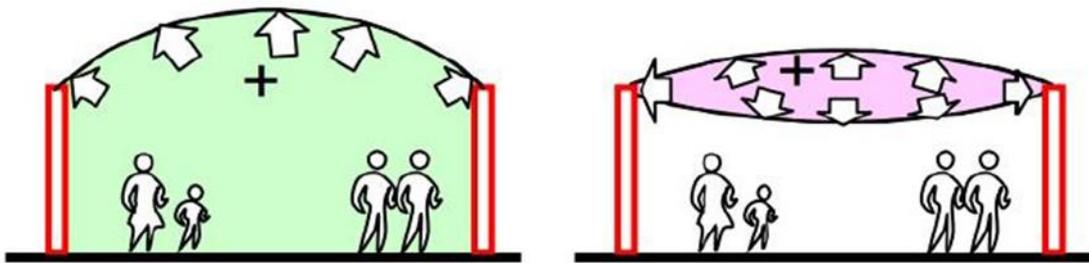
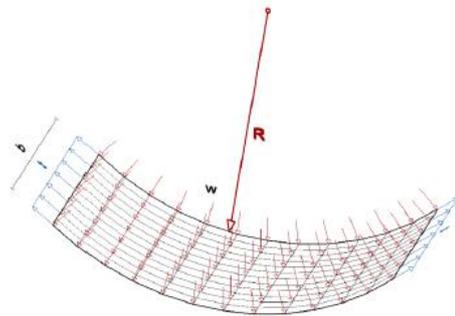


Fig. 14 Estructuras neumáticas. Izq., baja presión. Der. Alta presión.

Obtenida en: Trabajo fin de grado, Estudio sobre la arquitectura textil, Carlos Antona Molto.

La tensión que sufre la membrana produce su rigidez, esta es el producto de dos factores, la presión a la que está sometida y el radio de curvatura. Esta relación nos induce a que la forma óptima de la membrana ha de ser de gran curvatura, ya que para una misma pretensión en la membrana necesitaríamos menos presión interna del fluido. O en palabras de Xavier Gimferrer en su tesis doctoral "Análisis numérico de los efectos del pretensado sobre estructuras textiles laminares tensoestáticas": se puede establecer que la capacidad de resistir una fuerza perpendicular en un punto determinado de la superficie laminar es directamente proporcional a la fuerza de pretensado, e inversamente proporcional al radio de curvatura de la superficie en ese punto. $[w = t/R]$.



*Fig. 15 Relación de la tensión tangencial con el radio de curvatura y la presión interna.
Obtenida en: Tesis doctoral, Análisis numérico de los efectos del pretensado sobre estructuras textiles laminares tensoestáticas, Xavier Gimferrer.*

Dentro de las estructuras hinchadas, son mas comunes en las cuales la lamina no encierra el volumen total interior, sino que forma parte de un conjunto de elementos que conforman el espacio encerrado. Este tipo, esta formado por un marco rigido en el cual se apoyan los diferentes elementos hinchados, los cojinetes. Este marco soporta una combinacion de los anteriores de manera que se optimicen la forma de los cojinetes, pudiendo crear a su vez geometrias sinclasticas o anticlasticas.



Fig. 17 Geometria sinclastica formada por cojinetes. Cupula del Milenio, Valladolid.

Obtenida en la web:

<https://arquitectura.wordpress.com/2013/07/03/la-cupula-del-milenio-me-da-sed-y-cuanta-sed/>

Los cojinetes transmiten las fuerzas al marco de una forma amortiguada, debido a que por efecto de las posibilidad de deformabilidad de la membrana esta absorbe parte de los esfuerzos y se equilibra con la presion interna. Cada elemento cuenta con su propia bomba que regula la presion interna del cojinete.

En cuanto al mantenimiento de estas estructuras, es logico aceptar que la membrana exterior esta mas expuesta que las demas, es por ello que requiere su cambio mas habitualmente. Debido a que son elementos independientes entre si, su sustitucion y mantenimiento es mas sencilla.



Fig. 16 Geometria anticlastica formada por cojinetes. Khan shatyr, Astaná, Kazajistán.

Obtenida en la web:

<https://archello.com/fr/project/khan-shatyr-entertainment-centre>

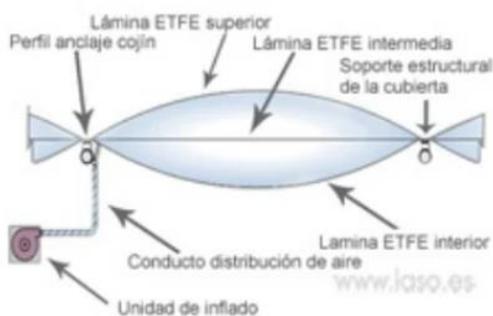


Fig. 18. Esquema del sistema de inflado de los cojinetes.

Obtenido en la web:

<https://es.slideshare.net/FerminBlanco/etfe>
e



Fig. 19 Sistema inflado en los cojinetes, Conductos de regulación de presión.

Obtenida en la web:

<http://www.arquitectil.net/material-etfe/>

I. Estadio Allianz Arena

El estadio Allianz Arena es uno de los edificios más característicos en el uso de estructuras envolventes a base de una estructura portante y cojinetes de ETFE. Esta conforma de manera continua la fachada y cubierta del edificio. La envolvente adopta una geometría de doble curvatura sinclástica.



Fig. 21 Vista exterior Allianz Arena.

Obtenida:

Fachadas textiles: Sistemas constructivos con láminas de etfe, Julio Viejo & Rodrigo Alvestegui.



Fig. 20 Junta entre Fachada y cubierta.

Obtenida:

Fachadas textiles: Sistemas constructivos con láminas de etfe, Julio Viejo & Rodrigo Alvestegui.

De forma especial a las estructuras comunes con cojines de ETFE, la estructura portante está separada de la estructura principal, debido a la envergadura del proyecto. Esta se une a las losas de hormigón mediante columnas y barras resorte que evitan la deformación de la envolvente. Aunque la envolvente parece estar formada por un único marco portante, en realidad, está dividida en dos, una para la cubierta y otra para la fachada, separadas por una canaleta como observamos en la fig. 20.

El edificio está separado en 8 secciones estructuralmente separadas desde los cimientos hasta la cubierta, pero se coordina la estructura de la envolvente para no perder la continuidad de la fachada. Mediante sistemas de retención de expansión y contracción en el interior de los cojinetes se evitan las dilataciones térmicas y con ellos pliegues en las láminas de ETFE.

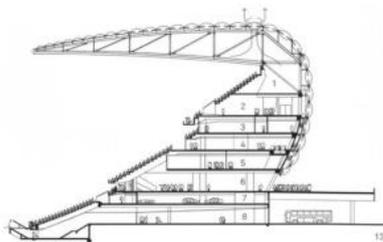


Fig. 22 Detalle Constructivo, envolvente de la cubierta y fachada.

Obtenida:

Fachadas textiles: Sistemas constructivos con láminas de etfe. Julio Viejo & Rodrigo Alvestegui.

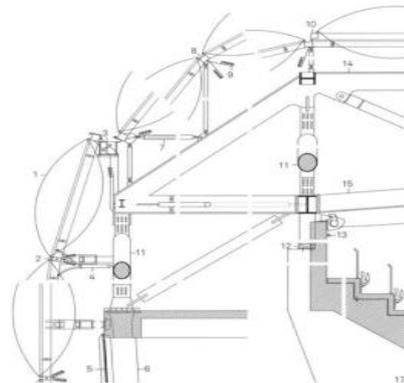


Fig. 23 Detalle constructivo de los cojinetes de ETFE.

Obtenida:

Fachadas textiles: Sistemas constructivos con láminas de etfe, Julio Viejo & Rodrigo Alvestegui.

Una de las cualidades de los cojinetes más aprovechadas en esta obra arquitectónica, es la luminosidad de estos elementos, en los que mediante la adición de leds a los cojinetes se logra la formación de diseños artísticos, que dan vida al estadio.

II. Khan Shadyr

Una combinación entre las dos geometrías de doble curvatura es el Khan Shadyr, en el que una combinación de cojinetes, en los que sus membranas se estabilizan mediante presión con una superficie sinclástica, da lugar a una superficie anticlástica en forma de conoide.



Fig. 24 Vista exterior Khan Shadyr, Kazajistan.

Obtenida en la web: <https://archello.com/fr/project/khan-shatyry-entertainment-centre>

Esta magnífica edificación, tiene una base elíptica, cuya diagonal mayor es de 200 m, a partir de ella tiene un mástil inclinado hacia el norte que alcanza una altura de 70m. Este mástil tiene una configuración de trípode, formado por barras en celosía. Sobre él se apoya una red metálica que desciende formando un conoide hasta la base elíptica. En ella se instalan los cojinetes de ETFE formados por 3 láminas.



Fig. 26 Base del Trípode, anclajes articulados en una dirección.

Obtenido en la web:

<https://archello.com/es/project/khan-shatyry-entertainment-centre>



Fig. 25 Union del trípode al anillo superior de la envolvente.

Obtenido en la web:

<https://archello.com/es/project/khan-shatyry-entertainment-centre>

El gran reto de esta obra, es el aislamiento térmico debido al gran rango de temperaturas que sufre esta ciudad, que abarca desde los -20°C hasta los $+35^{\circ}\text{C}$. El sistema, formado por un cojinete inflado de ETFE, y dos laminas alrededor de este, logran ampliar el coeficiente de resistencia térmica, y con la ventaja de la iluminación natural. Pero al no ser suficiente se deben añadir sistemas de calefacción y refrigeración, para mantener la temperatura entre 15 y 30°C . En invierno se deben emplear calefacción y control térmico, para evitar la formación de hielo en el interior de la envolvente. Al igual que en verano el uso de cambio de la refracción de la luz del ETFE, como la apertura de las ventanas del borde superior del conoide provocan la salida de las corrientes calientes.

Forma anticlastica

Las estructuras tensadas con forma anticlastica se caracterizan por tener una doble curvatura con sentidos opuestos en el que la suma de ambas es cero. De esta familia de geometrías hay 3 formas muy representativas como son, la velaría o paraboloides hiperbólico, el conoide y el paraboloides de revolución o sucesión de crestas y valles.

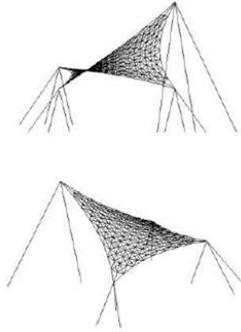


Fig. 29 Velaria o Paraboloides Hiperbólico.
Obtenida: Tesis Doctoral, Fundamentos en la morfogénesis de las tenso estructuras, Beatriz Arnaiz Barrio

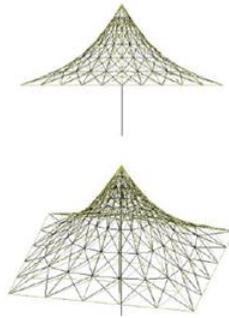


Fig. 27 Conoide
Obtenida: Tesis Doctoral, Fundamentos en la morfogénesis de las tenso estructuras, Beatriz Arnaiz

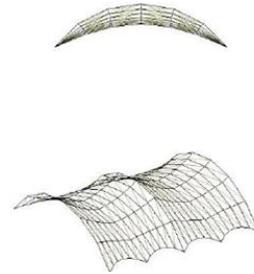


Fig. 28 Paraboloides de revolución
Obtenida: Tesis Doctoral, Fundamentos en la morfogénesis de las tenso estructuras, Beatriz Arnaiz Barrio.

La estabilidad de este tipo de estructuras viene dada por el hecho de que cada punto de la membrana esta atirantado por 4 vectores que no actúan en un mismo plano. Para explicar este concepto debemos partir de la base y estudiar la estabilidad de un punto de un cable.

Si un cable lo anclamos solo por un extremo este quedará libre y el punto en cuestión responderá a los esfuerzos aplicados con los desplazamientos correspondientes. Si lo anclamos a una pared vertical, este caerá y quedará colgando del anclaje con la misma inclinación que la pared.

Este mismo cable lo anclamos a dos paredes enfrentadas, debido a la gravedad quedara flectado, tomando una forma de catenaria, ya que no tiene ninguna resistencia a cortante, como podemos observar en la figura 31. Esta ausencia de resistencia a cortante le posiciona en una situación de inestabilidad ante cualquier carga aplicada transversalmente a él. Un punto arbitrario del cable solo puede responder a las cargas desplazándose, vibrando o deformándose. De manera hipotética solo con una tensión infinita podríamos lograr la estabilidad del cable con esta configuración.



Fig. 31 Cable horizontal flectado
Obtenido: Artículo La arquitectura textil, Juan Moio Carrio

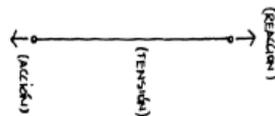


Fig. 30 Cable infinitamente tensado
Obtenido: Artículo La arquitectura textil, Juan Mojo Carrio

El siguiente paso será añadir otro cable que se una al anterior en el punto en cuestión y tenga un anclaje en un punto distinto. Debido a que estamos trabajando con elementos que solo pueden trabajar a tracción, los tres cables se alinearán en un mismo plano y seguirán siendo sensibles a cargas en cualquier dirección fuera de este.

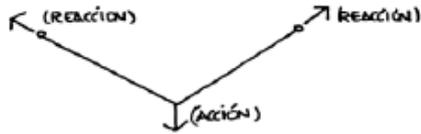


Fig. 33 Punto estabilizado por 3 cables.

Obtenido:

Artículo La arquitectura textil, Juan Mojo

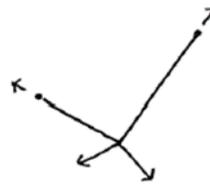


Fig. 32 Punto estabilizado por 4 cables.

Obtenido:

Artículo La arquitectura textil, Juan Mojo

De modo que se necesitara un cuarto cable unido al punto de encuentro, en una dirección que no se encuentre en el plano creado por los tres anclajes anteriores. De esta manera, el punto en el que coinciden los 4 cables tendrá un estado estable, en el que sus desplazamientos se corresponderán con las elongaciones de los cables.

Si ahora extendemos este razonamiento a lo largo de los puntos de un cable, obtenemos una familia de cables estabilizadores. Al aumentar los cables estabilizados obtenemos una malla en la que la rigidez de la superficie viene dada por la forma y dirección de su entramado.



Fig. 34 Cable y familia de cables estabilizadores.

Obtenido:

Artículo La arquitectura textil, Juan Mojo Carrio

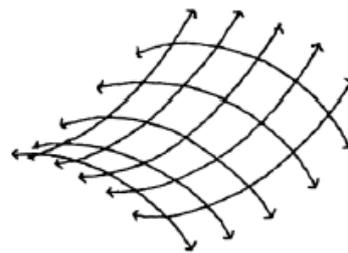


Fig. 35 Entramado de cables estabilizados.

Obtenido:

Artículo La arquitectura textil, Juan Mojo Carrio

Con este razonamiento hemos logrado explicar cómo gracias a la pretensión en diferentes direcciones de la membrana, se logra la estabilización de esta y la respuesta moderada ante cargas aplicadas en direcciones perpendiculares a la superficie. Debido a la pretensión la forma final que adapta la membrana presenta de forma muy definida las líneas de tensión.

Además, la elección de la pretensión a la que estará sometida y los tirantes adicionales, depende de la carga que soportará, tanto positivas como negativas, para que la membrana mantenga la forma calculada, ya que, si esta pierde sus dimensiones de forma exagerada, sus esfuerzos calculados no serán correspondidos con los que experimenta.

I. La estación intermodal de las palmas:

La estación intermodal de las palmas se encuentra por motivos de comodidad en el interior de un edificio subterráneo, los usuarios entran por la cubierta superior al interior y está esta cobijada por una tensoestructura.



Fig. 36 Cubierta ligera en la estación intermodal de las palmas.

Obtenida en la Web:

<https://www.iasoglobal.com/es-ES/proyecto/intercambiador-modal>

La membrana de composición de PES y PVC, modelo Flexlighth 1302 S2, distribuida por Serge Ferrari, es una membrana de alta resistencia y durabilidad. Esta adopta una forma de paraboloides hiperbólicos, está anclada a 6 puntos conectados al suelo por 8 mástiles tubulares de acero. Estos con el objetivo de reducir los esfuerzos cortantes y flectores se fijan mediante anclajes articulados. Con lo que se pretende que los mástiles busquen la inclinación adecuada.



Fig. 37 Detalle constructivo del apoyo de uno de los mástiles.

Obtenida en la Web:

<https://www.iasoglobal.com/es-ES/proyecto/intercambiador-modal>

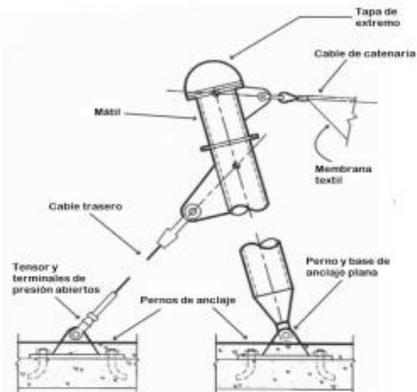


Fig. 38 Esquema del equilibrio de los mástiles.

Obtenida en:

Artículo: Tensoestructuras de cubierta,
Ezrael Pedroza

Entre los tirantes de los mástiles y la pretensión de la membrana se logra una inclinación estable de los mástiles, pero para controlar los 4 más altos, de 28 metros de altura, se unen por un tirante.

II. Laboratorio de investigación M&G Ricerche

Una de las obras arquitectónicas más representativas de las tenso-estructuras con forma de arco y valle es el laboratorio científico M&G RICERCHE, en Vinafro, Italia.



Fig. 39 Vista exterior del Edificio M&G Ricerche
Obtenida en la web:

<https://samynandpartners.com/portfolio/222-mg-ricerche/>

La estructura consta de 6 arcos de celosía metálica, dispuestos de manera simétrica, uniendo los arcos mediante una membrana obtenemos la forma de una geometría ovalada, que alcanza los 15 metros de altura y cubre una superficie de 85mx32.

Estos arcos están unidos a parte de por la membrana por tirantes a modo de arriostramiento, y obtienen la forma de catenaria que observamos en el perfil del siguiente boceto. Sobre estos y solapados a los arcos se dispone una membrana de alta resistencia de PVC. Debido a la pretensión la membrana desarrolla su doble curvatura entre los arcos. En el que en una dirección siguen la curvatura de los cables y en la ortogonal la de los arcos

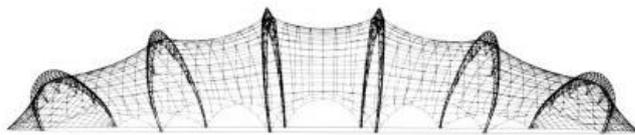


Fig. 41 Boceto del perfil del edificio.
Obtenida en la web:

<https://samynandpartners.com/portfolio/222-mg-ricerche/>

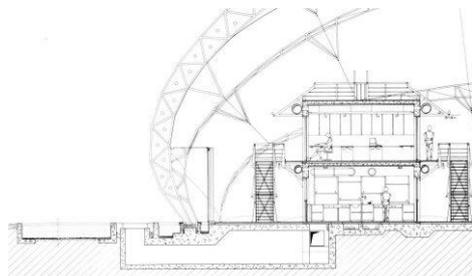


Fig. 40 Esquema de los apoyos de los arcos
Obtenida en la web:

<https://samynandpartners.com/portfo>

Los apoyos de los arcos son empotrados, de modo que no permiten ningún desplazamiento o giro de los arcos, es por los grandes esfuerzos que se transmiten de la membrana a los arcos, que estos arcos deben ser de celosía y con un apoyo en la losa de cimentación diseñada para 20 KN/m² de carga viva.

III. Centro de Innovación Skysong

La estructura de membrana Skysong es una de las obras más representativas en la utilización de la geometría de conoide como superficie anticlastica.



Fig. 42 Vista frontal de la cubierta del centro de innovación Skysong

Obtenida en la web:

<https://www.archiexpo.es/prod/fabritec-structures/product-151879-1749375.html>

Esta estructura consta de 8 mástiles de acero, alrededor de ellos y formando un aro, la membrana desarrolla geometrías de conoide con la orientación invertida de forma intercalada. La membrana se divide en 4 secciones, en cada una el material textil forma dos geometrías de conoide, cada una con una orientación.

La unión entre estas secciones se consigue mediante 4 cerchas arqueadas de barras de acero en celosía. Estas cerchas se hayan suspendidas en el aire por los tensores y la membrana, flotando como un sistema de tensegrity, en el que elementos comprimidos se encuentran en una red de elementos tensados. De igual manera la tela se une a los mástiles mediante unos aros de acero concéntricos a los mástiles suspendidos por los tirantes. La utilización de sistemas tensegrity es muy común en obras de estructuras tensadas de formas cónicas, debido a que se evitan puntos de apoyo.



Fig. 43 Vista superior de la tensoEstructura

Obtenida en la web:

<https://www.iaacblog.com/programs/animated-systems-skysong-asu-campus/>

Debido a las dimensiones tan impresionantes de la obra, 40 metros de altura y una superficie de casi 5000 m², es necesario emplear una membrana de teflón de alta resistencia, capaz de soportar cargas de diseño de 40Kg/m².

03. Materiales empleados en la arquitectura textil

1. Introducción

En este capítulo se van a estudiar los materiales utilizados en las diferentes estructuras tensadas. Estos pueden ser medios continuos, como membranas o placas, o redes metálicas o textiles. Sin embargo, las primeras son más comunes, por ello, el capítulo se centra en su estudio y clasificación. Se van a analizar desde un aspecto diferenciador clave, el conformado de estas y su forma de producción, las membranas utilizadas se pueden dividir en dos grandes familias, unas elaboradas a partir de una base de tejido y otras mediante extrusión de una laminada.



*Fig. 45 Pergola Frente Fluvial, Expo Zaragoza.
Obtenida en la web:
<http://www.arquitectil.net/portfolio/pergolas-frente-fluvial/>*



*Fig. 44 Tenso-estructura en el parque botánico de Huesca.
Obtenida en la web:
<https://www.iasoglobal.com/es-ES/proyecto/parque-botanico>*

Los grandes avances que se han dado en esta tecnología de construcción, se deben en gran parte al gran desarrollo de materiales que hemos sufrido en los últimos 150 años. A partir de la revolución textil y su metodología más eficiente de producir tejidos, y a los materiales sintéticos derivados del petróleo se ha logrado producir membranas de alta resistencia y duración.

En general ambos tipos de membranas tienen unas características similares, como es la elasticidad no lineal, la escasa rigidez en una dirección respecto a las otras dos y sus propiedades ópticas.

Dentro de los materiales, los más utilizados son los derivados del petróleo, el PES (poliestireno), la Fibra de Vidrio, las siliconas, el PTFE (politetrafluoretileno), el PVC (policloruro de vinilo), el ETFE (Etileno-TetraFluoroEtileno) y son estos los que estudiaremos, siendo los primeros empleados como base tejida y recubrimiento de la membrana, y el último empleado como lamina de extrusión.

2. Membranas con base de Tejidos

Tipos de Fibras

Según el origen del material podemos agruparlas en fibras naturales como el algodón o sintéticas, estas son las más comunes y más utilizadas debido a su alta capacidad de resistencia a tracción y durabilidad. Los aspectos claves de las fibras, es su resistencia a tracción, su resistencia frente la humedad y a agentes corrosivos.

Fibras de algodón: Único material natural usado en la arquitectura textil, empleado por Frei Otto en sus primeros trabajos. Los problemas de este material es el hecho de ser orgánico, que lo hace vulnerable a los hongos y la humedad, acelerando su deterioro. Tiene una vida útil aproximada de 4 años. Además, su límite de tensión de rotura es menor que los siguientes materiales estudiados y tiende a la contracción tras la interacción con el agua. En contra posición es relativamente barato y puede flexionarse repetidas veces sin que aparezca agrietamiento. Útil en proyectos de pequeña escala y duración.

Nylon: Material sintético derivado del petróleo utilizado en los inicios de las tenso-estructuras. Tiene una mala respuesta ante la humedad que le hace perder propiedades mecánicas, pero se puede evitar con recubrimientos adecuados, su mala resistencia a los rayos UV también lo aparta del uso general en la arquitectura Textil.

Poliéster: Material más utilizado junto con la fibra de vidrio. Este material derivado del petróleo tiene un alto valor de tenacidad y elasticidad. Debido a su pobre pigmentación es sensible a la luz UV, provocando su envejecimiento y una pérdida de propiedades mecánicas. Con la adición de un recubrimiento de PVC, se logra que este absorba los rayos UV, dotando al poliéster una mayor duración.



Fig. 46 Algodón hilado
Obtenido en:

https://es.123rf.com/photo_32869436_rollos-de-algod%C3%B3n-hilado-en-una-f%C3%A1brica-textil.html



Fig. 48 PES a través de un microscopio
Obtenido en:

<https://es.dreamstime.com/fibras-largas-de-poli%C3%A9ster-tela-image191649932>



Fig. 47 Fibra de vidrio
Obtenido en:

<http://cmcmotilla34.blogspot.com/2010/06/fibra-de-vidrio.html>

Fibra de vidrio: Material producido a partir de materia mineral como la sílice, cal y alúmina. Su conformado se produce mediante el fundido y extrusión, lo que produce tensiones internas dentro del filamento. Presenta una alta resistencia a la tracción, pero sigue teniendo una rotura frágil para estos usos, por lo que su producción debe ser muy precisa. El envejecimiento no ejerce prácticamente ninguna influencia en el material, dando lugar a una extensa vida útil de la estructura. Para protegerlo de las condiciones atmosféricas y la humedad se le recubre con PTFE.

Métodos de entrelazado de tejidos

Debido a que las fibras son demasiado finas para usarlas de elemento estructural se deben realizar unos procesos de entrelazado y tejido para obtener las membranas que se utilizan como base.

Las fibras se pueden entrelazar de forma paralela para obtener un hilo en el que la rigidez de este será la suma de las rigideces de las fibras que lo componen. Sin embargo, si retorremos las fibras entre si los hilos producidos serán más compactos, pero perderán rigidez debido a los esfuerzos flectores que sufren ante cargas axiales.

Una vez obtenido los hilos se procede al tejido de la membrana, que consiste en entrelazar dos grupos de hilos, llamados urdimbre y trama, para obtener una base de tejido. Se pueden realizar diferentes patrones de entrelazado.

Los principales son los tejidos simples, dobles o de Panama, planos o superpuestos y de sarga. Los tejidos simples y dobles tienen una mayor adherencia mecánica, pero frente a los tejidos superpuestos se aprecia una menor resistencia frente al desgarre y a la tensión



Fig. 49 Entrelazado simple

Obtenido en la WEB:

http://www.revistatoldo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=364:materiales-para-estructuras-de-membrana&catid=10&Itemid=178

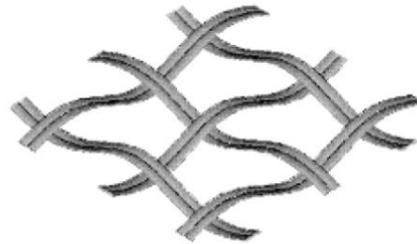


Fig. 50 Entrelazado doble o Panama

Obtenido en la WEB:

http://www.revistatoldo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=364:materiales-para-estructuras-de-membrana&catid=10&Itemid=178

El problema de los tejidos planos es que hay poca colaboración entre los hilos de urdimbre y trama, obteniéndose deformaciones en estas direcciones. Los tejidos en forma de sarga posicionan los hilos de urdimbre a 45° de los de la trama, con lo que logran una mayor adaptabilidad de la malla a las superficies curvas.

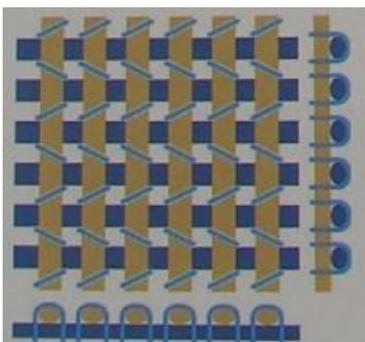


Fig. 52 Tejido Superpuesto

Obtenido en la WEB:

<https://veredes.es/blog/tectonica-36-arquitectura-textil/>

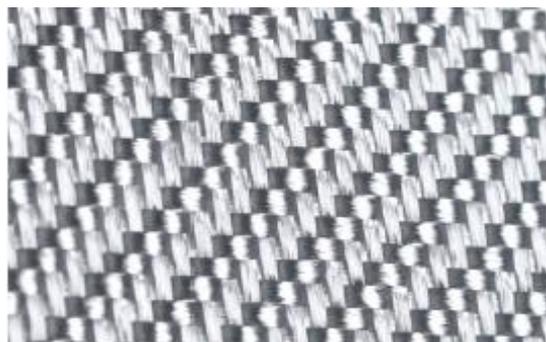


Fig. 51 Tejido de fibra de vidrio en sarga

Obtenido en la WEB:

<https://www.rockwestcomposites.com/>

Características y Propiedades

I. Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de las membranas con base de tejidos vienen condicionadas por el material de las fibras y la manera de hilado y entrelazado. Por ejemplo, la resistencia a tracción viene dada por unidad de anchura de tejido, pues son todos los hilos de la sección los que responden a la carga. Además, también dependen de la forma en la que se realiza el entrelazado de los hilos. A diferencia de la isotropía de los materiales convencionales como el acero o el hormigón, los materiales de la arquitectura textil presentan un comportamiento diferente según la dirección de estudio, teniendo dos direcciones principales, urdimbre y trama, por lo que se debe tener en cuenta en el análisis estructural la respuesta en la dirección de la trama, según la dirección de urdimbre, el alargamiento transversal y la deformación angular.

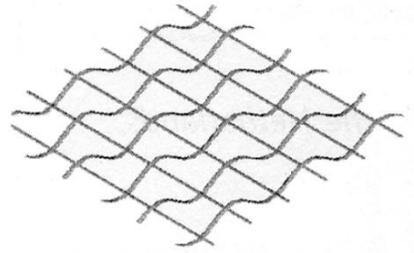


Fig. 53 Diferencia en la disposición de los hilos.

Obtenida en la WEB:

http://www.revistatoldo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=364:materiales-para-estructuras-de-membrana&catid=10&Itemid=178

Esta diferencia entre las resistencias a tensión en las direcciones del plano se debe, a la flexión que sufre la trama al enlazarse con la urdimbre, llamado “salto de trama”. Este comportamiento anisótropo se puede reducir con el pretensado de la trama en el proceso de tejido. Dependiendo del ensayo de tracción en cada dirección de la membrana se obtienen diferentes curvas de tensión-deformación.

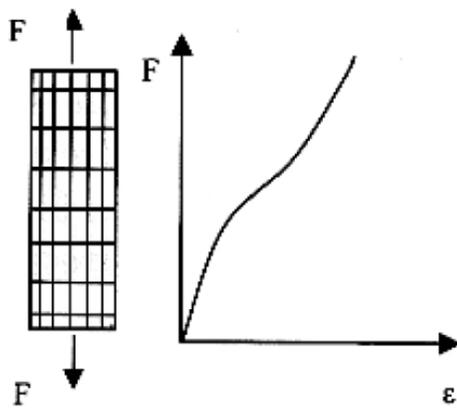


Fig. 55 Ensayo de tracción de la trama

Obtenida en la WEB:

http://www.revistatoldo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=364:materiales-para-estructuras-de-membrana&catid=10&Itemid=178

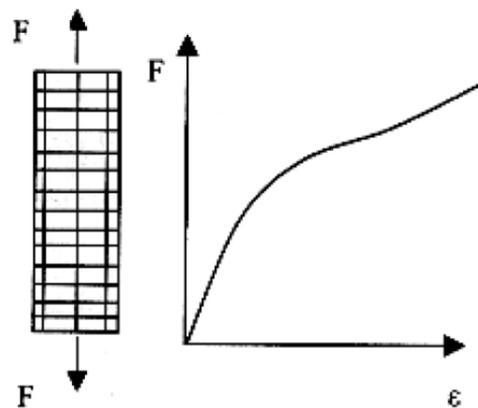


Fig. 54 Ensayo de tracción de la urdimbre

Obtenida en la WEB:

http://www.revistatoldo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=364:materiales-para-estructuras-de-membrana&catid=10&Itemid=178

Los tejidos superpuestos no tienen estos problemas debido a que los hilos no están enlazados entre ellos. Pero tiene una menor resistencia en acciones fuera de estas direcciones debido a la poca colaboración de las familias de hilos, se busca ampliarla mediante un cosido adicional.

Otra cualidad especial de estos materiales y muy frecuente en los derivados del petróleo, es la forma no lineal de la deformación como respuesta a la tensión, es decir la no linealidad de su deformación.

Cada material es único pero se pueden agrupar mediante su parecido en las forma de respuesta, la respuesta depende también depende del rango de tensiones aplicadas. En el ejemplo siguiente observamos la curva de tensión-deformación de un material no lineal, en el podemos observar tres fases, la primera los hilos que suelen estar un poco curvados se alinean en la dirección de la carga, una vez alcanzada su máxima longitud sin deformar, pueden absorber energía mediante la deformación, en esta fase la curva sigue aparentemente una recta. Por último, en la tercera fase se alcanza el máximo valor de tensión y se empiezan a romper fibras, de forma que hay un decrecimiento de la tensión aplicada.

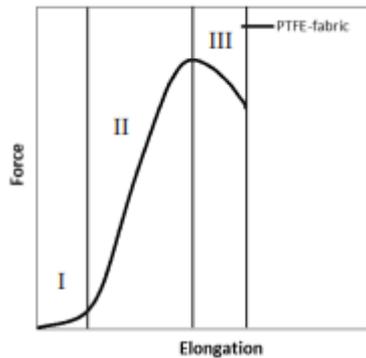


Fig. 57 Curva tensión/deformación no lineal
Obtenido en: Strain-rate dependent tensile strengths of PTFE-fabrics by using the Strip Method



Fig. 56 Ensayo uniaxial de tracción
Obtenido: Strain-rate dependent tensile strengths of PTFE-fabrics by using the Strip Method

El último aspecto es la no elasticidad de estos materiales, esto significa que el material no recupera las dimensiones anteriores a la aplicación de la carga, al retirar esta misma. Lo que conlleva una diferencia entre las curvas de carga y descarga en las gráficas de tensión deformación. Una parte de la deformación del material es plástica, es decir que no se recuperara tras la retirada de la carga, mientras que otra es elástica, de forma que el material sufrirá una reducción de sus dimensiones tras el ensayo. Esto se observa en la figura de la derecha en la que al principio se carga la trama y la urdimbre 1:1, después 2:1 y vuelve a 1:1 y se observa como las curvas se desplazan a la derecha, es decir a mayores deformaciones

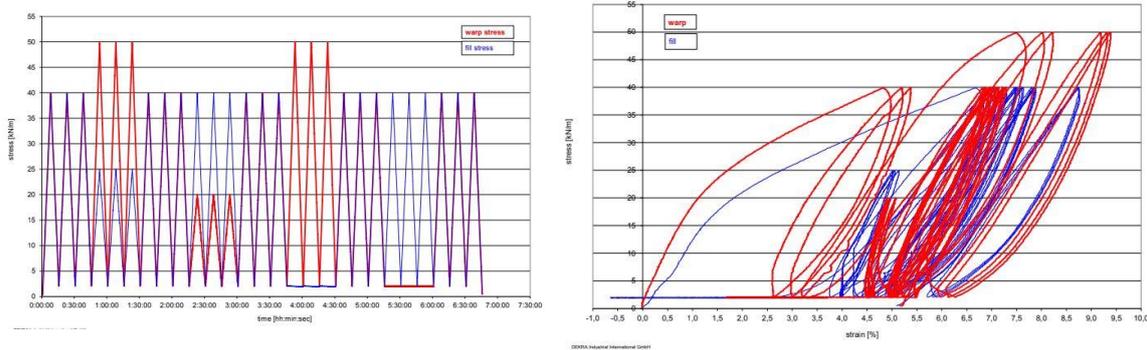


Fig. 58 Curvas representativas del ensayo de carga cíclica de tracción de la membrana flexlign 1502S2.
Proporcionada por la empresa Serge Ferrari.

II. Aislamiento térmico:

Los tejidos como material de construcción no presentan grandes coeficientes de resistividad térmica debido a su poco peso y espesor, por ello se deben utilizar otras técnicas de aislamiento para mantener temperaturas interiores admisibles.

Estas estructuras al encerrar grandes volúmenes de aire crean gradientes de temperatura mayores que las construcciones convencionales. Debido a este gradiente térmico se producen corrientes de convección que dificultan la predicción de las condiciones térmicas en el interior.

Debido a la baja masa térmica de las telas, el control de la trasmisión térmica se focaliza en los fenómenos de convección y radiación. Mediante el empleo de una ventilación adecuada se logran diferentes grados de convección que ayudan al control de la temperatura interior, estos métodos se reducen al efecto invernadero dentro del espacio encerrados o al efecto sombrilla.

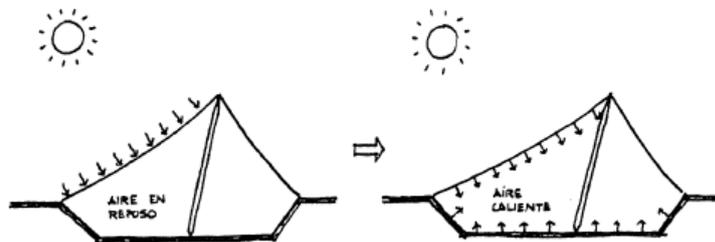


Fig. 59 Efecto invernadero como forma de evitar la pérdida de calor.
Obtenido en: Artículo: La arquitectura textil, Juan Mojo Carrio

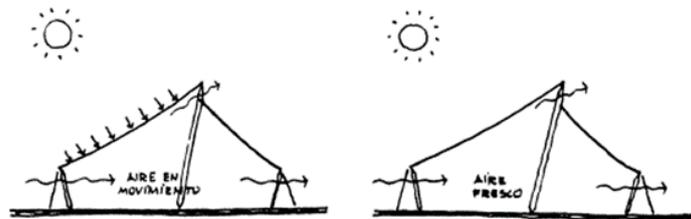


Fig. 60 Efecto sombrilla como forma de ventilación.
Obtenido en: Artículo: La arquitectura textil, Juan Mojo Carrio

El control de la transferencia por radiación depende de las propiedades térmicas y lumínicas de la tela. En edificación se suele definir estas transferencias con el coeficiente U, de transmitancia térmica.

La forma más utilizada para lograr mayor resistividad térmica es utilizar varias hojas o membranas de material, dejando una cámara de aire en medio.

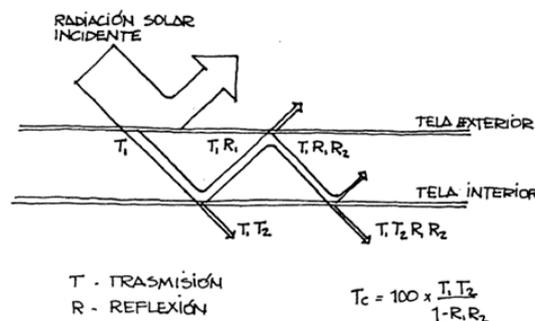


Fig. 61 Transmisión de calor mediante radiación en un sistema de doble capa.
Obtenido en: Artículo: La arquitectura textil, Juan Mojo Carrio

De esta forma se logra disminuir la transmisión térmica, al utilizar el aire como aislante y eliminar el flujo por conducción. El coeficiente de transmisión térmica puede ser un 40% menor en las membranas de dos capas respecto a las simples.

III. Aislamiento acústico:

A diferencia de los métodos tradicionales de construcción, este tipo de arquitectura ligera, no puede emplear la masa como elemento amortiguador del sonido.

El método más eficaz de evitar la contaminación acústica y mejorar la acústica en el interior, eliminando reverberaciones y ecos, es mediante la variación del material base y acabado de la tela. Buscando membranas con rugosidades o micro porosidades que rompan las refracciones del sonido, transformando algunas de las ondas en calor como energía disipada.

Como el material de la imagen, un tejido de Poliéster de alta resistencia, recubierto por PVC y con un acabado que permite la absorción de la reflexión del sonido, formado por PVDF y dióxido de titanio.

En grandes espacios encerrados, el aire hace una contribución a la mitigación de las ondas sonoras, mejorando la calidad acústica en el interior.

Si es posible su utilización, al igual que en el aislamiento térmico, el uso de membranas de doble hoja, o la instalación de varias membranas separadas por una cámara de aire, aumenta el aislamiento acústico con el exterior.

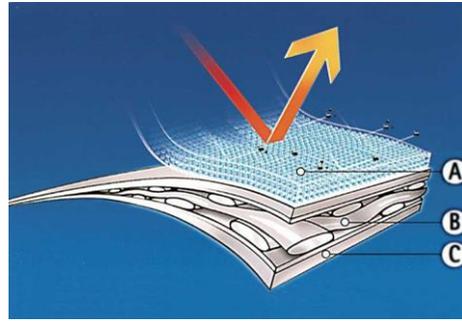


Fig. 62 Membrana aislante termo-acústica.

Obtenida en:

<https://tectonica.archi/materials/membrana-de-pvc-con-aislamiento-termo-acustico/>

IV. Luminosidad

La luminosidad de las estructuras tensadas es una de las cualidades más aprovechables, su gran variedad de grados de translucidez permite crear ambientes más atractivos. Las membranas pueden lograr una transmisión lumínica hasta del 90%, a la vez que se pueden obtener la opacidad completa si fuese requerido.

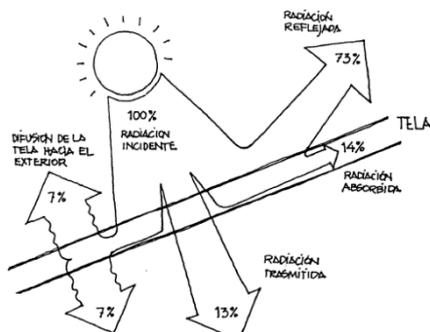


Fig. 63 Incidencia de la radiación solar en una membrana.

Obtenida en: Artículo: La arquitectura textil, Juan Mojo Carrio.

La iluminación natural del ambiente interior a través de las membranas tiene varios beneficios, la difusión de la radiación solar en la tela genera una dispersión de la luz en la tela, de forma que se obtiene un foco extenso y homogéneo de luz natural, que no deslumbran a los usuarios en su interior. De igual manera, algunas telas permiten la transmisión de los rayos UV-A esenciales para el desarrollo de plantas y vegetales, a la vez que se bloquean rayos UV-C y UV-B dañinos.

Con esta iluminación difusa se evita el deslumbramiento de los usuarios, pero puede provocar una sensación de falta de iluminación. Esto se debe al bajo nivel de contraste de la luz, debido por la ausencia de focos puntuales que generen sombras.

Cabe mencionar la gran variedad de posibilidades estéticas en el diseño mediante la utilización de la luz natural, variando la opacidad de la membrana, convirtiendo la estructura en una escultura de luz.

V. Durabilidad

El tiempo es uno de los agentes más degradantes para cualquier material de construcción, sobre todo si está expuesto al exterior. Por lo tanto, el estudio engloba como afecta el tiempo, la temperatura, la humedad y la radiación solar a las propiedades mecánicas de las membranas.

Un efecto importante es la pérdida de resistencia del tejido y su alargamiento ante las cargas permanentes, el poliéster puede llegar a disminuir su resistencia un 20% en las 110 primeras semanas de exposición, para posteriormente mantenerse en un valor constante, y el nailon hasta el 90% de su resistencia.

Por lo general cuando aumenta la temperatura la resistencia a tracción disminuye, incrementándose la capacidad de deformación. Y ocurre lo contrario cuando disminuye la temperatura. Sin embargo, los fabricantes aseguran que no hay una variación sensible de temperatura entre los -25° y los 70° .

Sin embargo, la humedad produce en nylon una gran pérdida de resistencia. Además, con ella pueden aparecer efectos de congelación y descongelación produciendo roturas frágiles y pérdida de propiedades.

Por otro lado, la exposición a la radiación solar produce la aceleración del deterioro del poliéster y el nylon de forma acelerada. A diferencia de estos, la fibra de vidrio resiste muy bien ante estos agentes adversos.

Con un recubrimiento adecuado para combatir los agentes externos y los acabados necesarios podemos mitigar los efectos de la radiación, evitar la infiltración de humedad en el material base y reducir la incrustación de la suciedad.

VI. Sostenibilidad

Los materiales utilizados como membranas para las estructuras tensadas no se pueden considerar sostenibles, ya que son productos sintéticos derivados del petróleo, a excepción de las fibras de algodón.

Sin embargo, dependiendo de la procedencia de la materia prima, podemos observar un mayor aprovechamiento de los recursos. Son pocos los productores de membranas que optan por el reciclaje y reutilización de las membranas, debido al aumento de costes que conlleva.



Fig. 64 Proceso de reciclaje Polyloop
Obtenido en: <https://www.sevgeferrari.com/es/es/entrevista-de-romain-ferrari-polyloop>

Pero la empresa Mehler Tex-nologies, lleva a cabo un proceso de reciclaje de las membranas de Poliestireno recubiertas de PVC, llamado Eco-Care. De igual manera la empresa Serge Ferrari ha desarrollado el proceso Polyloop para el reciclado de membranas.

Estos procesos consisten en triturar las membranas para después añadir un agente disolvente que separa el PVC del poliestireno, esta separación se realiza en un ciclo cerrado de forma que el disolvente se recupera para los siguientes ciclos.

El hecho de reciclaje de los materiales derivados del petróleo conlleva una gran reducción de la huella ambiental que dejan las estructuras de membrana. Ya que los procesos de producción y desechado son los más contaminantes.

Pero en las demás etapas de la vida útil de la membrana, su impacto ecológico es bastante bajo, debido a su poco peso, los costes de transporte se reducen. Además, su ligereza también influye en la eficacia de la estructura, con la que se logran cerrar amplias luces a un bajo coste de material. Por otro lado, la sencillez de su estructura reduce los costes de montaje y mantenimiento. En general los costes

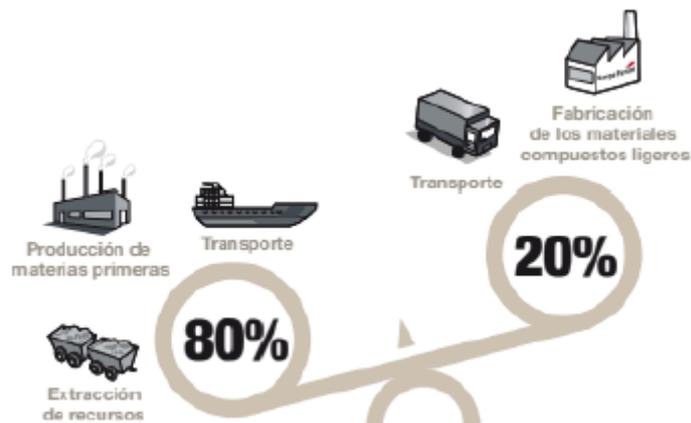


Fig. 65 distribución del impacto ambiental
Obtenida en: <https://www.sergeferrari.com/es/es/entrevista-de-romain-ferrari-polyloop>

energéticos de las estructuras de membrana durante su uso son bajos.

Membranas más utilizadas

I. *Poliéster recubierto de PVC*

Uno de los productos comerciales más utilizados, tiene como tejido base hilos compuestos por fibras de Poliéster. Esto es debido al gran rango de resistencias que se pueden obtener de sus membranas, su buena resistencia a las condiciones meteorológicas adversas y el coste económico, que lo hacen adquirible para gran variedad de proyectos.

Antes de proceder al tejido, para mejorar la compatibilidad del poliéster con la resina empleada en el recubrimiento, se le realiza un tratamiento de ensimaje. Este consiste en la aplicación de aceites y estabilizantes a los hilos, además se añade un componente hidrofóbico, disminuyendo la difusión de la humedad al interior del tejido. Al producto obtenido se llama Low-wick, en el que se ha reducido sensiblemente la capilaridad del tejido, protegiéndolo contra la infiltración de agua y hongos al interior del tejido.



Fig. 67 Tejido Con tratamiento de Low-wick
Obtenido en:
<https://sioen.orli.com/movillpropiedades.html>



Fig. 66 Tejido sin tratamiento Low-wick
Obtenido en:
<https://sioen.orli.com/movillpropiedades.html>

El recubrimiento le aporta uniformidad al tejido, el material de recubrimiento se introduce en las uniones entre hilos, uniéndose a ellos por termo-soldadura, de forma que se obtiene un comportamiento más homogéneo del tejido.

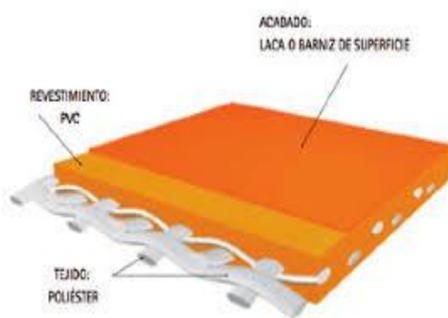


Fig. 68 Esquema membrana PES+PVC
Obtenido en: https://pro-tectonica-s3.s3.eu-west-1.amazonaws.com/art36pdf_1554137158.pdf

El recubrimiento está compuesto por resinas de PVC con emulsionantes, plastificantes, aditivos colorantes, estabilizadores, retardadores para la inflamabilidad y fungicidas. Estos componentes definen las propiedades reológicas de la mezcla y las propiedades químicas y térmicas de la membrana.

Los emulsionantes sirven para facilitar la mezcla de la resina con los demás componentes. Los plastificantes como ftalatos, fosfatos, parafinas cloradas u otros éteres porque aportan gran capacidad plastificante, buena resistencia frente al fuego, pero son susceptibles a los ataques biológicos, ya que sirven como alimento para bacterias y hongos, por lo que se añaden fungicidas.

Como aditivos, tenemos los colorantes que modifican el cromatismo y estética de la superficie, variando la transmitancia óptica al igual que ayudan a proteger la membrana de la incidencia de los rayos UV.

El acabado se realiza para obtener una barrera contra los agentes atmosféricos, permitiendo un buen deslizamiento, de tal forma que las partículas de suciedad no se queden en la membrana.

En membranas de poliéster recubiertas de PVC, normalmente se aplica un acabado lacado a base de acrílicos en las dos caras. También es común la aplicación de PVDF en la cara exterior (la más expuesta) y acrílicos en la cara interior. Otro acabado, aunque no tan habitual, son las películas de PVF (fluoruro de polivinilo). Estos últimos presentan una mayor protección a los rayos UV.

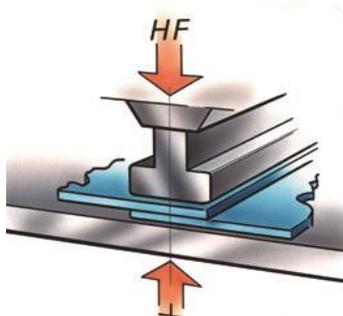


Fig. 69 Soldadura de dos membranas

Obtenida en:

<http://www.arquitextil.net/mater>

Es difícil dar un valor para las propiedades físicas de las membranas porque dependen mucho del tamaño de los hilos y del tipo de entramado. Una gama de membranas del fabricante mehler technologies, Valmex mehatop, nos proporciona los datos técnicos para diferentes espesores y tejidos.

VALMEX®			FR 700 Type I	FR 900 Type II	FR 1000 Type III	FR 1400 Type IV	FR 1600 Type V
Product No.			7205 5256	7211 5256	7269 5256	7270 5256	7274 5256
	Measurement methods/ Classifications	Unit					
Material composition							
Finish	Nanopolymerized fluorinated lacquer system on both sides, protected against microbial and fungal attack, UV-protected, Titaniumdioxide (TiO ₂) front side primer						
Base fabric	DIN ISO 2076		Polyester Plain Weave L1/1	Polyester Panama Weave P 2/2	Polyester Panama Weave P 2/2	Polyester Panama Weave P 3/3	Polyester Panama Weave P 3/4
Yarn count	DIN ISO 2060	dtex	1100	1100	1670	1670	2200
Low-wick yarn treatment	Methylen blue liquid method	mm	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Total weight	EN ISO 2286-2	g/m ²	700	900	1050	1350	1550
Fabric thickness		mm	0.6	0.8	0.9	1.1	1.3
OMD ratio (Front:Back)			3:2	3:2	3:2	3:2	3:2
Mechanical properties							
Tensile strength (warp/weft)	DIN EN ISO 1421/V1	N/50 mm	3000 / 3000	4300 / 4200	6000 / 5500	8000 / 7000	10000 / 9000
Elongation at break (warp/weft)	DIN EN ISO 1421/V1	%	22 / 30	23 / 29	24 / 32	24 / 33	27 / 29
Tear strength (warp/weft)	DIN 53363	N	300 / 300	500 / 500	900 / 800	1200 / 1200	2000 / 2000
Adhesion	PA 09.03	N/cm	20	25	25	26	30
Crack resistance	DIN 53359 A	No. of folding	100,000 T - no cracks	100,000 T - no cracks	100,000 T - no cracks	100,000 T - no cracks	100,000 T - no cracks

Fig. 70 Tabla de propiedades Gama Valmex Mehatop

Obtenida en: <https://www.mehler-technologies.com/en/produkte-archiv/ft-1000-mehatop-n-type-iii/>

Las unidades empleadas en la arquitectura son poco intuitivas para los que no están relacionados, por ello, se debe realizar un cambio de unidades de la tensión de rotura N/50 mm a Mpa para hacernos una idea del potencial de estos valores.

En este caso, teniendo en cuenta el valor del espesor de la probeta y el resultado del ensayo, obtenemos una resistencia a tracción de 100 Mpa para la muestra tipo I y 153 Mpa para la muestra más resistente, tipo V.

En general podemos tener un rango desde los 50 Mpa hasta los 175 MPa, pero debemos tener en cuenta que se deben aplicar coeficientes de seguridad alrededor de 5-7.

II. Fibra de vidrio + PTFE:

Otro material muy común en la arquitectura textil es la fibra de vidrio. Normalmente se emplea fibra de vidrio de tipo E, el más utilizado, cuya composición es: 53-54 % SiO₂, 14-15 % Al₂O₃, 20-24 % CaO, MgO, 6,5-9 % B₂O₃.

Debido al proceso de fundición por el que se forman las fibras, estas están sometidas a unas tensiones internas, de compresión en la superficie y de tracción en el núcleo. Esto produce que se alcancen unos valores mayores de resistencia a la tensión, pero su rotura sea frágil. Además, el hecho de su doblado conlleva una pérdida de resistencia en los hilos. Por lo tanto, el proceso de producción, pultrusion, debe ser muy cuidadoso y específico para evitar defectos en los hilos.

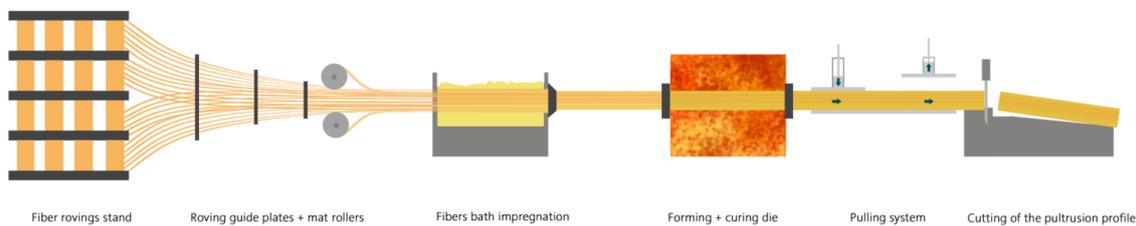


Fig. 71 Proceso de producción de la fibra de vidrio.

Obtenida en: <https://siesa.globall/procesos-de-fabricacion-de-materiales-de-fibra-de-vidrio-pultrucion-moldeado-manual/>

Al igual que para los hilos de PES, las fibras de vidrio se someten a un proceso de ensimaje, con la finalidad de protegerlo de la humedad y de daños en la superficie.

Posteriormente se someten al proceso de tejido análogo, con la singularidad que es muy común utilizar el tejido sarga con este material, pero también existen métodos de tejido multiaxiales y uniaxiales para este material. Obteniéndose una membrana isotropa en los casos de tejidos multiaxiales debido a la dispersión en diferentes direcciones de las fibras sobre la superficie base.

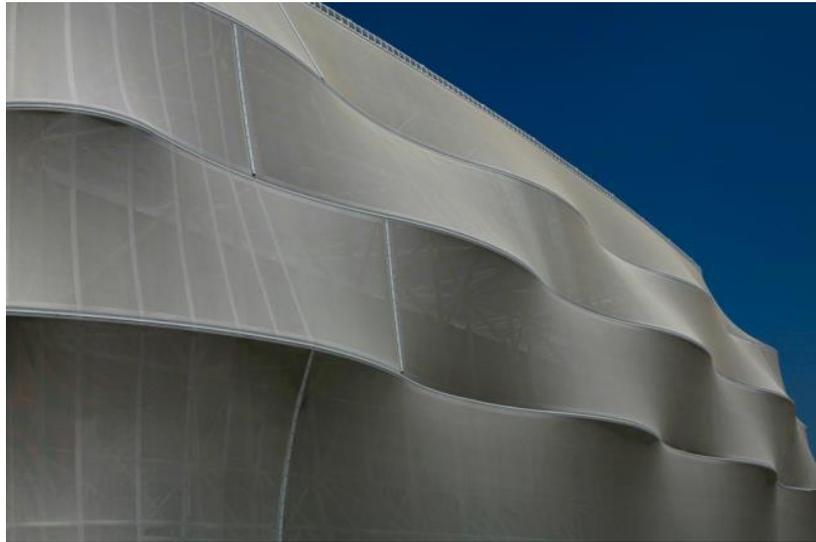
El recubrimiento en tejidos de fibra de vidrio desarrolla las mismas funciones que las descritas para tejidos de poliéster. Los recubrimientos típicos de la fibra de vidrio son PTFE y silicona.

El PTFE o teflón, es un polímero que se caracteriza por la inserción de flúor en su estructura molecular, esto le confiere una casi nula reactividad ante otras sustancias químicas. Es un material antiadherente y aislante eléctrico y térmico capaz de soportar grandes diferencias de temperatura. Además, su impermeabilidad le permite mantener estas características en ambientes húmedos.

El proceso de revestimiento consiste en la dispersión superficial sobre el tejido de la resina de PTFE, posteriormente se produce el secado y sinterización a 350-390°C. Gracias a que la fibra de vidrio es estable a estas alturas se puede realizar el recubrimiento con este material. La ventaja del teflón es que sus características de anti adherencia, pasividad reactiva, resistencia a los rayos UV e impermeabilidad es intrínseca a él, por lo que no es necesario añadir aditivos para obtener estas características en nuestra membrana.

En condiciones normales el teflón no es inflamable, solo en situaciones de alta concentración de oxígeno (95%), deja de resistir al fuego, sin embargo, gracias a su alta viscosidad, evita que gotee el recubrimiento al producirse un incendio.

Para aumentar la impermeabilización y resistencia a los hongos en membranas de PTFE, se aplica una capa de acabado de FEP. También favorece la soldabilidad, ya que el punto de fusión del FEP es inferior al del PTFE.



*Fig. 72 Edificio Magical en Lleida. Fachada de fibra de vidrio+PTFE
Obtenida en: <https://www.iasoglobal.com/es-ES/proyecto/magical>*

De igual manera, no se puede dar un valor fijo de la resistencia de los tejidos de vidrio, sino que debemos incluirlos en un rango. Generalmente más alto que los tejidos de poliéster, las membranas de fibra de vidrio tienen una resistencia desde 100 MPa hasta 200 MPa.

Typical Properties

Property	Value	Test Method
Coated Fabric Weight (g/m ²)	ca. 1305	DIN 53352
Tensile Strength (N/5 cm)		
Warp	7000 min. avg.	DIN 53354
Fill	6000 min. avg.	
Trap Tear Strength (N)		
Warp	500 min. avg.	DIN 53363
Fill	500 min. avg.	
Adhesion (N/5 cm)	100 min. avg.	DIN 53357
Translucency at 550 nm (%)	ca. 12	-
Solar Reflectance at 550 nm(%)	74 nominal	
Fire Testing	B-s1-d0	EN 13501
Burning Characteristics		
Flame Spread	5 max	ASTM E84
Smoke Generation	10 max	Tunnel Test
Incombustibility of Substrates	Pass	ASTM E136
Fire Resistance of Roof Coverings	Class A	ASTM E108
Spread of Flame & Intermittent Flame		
Flame Resistance	Pass	NFPA 701, Small Scale
Color	White (after exposure to sunlight)	-

*Fig. 73 Propiedades de las membranas de Fibra de vidrio+PTFE del
gama de Sheerfill, distribuida por el fabricante Saint-Cobain
Obtenida en:
<https://www.sheerfill.com/resources?search=sheerfill+ii&classification=52>*

3. Láminas de ETFE

El ETFE (Etileno-TetraFluoroEtileno) es un copolímero termoplástico formado por dos monómeros, uno de etileno y de tetrafluoruro de etileno. Los fluoropolímeros se encuentran en los polímeros más inertes, debido a que el fluor forma parte de su estructura mantiene la estabilidad de la estructura química, de forma análoga que sucedía con el PTFE.

Este nuevo material creado en los años 70 en la ingeniería aeronáutica está cogiendo cada vez más popularidad en la arquitectura debido a sus muy atractivas características y propiedades.

A diferencia de las membranas anteriores, estas se conforman a partir de fundición y extrusión, obteniéndose unas superficies homogéneas y lisas y unas propiedades isotrópicas en su superficie.

Las láminas de ETFE empieza a adquirir mucha popularidad entre los arquitectos desde su primera utilización en la construcción en 1982, en el pabellón de un zoológico de Arnheim (Holanda). Se emplea en salas de exposiciones, pabellones, oficinas y cubiertas de alto atractivo. Pero es a partir del 2000 que adquiere mayor visibilidad tras su uso en el proyecto Eden en Cornwall, Inglaterra, de Grimshaw architects, que consta de dos invernaderos geodésicos formados por elementos hexagonales de ETFE hinchados.

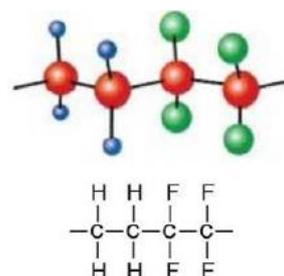


Fig. 74 estructura del ETFE

Obtenido en:

<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/03/etfe.html>



Fig. 76 Interior Parque zoológico Arnheim

Obtenido en: <https://www.vector-foiltec.com/>



Fig. 75 Exterior del Parque botánico EDEN.

Obtenido en: <https://www.archdaily.mx/mx>

El ETFE se puede emplear de diferentes formas, mediante un volumen encerrado a una presión superior, mediante elementos de una capa apoyados sobre una estructura metálica o como se emplea en estos dos proyectos anteriores en elementos hinchados. Según se ha estudiado, la forma más eficiente de emplear el ETFE es en elementos de 2 a 3 capas.

Características y Propiedades

I. Propiedades mecánicas

De igual manera que los anteriores materiales, estos tienen un comportamiento elásto-plástico no lineal. Este material presenta un pequeño rango de elasticidad hasta el 20% de elongación, y a partir de ahí se deforma plásticamente hasta un 500%, lo que le dota de una alta resistencia al desgarro.

Al producir las láminas mediante extrusión, las propiedades no siguen ninguna dirección principal en la superficie, sino que se comporta de manera isótropa. Resultado muy conveniente ya que se utiliza en sistemas presurizados que ejercen la misma presión en toda la lámina.

La flexibilidad de las membranas depende del espesor de las mismas, siendo aconsejable no sobrepasar el 2.5 mm, debido que a partir de este valor el material se vuelve frágil. En sistemas de varias láminas de ETFE se suelen usar espesores entre 100 y 300 μm .

En un sistema presostático de cojinetes, cada uno se comporta de forma independiente. Están unidos por la estructura primaria encargada de absorber y transmitir los esfuerzos a los apoyos. No obstante, las láminas deben ser suficientemente resistentes para transmitir los esfuerzos a la estructura primaria.

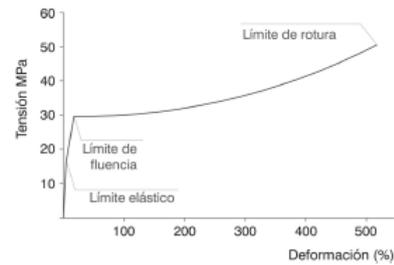


Fig. 77 Curva Tensión/deformación del ETFE.

Obtenido en: TFG: Membranas para superficies tensadas, Mercedes Cerdá Talón

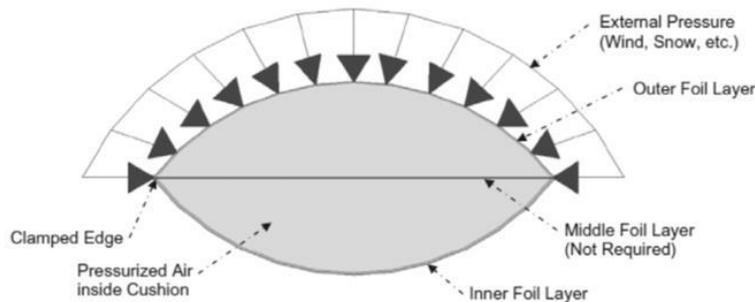


Fig. 78 Esquema esfuerzos en un cojinete

Obtenido en: Artículo: Fachadas textiles: Sistemas constructivos con láminas de ETFE, Julio Viejo y Rodrigo Alvestegui

El ETFE en esta disposición es capaz de soportar las diferentes inclemencias del tiempo, incluyendo cargas momentáneas, como granizo. Además de soportar los diferentes esfuerzos, estos se transmiten de forma reducida a la estructura primaria, esto se logra mediante la regulación de la presión interna del cojín. La lamina exterior recibe las cargas, que pierden intensidad al comprimir el fluido interno, amortiguando la intensidad del esfuerzo.

Una vulnerabilidad muy importante es la debilidad ante punzado por elementos afilados o puntiagudos. Pero gracias a su gran resistencia al desgarro, la apertura no se propaga por la lámina. Esta puede ser parcheada in situ, o cambiar el panel entero de forma independiente a la estructura.

II. *Propiedades Ópticas*

Una de las propiedades más empleadas, el ETFE tiene unas propiedades ópticas óptimas. La permeabilidad de la luz natural está entre el 94-97%, de igual manera para la luz ultravioleta esta entre el 80-90%, siendo permeable a los Rayos UVA, que permiten a los vegetales desarrollarse de forma natural en su interior, y bloqueando los rayos UVC, dañinos para nuestra salud.

El Porcentaje de la luz no transmitida, se absorbe en la lámina, con lo que se consigue una distorsión de la luz, evitando deslumbramientos en el interior.

Además, la alta capacidad de absorción de la radiación infrarroja, permite la retención de calor en su interior, creando el efecto invernadero de forma análoga al vidrio.

En algunos casos donde no conviene el paso de toda la luz solar y la radiación, se puede variar las propiedades de la lámina de ETFE, mediante tratamientos como la impresión de tramas gráficas de fluopolímeros opacos, de forma que, al variar la tonalidad y densidad, se obtienen diferentes coeficientes de transparencia.



Fig. 79 Centro comercial Arena Multiespacio, Valencia.

Obtenido: <https://www.iasoglobal.com/es-ES/>

III. *Aislamiento Térmico y Acústico*

En una disposición de cojinetes las láminas de ETFE se forman creando una cubierta termoaislante, de manera análoga que se hace con el vidrio de doble capa. Se unen 2 o más laminas al mismo cuadro de aluminio y se introduce aire hasta obtener la presión adecuada. En función del número de láminas que conforman el cojín, se obtiene una transmitancia térmica en torno al 2.94 y 1.47 W/m²k. De forma que se comporta de una manera muy eficaz.

En cuanto a las láminas simples, no se puede decir lo mismo, ya que al no tener la cámara de aire entre laminas no se logra el mismo efecto. Teniendo coeficientes muy altos de conducción térmica.

En cuanto al aislamiento acústico, es una de las cualidades que retrasa su aplicación en mayores cubriciones, debido a su transparencia acústica. Con la problemática añadida del efecto tambor, que consiste en la amplificación del sonido de la lluvia al impactar con los cojines. Un cojín de 3 capas de ETFE tiene un aislamiento acústico 4 veces menor que una lámina de vidrio, que se puede mitigar con la adicción de aislamientos acústicos como pesos en el interior. Dentro de esta debilidad debemos recordar que su buena absorción de la acústica interior, evita las reverberaciones en el espacio encerrado.

IV. *Comportamiento Frente al Fuego*

Una de las cualidades más valoradas de este material, el ETFE es combustible pero no inflamable, es decir que no crea llama al entrar en contacto con el fuego, esto se debe al flúor y a la baja concentración de oxígeno en su estructura.

Al entrar en contacto con el fuego o con los humos calientes, este se deshace y se evapora o es arrastrado con los gases calientes debido a su ligereza. Gracias a este comportamiento es posible la ventilación del interior, evitando grandes acumulaciones de calor y el colapso de la estructura.

De igual manera, debido a los pequeños espesores, el material total emitido en forma de gases es bajo y la contaminación a la atmosfera mínimo.

V. Durabilidad

Su comportamiento a lo largo del tiempo también resulta óptimo, gracias a su resistencia a la temperatura, al envejecimiento, y su gran resistencia química. Esto hace que no se endurezca ni agriete con las diferentes acciones a la que se vea sometido a lo largo de su vida útil y mantiene la mayoría de sus propiedades características sin alteraciones.

Uno de los inconvenientes que surgen a lo largo del tiempo, es el ligero blanqueamiento que sufre, este coloramiento lo hará incapaz de ser aplicado en según qué proyectos que requieran una alta transparencia.

Su alta resistencia a la adherencia de suciedad lo dota de igual manera de una capacidad de autolimpieza, teniendo un mantenimiento de limpieza mínimo en 10 años.

Los fabricantes dan una garantía del material alrededor de los 25 años, pero proyectos de principio de la década de los 80 demuestran una gran resistencia al deterioro, después de décadas de vida útil.

VI. Sostenibilidad

Aunque no es un material de origen natural ni biodegradable, es 100% reciclable. Además, al no ser un derivado petroquímico, es admitido por el protocolo de Montreal, como material que no contribuye a la destrucción de la capa de ozono. En su producción, al ser de base acuosa no intervienen solventes en el proceso de producción, es rápida y de bajo coste energético, su impacto medioambiental es muy bajo.

Por otro lado, su bajo peso, lo hace un producto con un bajo coste de transporte, mucho menor que materiales como el vidrio, además sus procesos de instalación pueden ser más especializados pero menos costosos y pesados, al igual que las membranas tejidas, tienen un bajo consumo energético durante su vida útil.

4. Comparativa de materiales

Membranas:	Fabricante	Densidad superficial (g/m^2)	Permeabilidad de la luz (%)	Resistencia a tracción (urdimbre/trama) (KN/m)	Aplicaciones
Membrana de PES con revestimiento de PVC	SERGE FERRARI	500-950	15-20	115/102	Uso muy normalizado en proyectos con alta influencia del presupuesto
Membrana de Fibra de Vidrio con revestimiento de Silicona	SAINT COBAIN	500-1300	15-20	124/100	Poco habitual, si el presupuesto lo permite
Membrana de fibra de Vidrio con revestimiento de PTFE	SATTLER	500-1300	15-20	107/105	Tejidos de alta calidad, alta traslucidez
Membrana de ETFE	PFEIFER	200-350	90	64/56 (MPa)	Uso generalizado en estructuras neumáticas

Tabla 1 Propiedades y fabricantes de las principales membranas

04. Proceso de diseño

1. Introducción

En este apartado se va a desarrollar el diseño y cálculo de una cubierta ligera textil utilizando los conocimientos anteriormente expuestos, apoyándonos en el programa RFEM de Elementos finitos, que nos permite realizar los cálculos necesarios. Se ha realizado el estudio necesario para que el proyecto formado por una estructura portante de acero y, membranas y cables atirantados cumplan con las exigencias impuestas por la legislación vigente. Se expondrá el proceso de diseño explicando el motivo de cada variación apoyado por los esfuerzos que sufre. Una vez obtenido esta forma deseada de la membrana, se aplican los casos de carga y sus combinaciones para, acorde con los esfuerzos obtenidos, elegir y dimensionar los elementos de la cubierta.



Fig. 80 Imagen del Bar/Terraza Villa Feliche. (Izq) Local (Der) cubierta exterior
Obtenido de: <https://www.facebook.com/terrazavillafeliche>

El proyecto propone sustituir la cubierta exterior metálica de la terraza Villa Feliche por una cubierta textil. La terraza está ubicada en el parque con el mismo nombre, entre la calle Miguel Sevet y el río Huerva.

La planta de la terraza se trata de 2 arcos concéntricos separados 9 metros, el primero tiene un radio de 6 m y el segundo de 15m, en total es una superficie a cubrir de $131.95 m^2$. Se pretende que la cubierta cubra unas luces de alrededor de 20 metros, sin ningún apoyo en el interior, dando lugar a un espacio diáfano y de gran luminosidad. La planta sobre la que se va a trabajar es la siguiente:

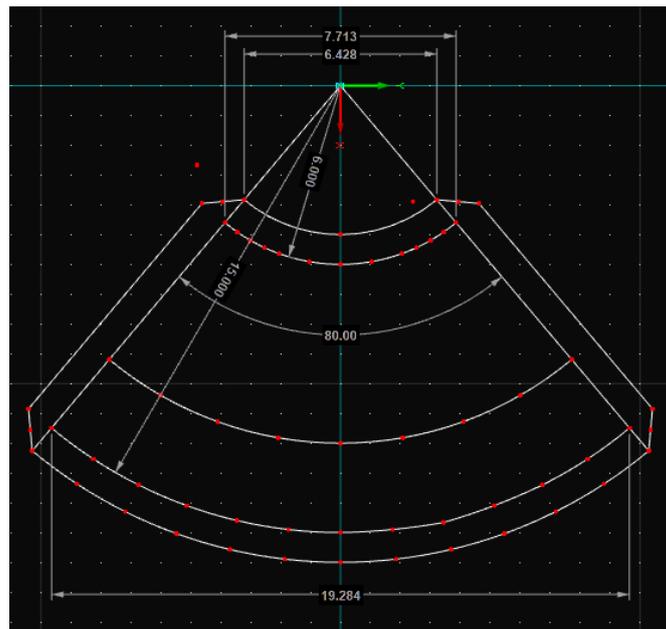


Fig. 81 Planta sobre la que se va a trabajar
Elaboración propia

2. Búsqueda de la forma

Dentro de RFEM, tenemos el modulo RF-FORM-FINDING, diseñado para el cálculo y definición de estructuras de membranas y cables sometidas a tracción, entre otros usos. Como datos de entrada, se introduce la pretensión de las membranas y la fuerza/catenaria de los cables, para posteriormente aplicar un análisis no lineal basado en URS (Update reference strategy) que permite encontrar el equilibrio de los elementos a partir de su pretensado.

Al iniciar este proceso, se siente uno tentado por encontrar una forma extravagante, rompedora y de extremada belleza, pero tras muchos intentos y estudios de proyecto ya realizados, se entiende que se debe dejar a la membrana obtener la forma más eficaz para sus condiciones de apoyo y no forzarla a formas no naturales para ella, es precisamente esta cualidad la que diferencia a este tipo de arquitectura. Por lo tanto, a partir de la planta con una geometría de sección de anillo plano busco que forma obtendría la membrana para controlar sus desplazamientos y minimizar sus esfuerzos.

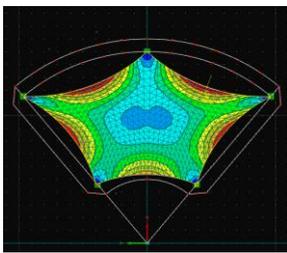


Fig. 83 Planta 1º Modelo

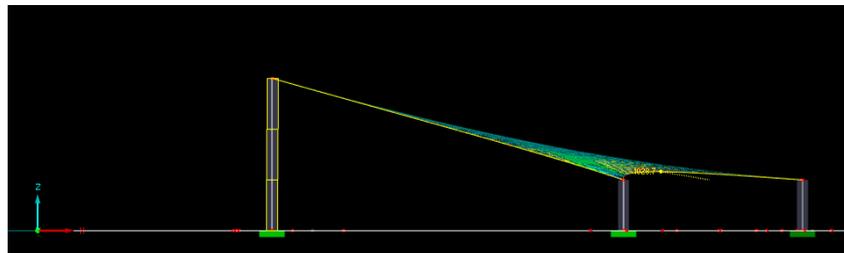


Fig. 82 Alzado 1º Modelo

En este primer modelo vemos que la sensibilidad de la membrana ante cargas externas o al peso propio es muy grande, originándose bolsas en su superficie. Estos amplios desplazamientos se pueden disminuir mediante el aumento de la pretensión, pero se recomienda que esta nunca sea mayor del 4.5% del límite de tracción minorado del material de la membrana. Por ello debemos buscar una geometría con una mayor curvatura que nos ayude a amortiguar estas deformaciones.

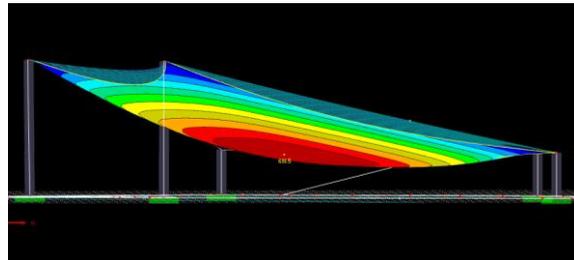


Fig. 84 Reacción de la membrana ante la carga de nieve

Para ello añadimos más puntos de anclaje de la membrana, además alternamos sus alturas, para poder dar el espacio a desarrollar esta doble curvatura. Como al ser una superficie tan amplia, siempre vamos a tener un problema en evacuar el agua de su interior. Podríamos inclinar la membrana hacia un lado como en el [proyecto intermodal de las palmas](#), pero debido a que no se quiere interferir tanto en el medio introduciendo una cubierta de tanta altura, se opta por la división de la membrana y la introducción de cables que actúen de cumbrera y definan las distintas vertientes para permitir la evacuación pluvial.

Como diseñadores respetamos la actual disposición de la terraza y los puntos de entrada, que son 3, uno de frente por el arco de menor altura, y uno más a cada lado. El central vendrá delimitado por dos mástiles situados a un cuarto de la longitud del arco. La solución más eficiente que hemos encontrado para la evacuación del agua, es el uso de un cable cumbrera que una los dos mástiles centrales, recién introducidos, con el mástil trasero, como se muestra en la fig.85. Se desarrollan varios modelos, pero con soluciones muy poco eficientes, hasta que se añade este cable cumbrera, que divide la superficie de la cubierta por la mitad, siendo un eje de simetría.

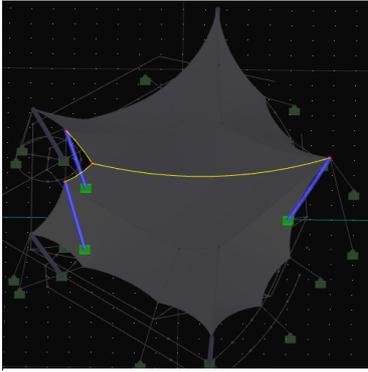


Fig. 85 Union de los 3 mástiles mediante el cable cumbre

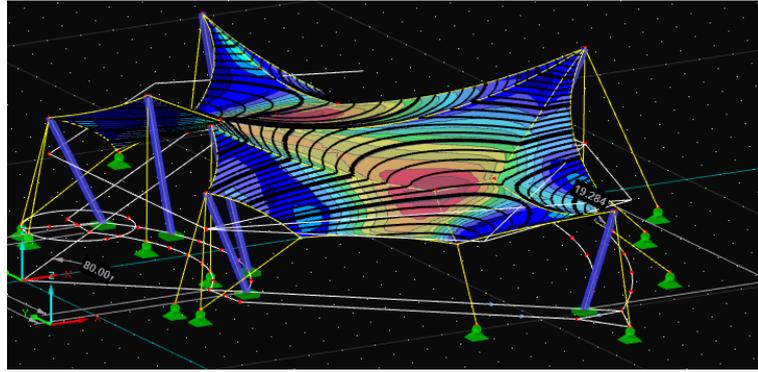


Fig. 86 Modelo intermedio apoyado por líneas de nivel con un incremento de 10 cm.

Como se observa la cubierta está compuesta por 8 membranas, iguales dos a dos. Aunque no es la forma final, está muy próxima, el siguiente reto que nos surge es la habitabilidad de la cubierta, principalmente por la altura. La parte posterior de la cubierta tiene zonas que no superan los 2, por lo que debemos rediseñar la superficie.

Se pretende rigidizar la forma mediante la adición de cables, y se logra, pero en contra partida, la membrana pierde esos gradientes de altura y su forma anticlastica, de forma que no evacua aguas, y se vuelve más susceptible a cargas en la vertical como la nieve. Por lo tanto, nos decantamos por elevar los apoyos de la membrana de forma que en general la cubierta es más alta, obteniendo unas mayores inclinaciones desde el centro de la membrana hasta los apoyos inferiores. Alcanzando los casi 6m los mástiles más altos, y el metro y medio los anclajes más bajos, en el anexo se especifican todas las medidas.

De esta forma, sin añadir demasiados cables en la membrana, obtenemos la rigidización de la superficie. Debido a este espacio que se le ha proporcionado a la membrana, puede desarrollar mayores curvaturas, efecto clave para su estabilización. La forma final consta de 6 membranas, 2 centrales, que actúan de cumbre y 2 más a cada lado suyo. Estas están conectadas por 17 apoyos al suelo, 13 de ellos están basados en el apoyo en un mástil de acero y los otros 4 anclados al suelo mediante un cable. El cableado interior de la superficie consta de 5 cables, uno en cada interfaz entre membranas. Otro punto clave que intervino en la búsqueda de la forma es que los cables cumbre debían tener un mayor pretensado, para combinándolo con la mayor altura, se mantenga

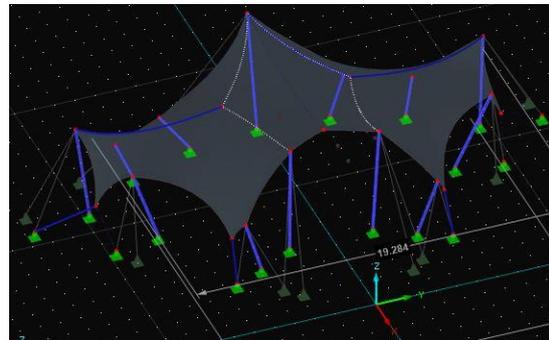


Fig. 88 Forma final, visibilidad de los apoyos y cables interiores. Elaboración propia

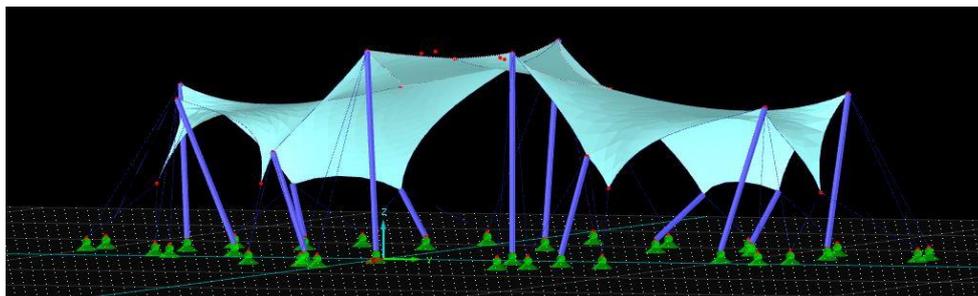


Fig. 87 Forma final de la membrana

elevado el interior de la membrana, pero de esto hablamos en profundidad en el siguiente apartado.

3. Estabilización de la estructura portante

Durante la primera fase de diseño, nos hemos centrado en la forma de la membrana, en ella considerábamos que los apoyos de la membrana eran fijos. Una vez encontrada la forma debemos estudiar que estructura portante es capaz de soportar esta membrana.

Como hemos observado en el primer capítulo de este trabajo, muchas de las estructuras tensadas emplean apoyos articulados fijos, es decir que la viga puede rotar sobre algún eje, en nuestro caso, los apoyos de los mástiles tienen 2 grados de libertad, la rotación en X e Y. Se emplean este tipo de apoyo, porque liberan al poste de la mayoría de esfuerzos cortantes y flectores, al alinearse cada mástil en base a los esfuerzos y los correspondientes planos de carga que sufre, consiguiendo que toda la carga se aplique en forma de compresión. Pero un factor muy importante es que gracias a esta articulación la estructura a medida que sufre las cargas externas tiene cierta libertad a buscar una nueva disposición más eficaz. Se debe buscar el equilibrio de la disposición del poste mediante el pretensado de la membrana y unos cables estabilizadores que se unen a la cabeza, teniendo especial cuidado en que los cables no generen ningún efecto de tracción sobre las barras, debido a que perdería la estabilidad y podría cambiar su disposición y dejar de ser útil en la estructura, haciendo que esta se transformase en inestable.

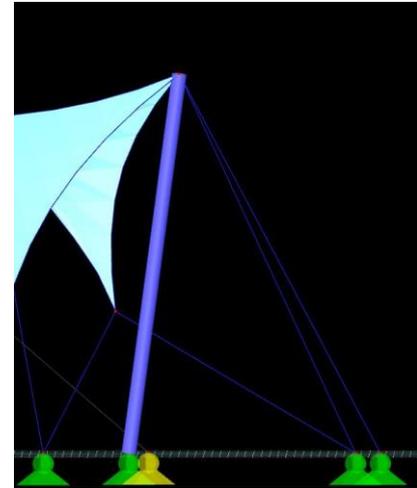


Fig. 89 Mástil comprimido por cables a tracción.

Se trata de un proceso iterativo en que se buscan las posiciones de los anclajes de los cables atirantados, y sus pretensiones, a la vez que se puede modificar la pretensión de la malla. En este caso, inicialmente se había encontrado la forma con los mástiles empotrados, para reducir sus esfuerzos y optimizar su sección se procedió a inclinarlos para reducir los momentos flectores que inicialmente aparecían. Al no ser suficiente con la inclinación se añadieron tirantes a la cabeza del mástil. De esta forma antes de introducir los apoyos articulados ya se tiene una aproximación de como pretensar e inclinar los mástiles. Ya que resulta más ágil realizar dichos ajustes, con las bases empotradas al aumentar el grado

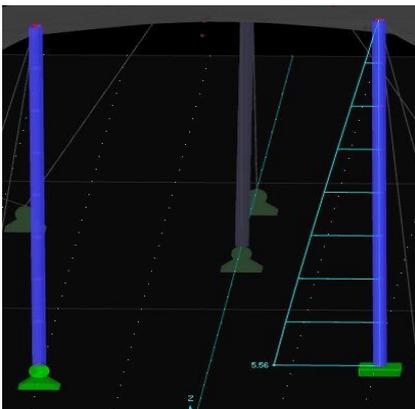


Fig. 91 Diferencia de momentos entre un apoyo articulado y empotrado.

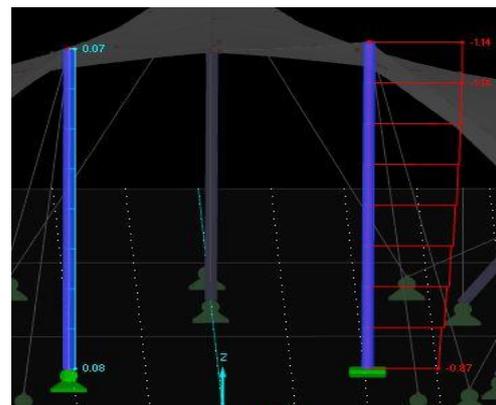


Fig. 90 Diferencia de cortantes entre un apoyo articulado y empotrado.

de hiperestaticidad de la estructura, evitando posibles inestabilidades y singularidades en el cálculo.

Las pretensiones de los cables estabilizadores varían mucho, 15 – 17 KN para los tirantes de los mástiles centrales, 5-3 KN para los tirantes de las demás vigas, 3KN para los cables perimetrales y 8-5 KN para los cables interiores de la membrana.

4. Casos de carga y combinaciones de carga

Una vez obtenida la forma de la membrana y unas pretensiones aproximadas, podemos aplicar los casos de carga, para ver cómo responde nuestro modelo, y así seleccionar los materiales que compongan nuestros elementos. En este proyecto no cabe concebir una sobrecarga de uso sobre la membrana, así que solo se tenemos el peso propio, carga de nieve, y carga de viento.

Carga de nieve

Nos basamos en el código técnico de edificación, CTE DB-SE-AE, para la selección de cargas de nieve, en ella elegimos la zona 2, correspondiente con Zaragoza, y la altitud de 400m, con ello obtenemos una carga de nieve sobre la proyección horizontal de la cubierta de -0.60 KN/m^2 .

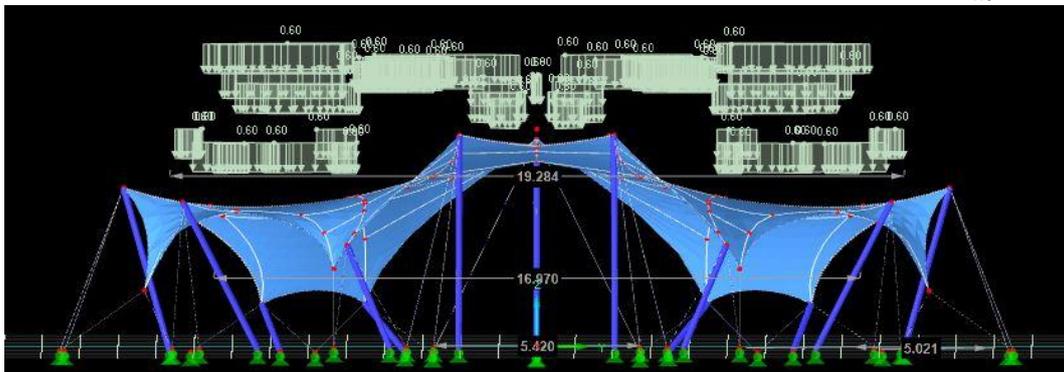


Fig. 92 Aplicación cargas de Nieve

Carga de viento

En la mayoría de los diseños de estructuras de membranas se emplean programas y módulos de generación de túneles de viento. En el que simulan la trayectoria, velocidad y más importante, presiones que ejercen las partículas de aire al interactuar con nuestra estructura, estos programas como Wintess, que lo tiene incluido o en el caso de RFEM, R-WIND, son muy potentes y por lo tanto costosos.

En el caso de esta tenso-estructura no se ha podido utilizar estos métodos de simulación, por lo que hemos tenido que realizar una aproximación en base a los valores del CTE-DB-SE-AE de que presión ejerce el viento sobre nuestra membrana. La carga de viento se ha podido calcular asemejando la estructura a una marquesina donde si hay mayor conocimiento y está recogido en el código técnico que fuerzas ejerce el viento.

Empleando los resultados que nos ofrece RFEM, sobre las inclinaciones de las superficies, podemos dividir nuestra superficie, en otras menores, con menor desviación entre sus inclinaciones. De forma que en mayor o menor medida nuestra membrana es una marquesina a dos aguas, con diferentes grados de inclinación según la posición, y con pequeñas adiciones de marquesinas a un agua.

Según la dirección del viento, la aproximación de la membrana es diferente, pero la división de las membranas es la misma para poder utilizar el mismo modelo. La división consiste en discretizar todas las membranas en elementos con la misma pretensión. Según el viento en x e y, tenemos el siguiente

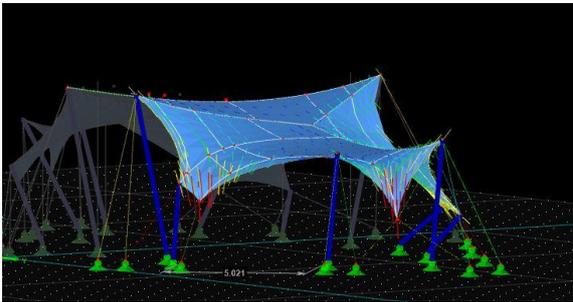


Fig. 94 Líneas de inclinación del modelo.

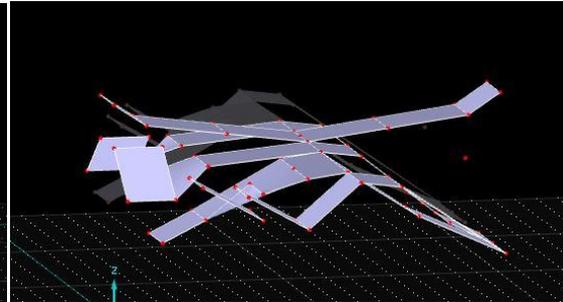


Fig. 93 Aproximación mediante lajas de la inclinación del modelo.

diseño:

Y con estas inclinaciones y el documento del código técnico que indica el coeficiente de presión a utilizar para cada zona de la marquesina dependiendo de la inclinación, obtenemos la distribución de cargas sobre nuestra membrana. Las tablas de distribución de presión para cada dirección de viento y, presión y succión se adjuntan en los anexos. Estas se han obtenido mediante el cálculo de la presión de viento como el producto de la velocidad de viento, correspondiente a Zaragoza, 0.45, el coeficiente de exposición, dependiendo de la ubicación y altura de la estructura y por el coeficiente de presión, obtenido por la disposición de la estructura al viento.

$$Q_e = Q_b * C_e * C_p$$

Mediante esta adaptación del modelo, es cierto que se pierden muchas direcciones de inclinación de la membrana, pero es la mejor forma ya que engloba a la superficie total de la membrana como una marquesina. Además, estos coeficientes de presión están sobredimensionando la estructura, los valores de presión que obtendríamos mediante un túnel de viento serían más ajustados.

Obtenemos 4 casos de carga para el viento, uno de presión y otro de succión por cada dirección del viento. Según la dirección Y el viento ejerce los mismos esfuerzos independientemente de su sentido, ya que la membrana es simétrica según el eje x. Y en la dirección X es independiente también, pero por el tipo de aproximación, ya que las inclinaciones son las mismas.

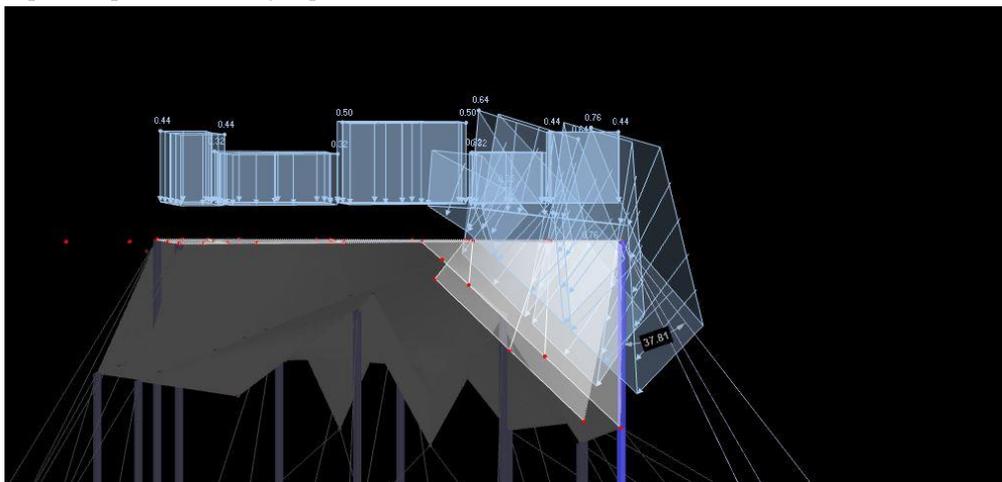


Fig. 95 Aplicación de las cargas de viento en la sección interior de la membrana

Combinación de cargas

Para la creación de combinaciones seguimos el documento del código técnico de edificación de seguridad estructural, desarrollando los diferentes estados límites últimos mayorados y minorados, y los estados de servicio. En total debemos desarrollar 72 combinaciones, pero en realidad son muchas menos ya que muchas se repiten o son de poca relevancia.

En total son 20, dos de ellas se deben al estado límite último y de servicio de la nieve sin ninguna otra carga variable. Otras 10 se deben a las cargas de viento de succión y presión, 6 estados límites últimos, 4 mayorados y dos minorados por el efecto favorable de la succión, y 4 estados de servicio. Y los 8 restantes se deben a las combinaciones con simultaneidad de los casos de viento y nieve.

Esta gran reducción se debe a la succión del viento, que en las combinaciones en las que predominaba, la acción de la nieve era una acción favorable y por lo tanto se anulaba su contribución y en los casos en que predomina la nieve, la acción de la succión es favorable y por lo tanto se elimina también su contribución, quedando combinaciones iguales a solo viento de succión o solo nieve.

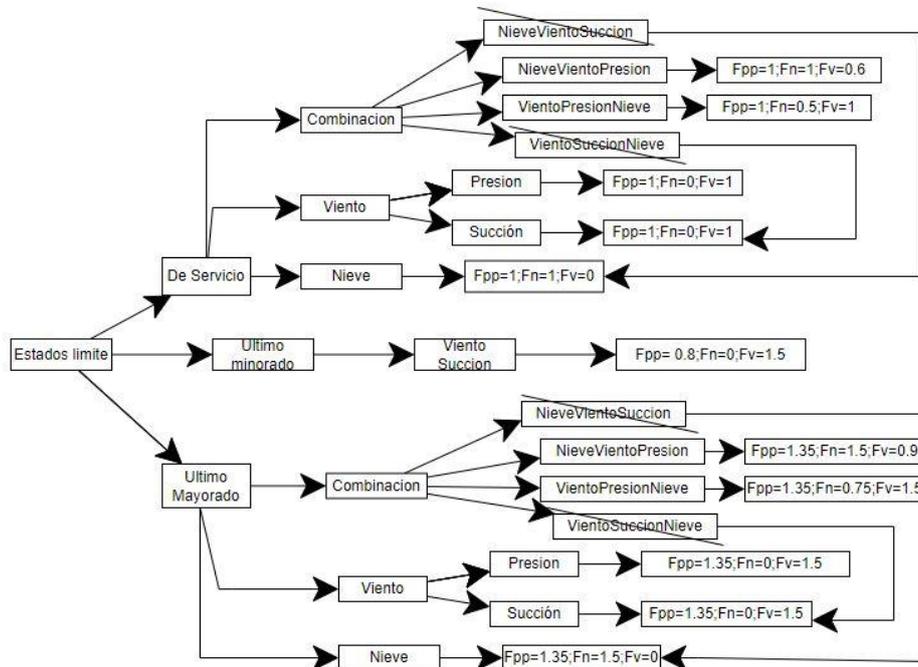


Fig. 96 Esquema estados límites genéricos

Es mediante esta configuración de los casos de carga que se obtienen las combinaciones, con los estados límites últimos, comprobamos que ante un caso extremo la estructura se mantendrá estable y no colapsará, es decir estudiaremos las tensiones de los elementos y su estabilidad.

Mediante los estados de servicio, comprobamos que se mantengan las dimensiones de diseño que permiten el uso de la cubierta, es decir que los elementos no alcancen unos desplazamientos superiores al 0.5% de la longitud del elemento para las vigas y un 1.5% de las luces para la membrana y los cables.

5. Elección de materiales y secciones

Los mástiles portantes al estar articulados en el apoyo y en sus cabezas y tener ciertas libertades que lo asemejan a una articulación, están muy descargados, teniendo apenas esfuerzos cortantes o momentos. En el caso más desfavorables, la combinación de carga 5, con el peso propio mayorado, $\gamma=1.35$, la carga de nieve predominante, $\gamma=1.50$, y el viento en dirección x ejerciendo presión con un coeficiente de simultaneidad de 0.9, se obtienen unas compresiones máximas de 375 y 200 KN para los 3 mástiles centrales, y un momento de 1.53 KNm. Por lo tanto, lo que nos debe preocupar para diseñar estas vigas, es el axil y el riesgo de pandeo, mediante el análisis de estabilidad.

Para las vigas de acero hemos elegido una sección circular hueca de 168 mm x 12.5 mm de Acero S275 MH. Con lo que se logra unas tensiones máximas de 70 MPa y una relación de tensiones de pandeo de $0.55 < 1$.

Nº Barras	Material	Sección	M. Young	Lim. Elástico	Norma	Lim elástico minorado
13	Acero S275 MH	61.2 cm ²	210 MPa	275MPa	EN10219-1:1997-11	230 MPa

Los cables son elementos que solo actúan a tracción, elementos de pequeña sección y gran longitud axial. Se diseñan para que tengan una gran resistencia a tracción, mediante la orientación del grano en la dirección axial, la adicción de microaleantes como el Cr, Ni o Niobio. Esto se debe porque estos elementos van a estar sometidos a axiales alrededor de los 150 KN con secciones muy reducidas. Al igual con la combinación 5 elegimos el material y la sección. Se trata de un acero inoxidable de alta resistencia, y dividimos los cables en dos familias, según la sección una con un $\varnothing = 8$ mm y otra con $\varnothing=15$ mm.

Nº Barras	Material	Sección	M. Young	Lim. Elástico(Rp0.2%)	Norma	Lim. Elástico minorado
36	X5CrNiCuNb16-4(+P1070)	0.5 cm ²	200 GPa	1000 MPa	EN13480-3:2003	840 MPa
20	X5CrNiCuNb16-4(+P1070)	1.77 cm ²	200 GPa	1000 MPa	EN13480-3:2003	840 Mpa

De esta forma en el régimen más desfavorable los cables soportan unas tensiones 776.05 MPa.

Por último, la membrana, de la que ha sido más difícil obtener información, como hemos estudiado la más generalizada es la membrana tejida de PES con revestimiento de PVC, solicitamos al fabricante Serge Ferrari, graficas representativas del ensayo biaxial de membranas en un rango de aplicación de 50 KN/m².

	Modelo	Espesor (mm)	M. Elasticidad (urdimbre/Trama)	Resistencia a traccion	Resistencia a traccion minorado
Probeta	Flexlighth Advanced 1502 S2	1.14	1418/1168	175.43 Mpa	29.25 Mpa

Con el ensayo uniaxial que nos ha proporcionado el fabricante para la trama y la urdimbre obtenemos los módulos elásticos. El fabricante nos proporciona la resistencia a tracción en daN/5cm, debido a al ensayo realizado según la norma EN ISO 1421. Este resultado lo debemos pasar a MPa para introducirlo en RFEM, el procedimiento es el siguiente, se pasa a N/cm y lo dividimos por el espesor de la probeta, de esa forma obtenemos la tensión de rotura de la membrana.

Según los estudios realizados se recomienda una pretensión no mayor de 1.32 Mpa.
Prontuarios, gráficas y cálculos en el anexo.

6. Resultados

En este apartado vamos a estudiar que efectivamente tras la elección de materiales, en todos los casos y combinaciones de carga la estructura se mantiene, según los valores permitidos de tensión y deformación. También podremos resolver ciertos elementos que provocan divergencias en la solución. Además, vamos a estudiar como varían las tensiones y deformaciones de los diferentes elementos según la pretensión de la membrana.

Primero vamos a hacer una comparativa de las tensiones que sufre las membranas y los cables, que son los elementos más solicitados, al igual que las flechas que sufren según la pretensión de la membrana. De esta forma nos aseguramos de tener la pretensión de diseño más adecuada. Se va a variar la tensión de la membrana desde 0.5 Mpa hasta 1.4 Mpa, valor superior al recomendado de 1.3Mpa, en incrementos de 0.15Mpa.

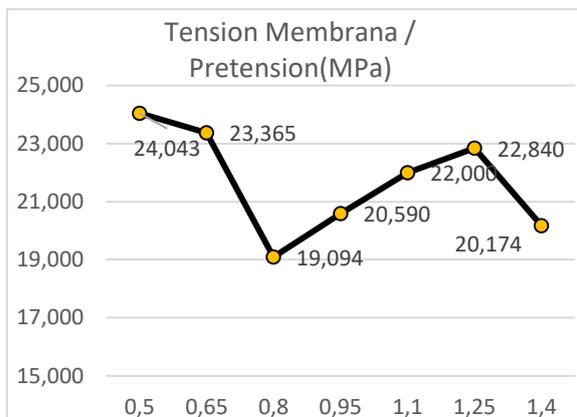


Fig. 98 Evolución de la tensión máxima en la membrana al aumentar la pretensión. CO13: ELU nieve predominante y simultaneidad de viento Y presión

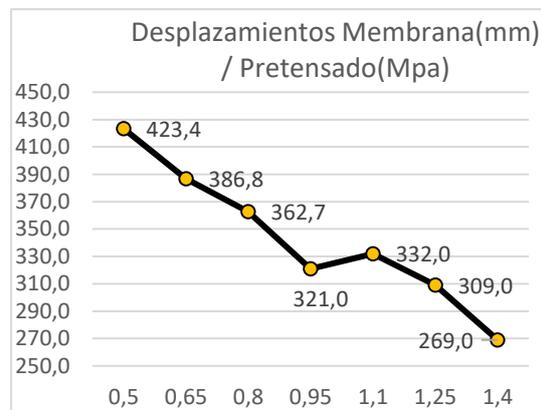


Fig. 97 Evolución de los desplazamientos máximos de la membrana al aumentar la pretensión. CO17: ELS nieve predominante y simultaneidad de viento Y presión

La tensión de la membrana y los desplazamientos se mantienen dentro de los límites aceptables, considerados no superar el límite elástico minorado ni las deformaciones del 4.5% para todas las combinaciones de acciones. Pero para las más desfavorables, ELU y ELS de nieve predominante y viento, lo que observo en el mapa de distribución de tensiones es que para la pretensión de 0.5 y 0.65, son tensiones más puntuales, es decir que al no estar en equilibrio la pretensión de los cables con la membrana genera concentración de esfuerzos en las zonas de la membrana cerca de los cables. Ya que, en el resto de la membrana, esta sufre unas tensiones alrededor de 10 y 15 MPa. Correspondiendo con una subida del valor de pretensión, la membrana también está más solicitada. Con la gráfica de la derecha queda representado como la tensión de la membrana ayuda a rigidizarla, atenuando la respuesta a cargas externas.

La problemática de las tensiones altas, es que la membrana se encoge demasiado, es decir los lados que tiene libres o unidos con un cable sufren unas deformaciones demasiado excesivas hacia el centro.

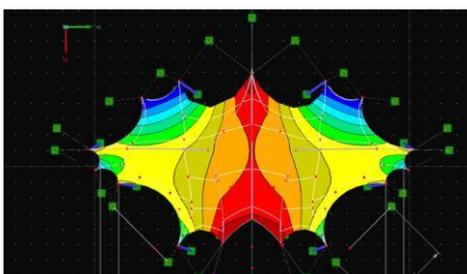


Fig. 100 Forma con pretensión 1.25 MPa

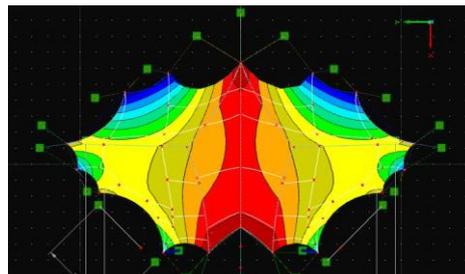


Fig. 99 Forma con pretensión 0.8 MPa

Complicando el objetivo de cubierta que buscábamos. Por otro lado, estas tensiones se ejercen a los cables que están unidos de manera transversal, con lo que para obtener una mejor aproximación de la configuración deformada de equilibrio es necesario el uso de mallas más finas que implican mayor coste computacional para obtener resultados más exactos.

Por otro lado, hemos observado que, en los bordes con mayores luces, es donde se producen la mayor parte de los picos de tensión. Esto es debido a la diferencia de las deformaciones en la unión entre cable y membrana. Todos los bordes perimetrales tienen un cable en el interior de la relinga, en los casos de mayor luz, las flechas de los cables y la membrana es diferente, pero al estar unido se fuerzan

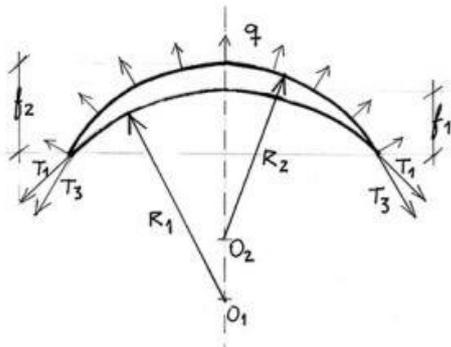


Fig. 102 Esquema de deformaciones genéricas de una membrana y un cable.

Obtenida en: Ponencia José Ignacio Llorens Duran, Detalles constructivos de las tensoestructuras.

a tener la misma y de ahí la sobretensión.

Como solución proponemos el uso de otros amarres perimetrales, debido a que, si se deja el perímetro libre, las deformaciones son gigantescas. La disposición del cable perimetral externo a la relinga permite a ambos elementos deformarse de manera diferente. En este caso las fuerzas de la membrana se transmiten a los cordones, de los cordones a los conectores y de los conectores al cable exterior. Por tanto, dicho efecto local aparecido en el modelo no se da en el caso real, sin embargo, aun así, los valores de tensión que aparecen son aceptables, garantizando que cumple la membrana.

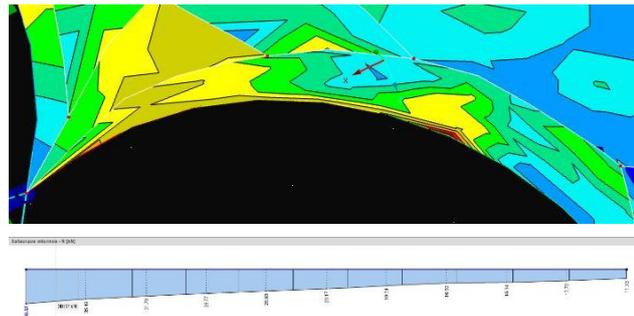


Fig. 101 Pico de tensiones en la membrana, en la luz de la puerta lateral y axial del cable unido (40KN-12KN)

Elaboración propia



Fig. 103 Disposición del cable perimetral

A continuación, se muestran los valores de tensión y deformación de los diferentes elementos estructurales de la cubierta, estos valores son los obtenidos para una pretensión de 0.8MPa, el valor de diseño y final. Con el estado límite último más desfavorable comprobamos las tensiones máximas que sufre la estructura y en qué elementos, siempre no superando los valores determinados en el apartado de materiales. Y realizamos lo mismo con los desplazamientos de los estados de límite de servicio:

Combinación ELU	Max. Tensión Membrana(MPa)	Max. Tensión Cables (MPa)	Max. Tensión Mástiles(MPa)	Análisis estabilidad pandeo
CO1	13.84	570.857	61.35	0.41
CO3	12.67	656.35	52.17	0.35
CO4	17.78	791.83	73.97	0.49
CO5	18.87	757.83	81.59	0.55
CO6	14.76	691.41	13.21	0.07
CO11	13.52	619.54	48.92	0.32
CO12	18.38	757.46	70.92	0.47
CO13	18.66	740.86	79.78	0.53
CO14	15.13	804.79	12.28	0.06
CO19	15.23	691.52	13.78	0.07
CO20	15.16	803.86	13.11	0.06

Tabla 2 Tensiones máximas del modelo para cada estado límite último

Combinación ELS	Desplazamiento membrana (mm)	Desplazamiento máximo permitido
CO2	302.52	≤ 463.53 mm
CO7	192.31	
CO8	292.65	
CO9	338.44	
CO10	198.06	
CO15	207.15	
CO16	300.68	
CO17	339.64	
CO18	265.90	

Tabla 3 Deformaciones máximas de la membrana para cada estado límite de servicio

De las combinaciones ELU observamos que todos los elementos cumplen, no superando su límite elástico minorado. Pero es imposible no comentar que algunos elementos están más utilizados que otros, es decir los mástiles a priori parecen estar sobredimensionados. Pero debido al estudio de estabilidad entendemos que no, es decir los mástiles centrales tienen una esbeltez muy elevada, por lo que son muy susceptibles a tener colapso por pandeo. Por ello mediante estudio de estabilidad entendemos que no podemos disminuir más la sección.

En los anexos aparecen los mapas de tensiones y los mapas de deformación para las combinaciones 14 y 17 que son las más desfavorables.

De forma que la cubierta esta dimensionada, los cálculos a las respuestas de las acciones han sido positivos.

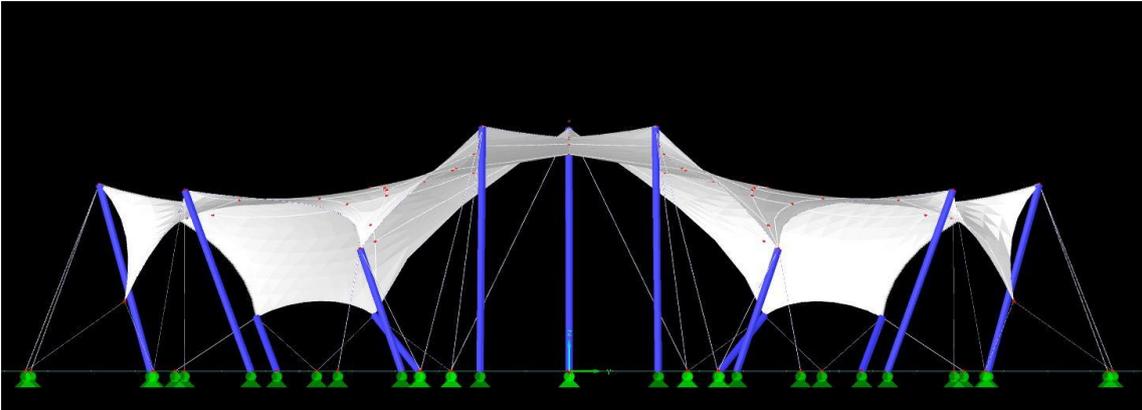


Fig. 104 Alzado de la cubierta

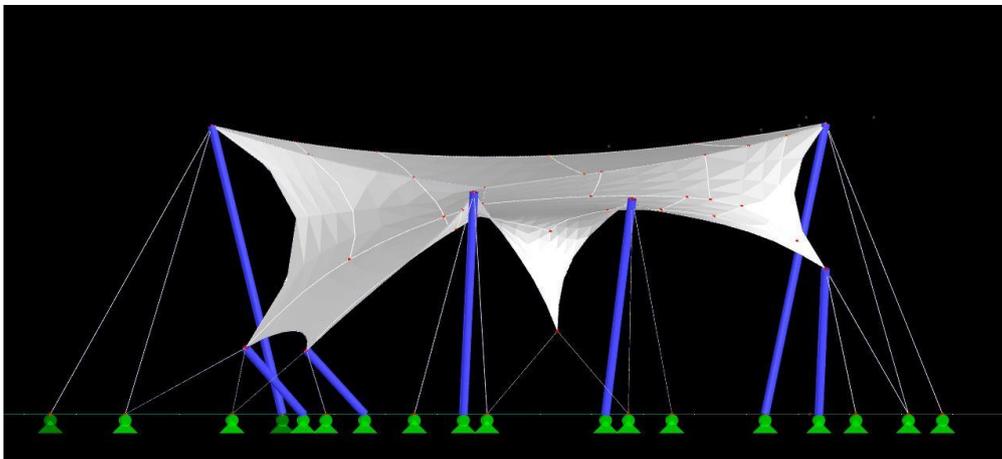


Fig. 105 Perfil de la cubierta

05. Conclusiones e investigaciones futuras

Tras concluir el presente trabajo, no se acaba la línea de investigación sobre la arquitectura textil y sus diversas ramas, me he dado cuenta de que las estructuras de membrana son más populares de lo que pensaba. Debido a su bajo coste económico y su gran atractivo son estructuras que se están incluyendo cada vez más en los proyectos.

Por otro lado, debemos de considerar su gran potencial como arquitectura sostenible, aprovechando los recursos naturales que ya han entrado en el ciclo de consumo y reciclándolo al 100% como se puede hacer con el ETFE.

La capacidad de los materiales de las estructuras de membrana de crear cerramientos con una luminosidad de alta calidad, es sin duda su mayor cualidad, muy aprovechados en cerramientos, como en espacios exteriores, utilizando la luz como la piedra de una escultura.

Mediante el estudio de las formas de las estructuras tensadas, se entiende como la sencillez del resultado envuelve un entramado estructural complejo, muy parecido a lo que hace la naturaleza, formas simples, pero con un equilibrio muy complejo. Y así es la estabilización de láminas mediante una doble curvatura anti clásica, en el que cada punto de la membrana esta traccionado por 4 vectores que no actúan en un mismo plano.

Mediante este trabajo también se extrae el conocimiento del proceso iterativo de diseño de una estructura de membrana, en que hay que conocer muchos proyectos para poder diseñar con soltura la forma que debe encontrar la membrana.

La gran importancia de la elección del pretensado de la membrana, para permitir unos determinados desplazamientos, el diferente comportamiento que sufren los cables y las membranas y que muchas veces están unidos, forzando a la membrana a soportar mayores membranas.

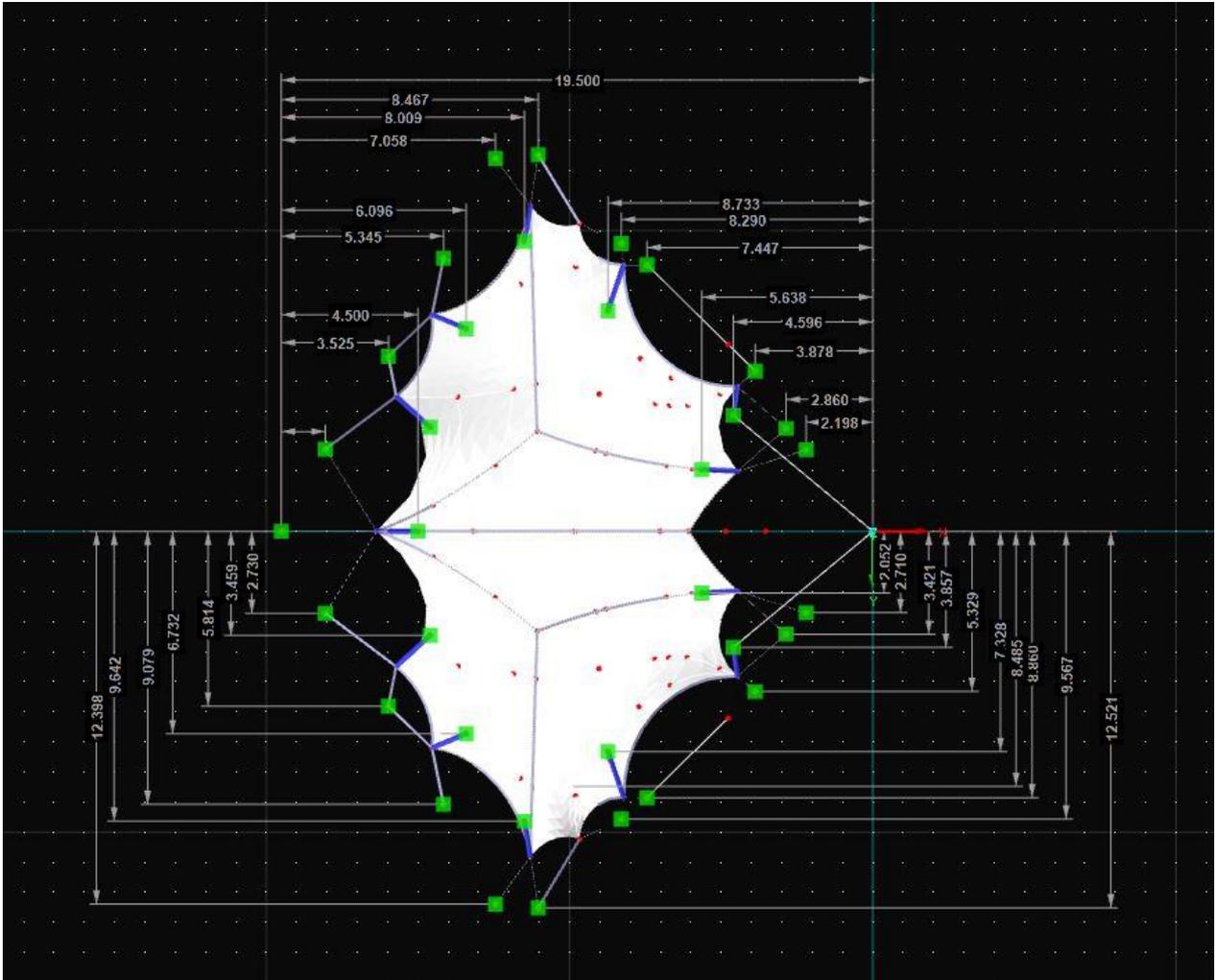
Como futuras líneas de trabajo, sería la profundización en estructuras sinclásticas, pero en forma de conoide hiperbólico, para poder implementar sistemas tensegrity, como mástiles en suspensión, en los que se aprovecha al máximo las tensiones internas de los materiales estructurales.

Otro punto de interés son los detalles constructivos, que no se han abarcado en este trabajo, como las diferentes uniones entre membranas, con cables, con mástiles o al suelo directamente. La simulación de los esfuerzos y la caracterización de la respuesta de la membrana ante ellos.

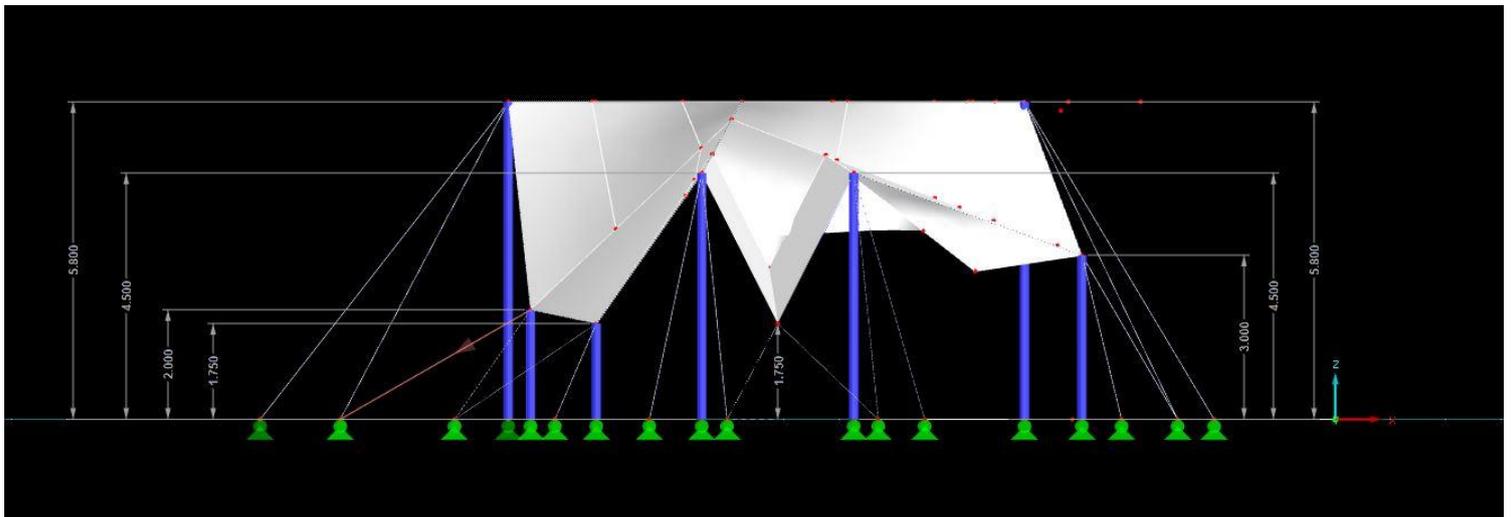
Por último y muy popular es la inclusión de paneles solares en esta tecnología, debido a su gran transmitancia térmica, estos paneles tienen muchas posibilidades para su colocación.

06. Anexos

Medidas y plano de la estructura final:



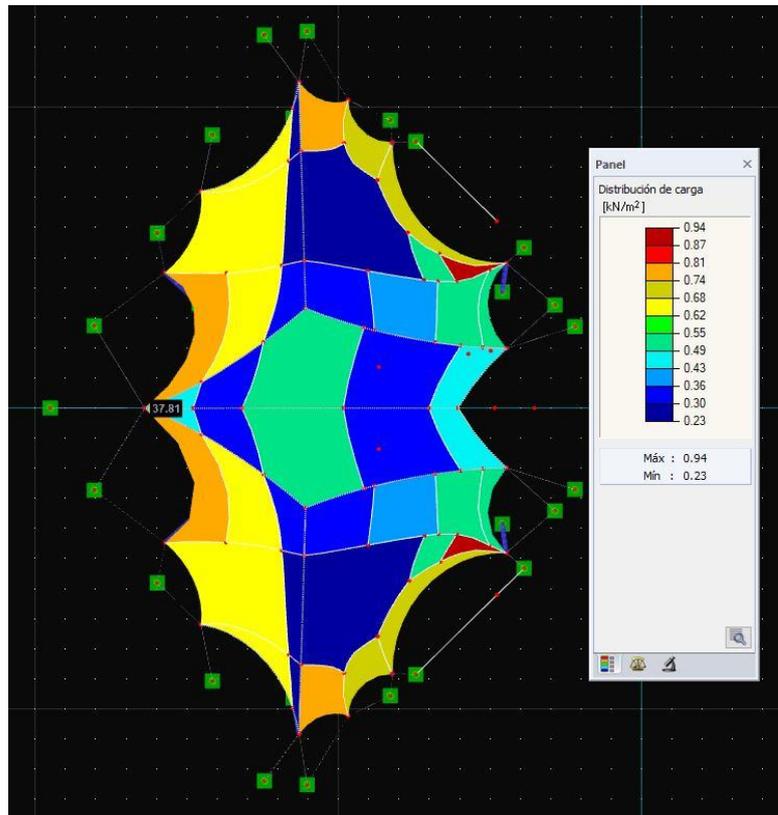
Plano 2 Acotación en planta de los apoyos



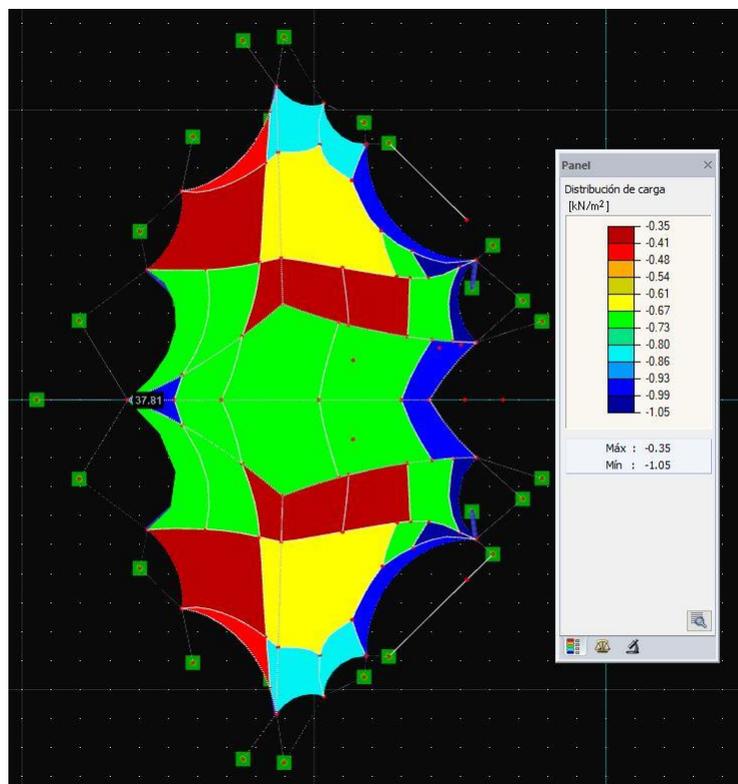
PLano 1 acotación en altura

Distribuciones de la carga de viento :

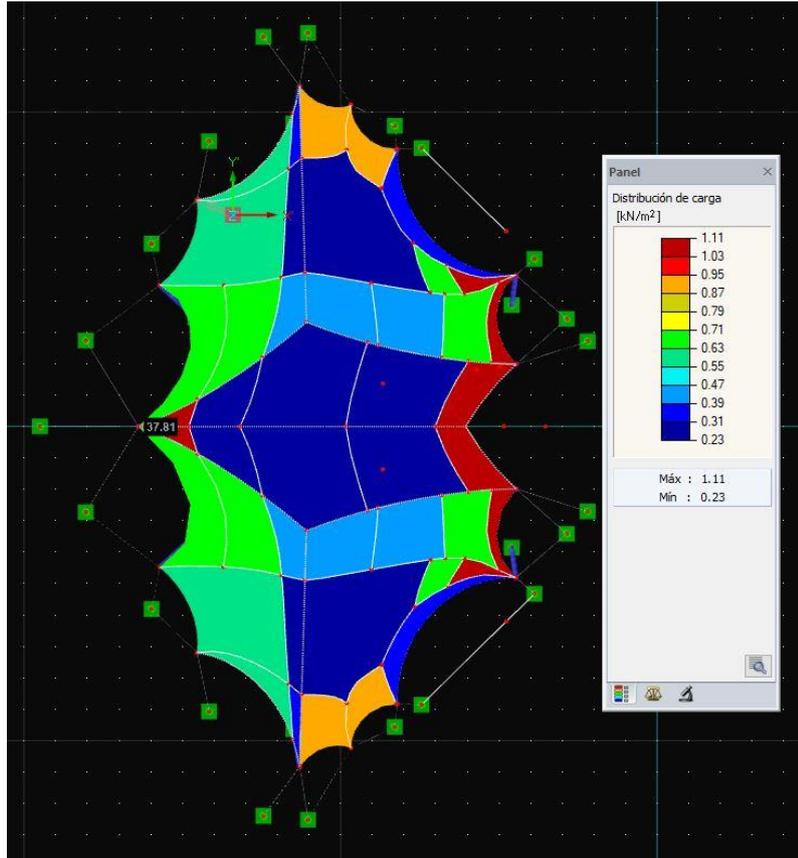
Carga del viento en dirección X, Presión:



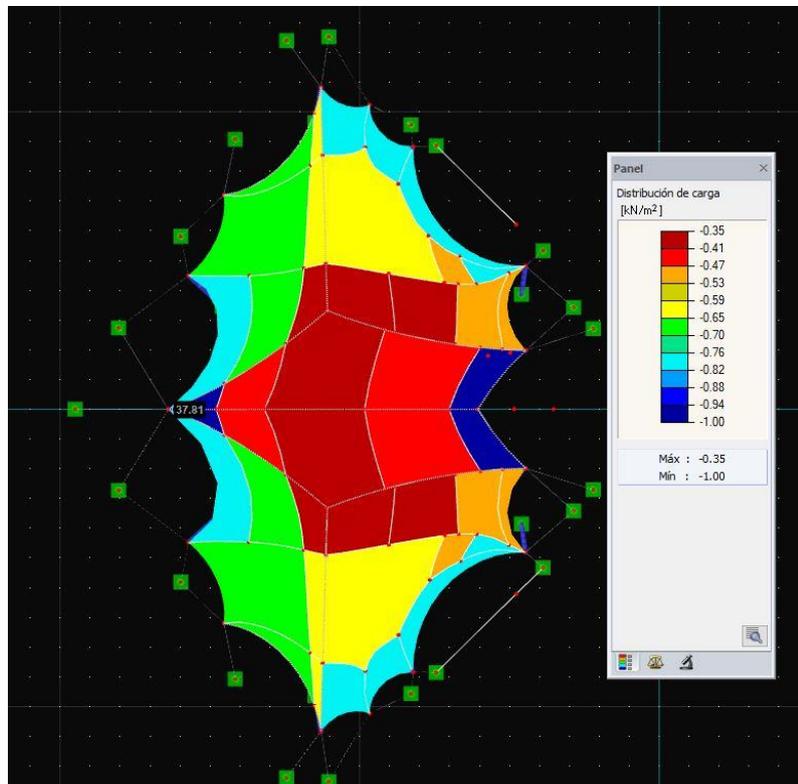
Carga del viento en dirección x, Succion:



Carga del viento en dirección Y, Presion:

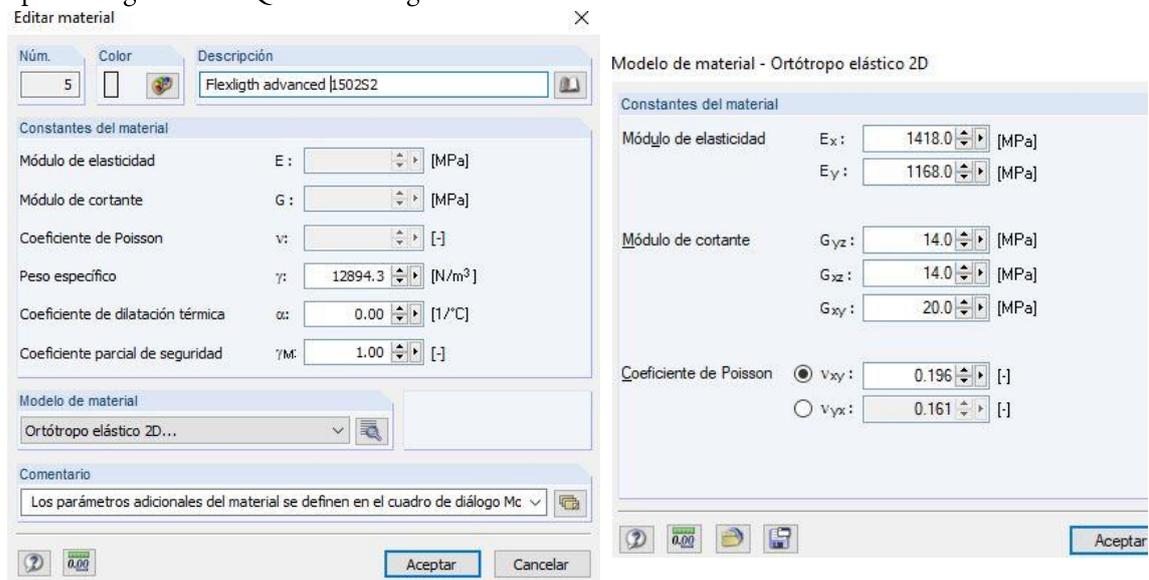


Carga del viento en dirección Y, Succion



Material de la membrana

Los valores introducidos en la interfaz de RFEM provienen de los datos proporcionados por la empresa Serge Ferrari. Que son los siguientes:



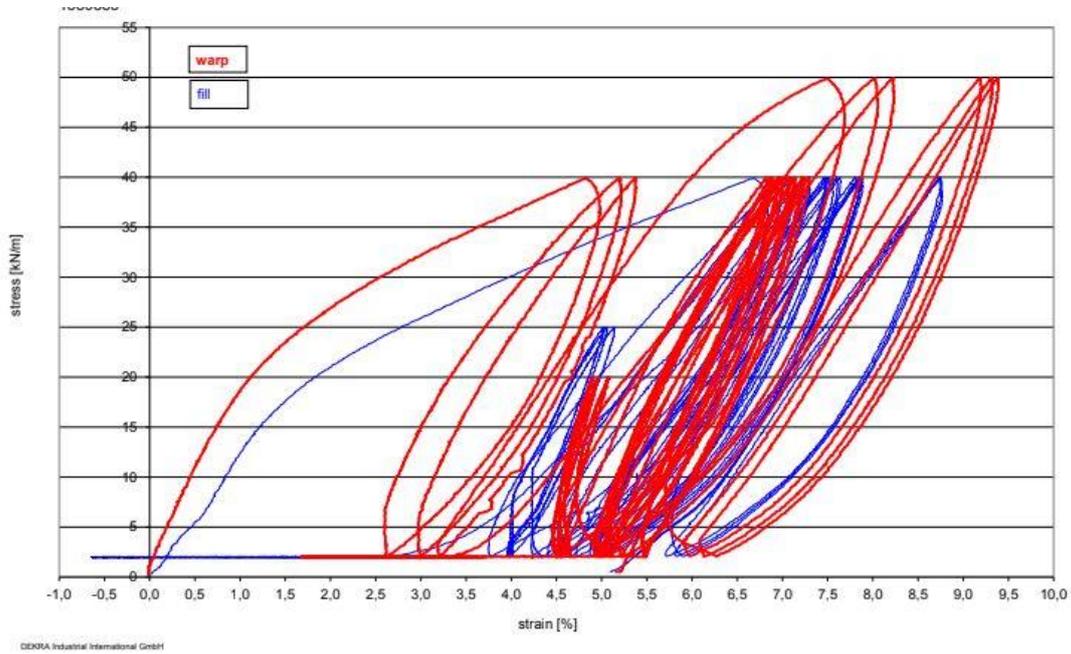
	■ Características técnicas	Normas
Tratamiento de superficie (derecho/revés)	S2 PVDF / PVDF	
Hilo	Poliéster de alta tenacidad 1670/2200 Dtex Tratamiento anti-capillaridad Low-wick	
Peso	1500 g/m ²	EN ISO 2286-2
Ancho	180 cm	
■ Propiedades físicas		
Resistencia a la tracción (urdimbre/trama)	1000 / 800 daN/5 cm	EN ISO 1421
Resistencia al desgarro (urdimbre/trama)	160 / 140 daN	DIN 53.363
Adherencia	15 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	1.14 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	16 dBA	ISO 140-3 & ISO 717-1
■ Propiedades óptico-solares		
Transmisión de luz visible (Tv)	7 %	NFP 38511
	3 %	EN 410
Reflexión de luz visible (Rv)	89%	
Transmisión Solar (Ts)	4%	
Reflexión Solar (Rs)	81%	EN 410
Factor Solar (g)	8%	

De aquí obtenemos el peso específico: $1.14\text{mm} \cdot 1500\text{g/m}^2 = 1.71\text{g/m}^3 \rightarrow 1.71\text{g/m}^3 \cdot 9.8\text{m/s}^2 = 12894\text{N/m}^3$

Y el valor de la tensión máxima a tracción: $1000\text{daN}/5\text{cm} \rightarrow 2000\text{N}/\text{cm} / 0.114\text{cm} = 17.54\text{KN}/\text{cm}^2 = 175.4\text{MPa} \rightarrow \text{coef de seguridad de } 6 \rightarrow 29.24\text{MPa}$

De las gráficas que nos proporcionan podemos obtener la relación de tensión y deformación, el módulo de Young, de la trama y la urdimbre:

La inclinación de las curvas es el valor que escogemos para aproximar su comportamiento a uno lineal

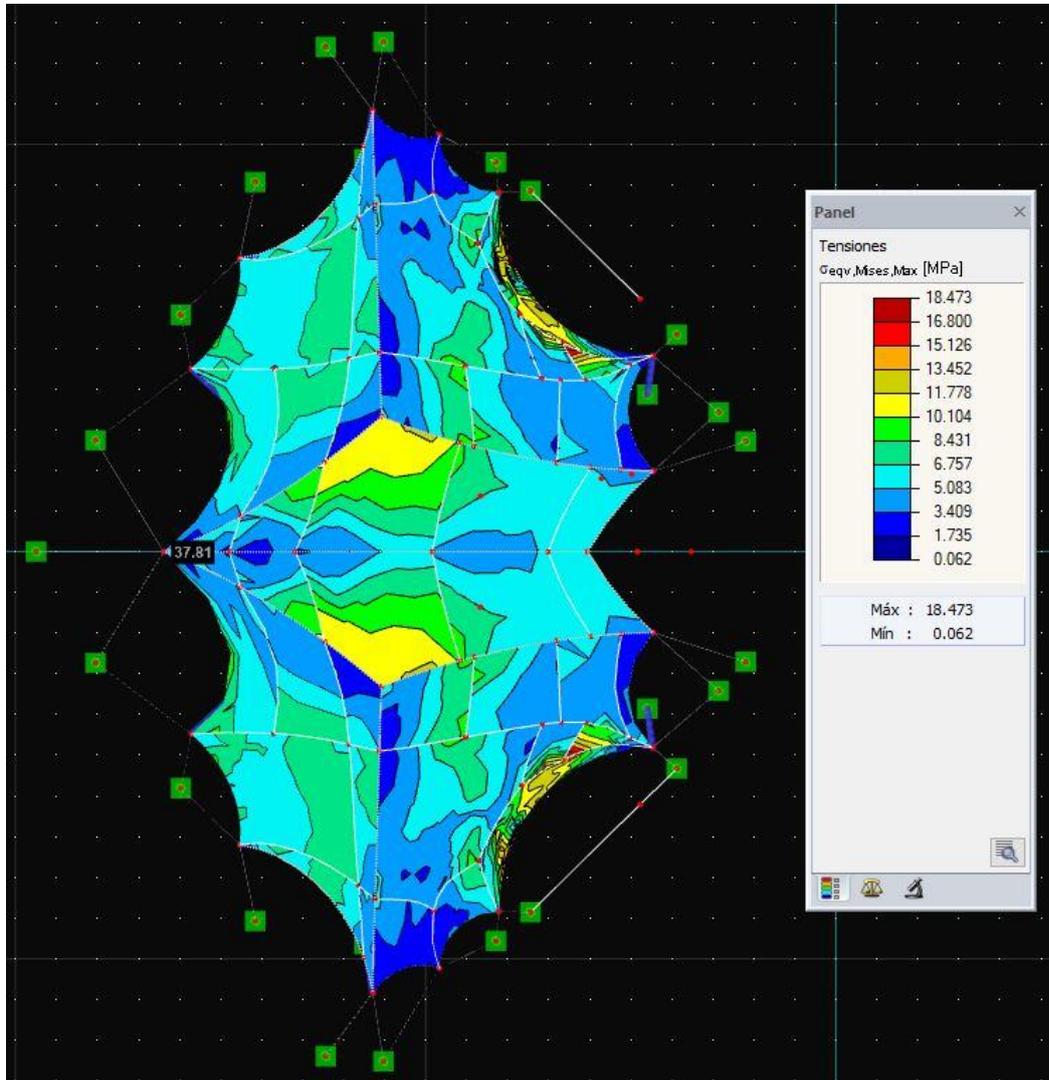


También el fabricante unos valores ya calculados:

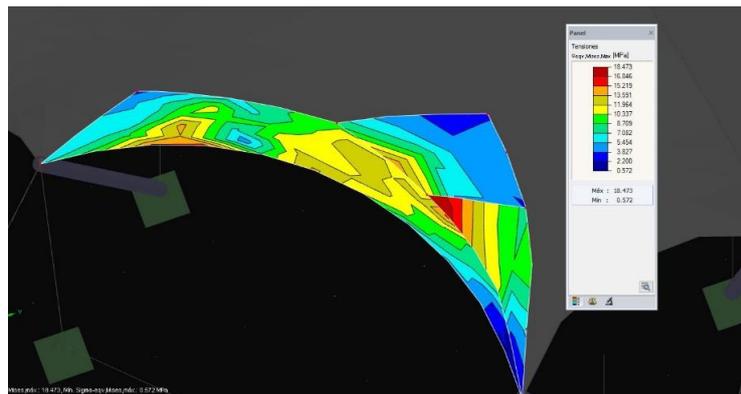
1502T2 1 of 3	1418	1168	0.65	0.44
1502T2 2 of 3	1354	1270	0.61	0.48

Mapas de tensiones en la membrana:

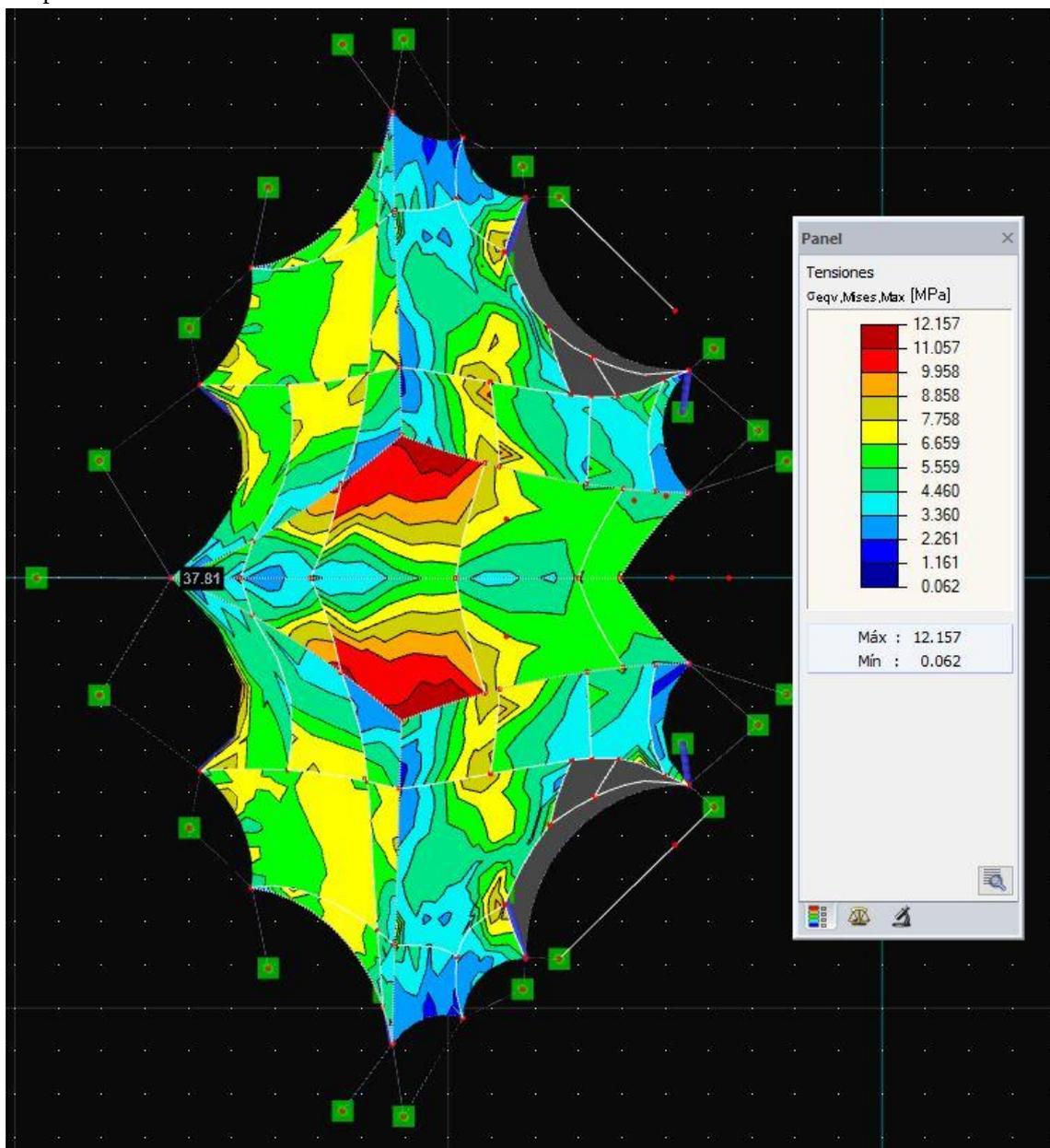
Caso de Combinacion 13: Nieve predominante + viento en y, presión simultáneamente



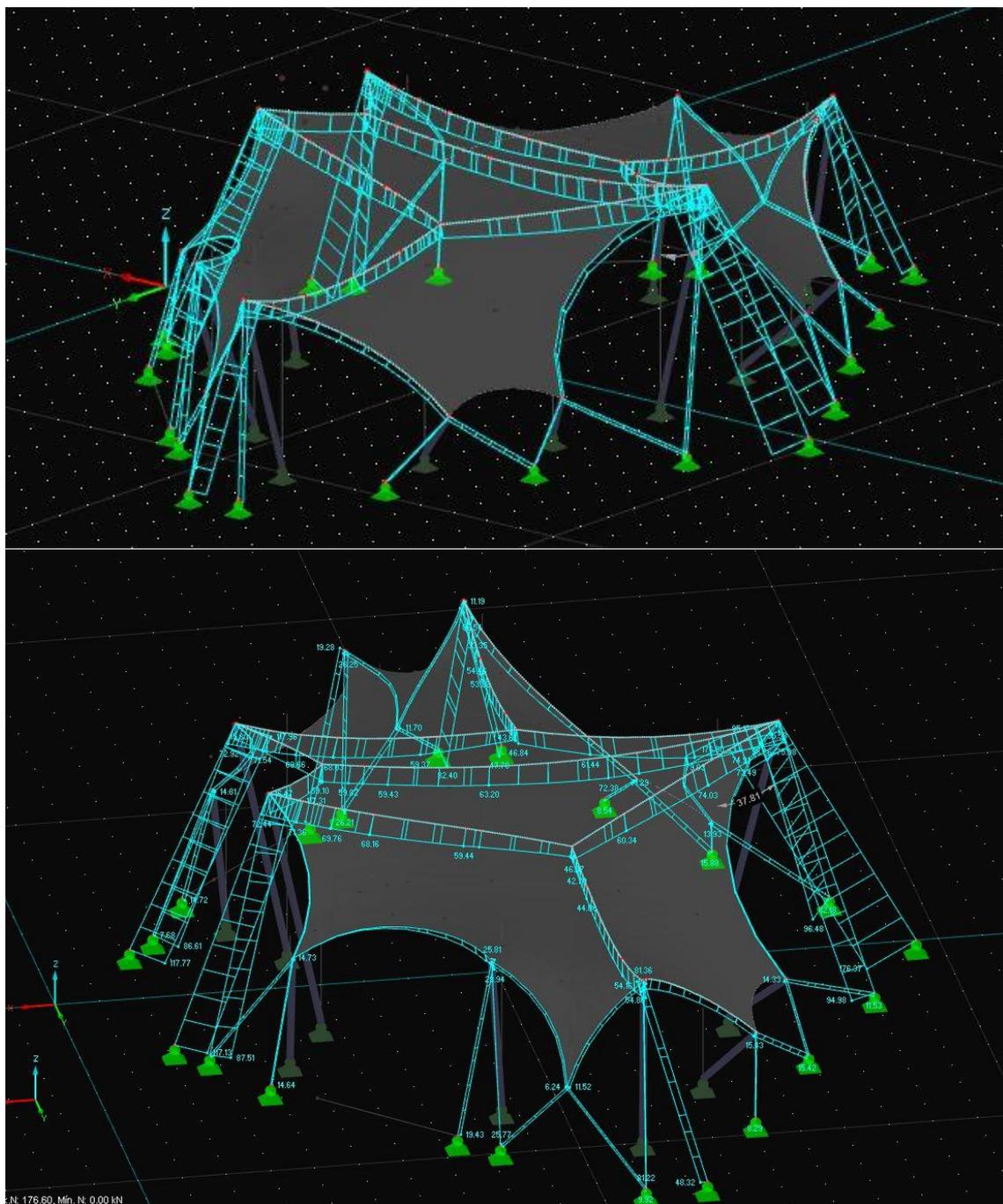
Mapa de tensión, con detalle ampliado del sector en el que se crean concentradores de esfuerzos



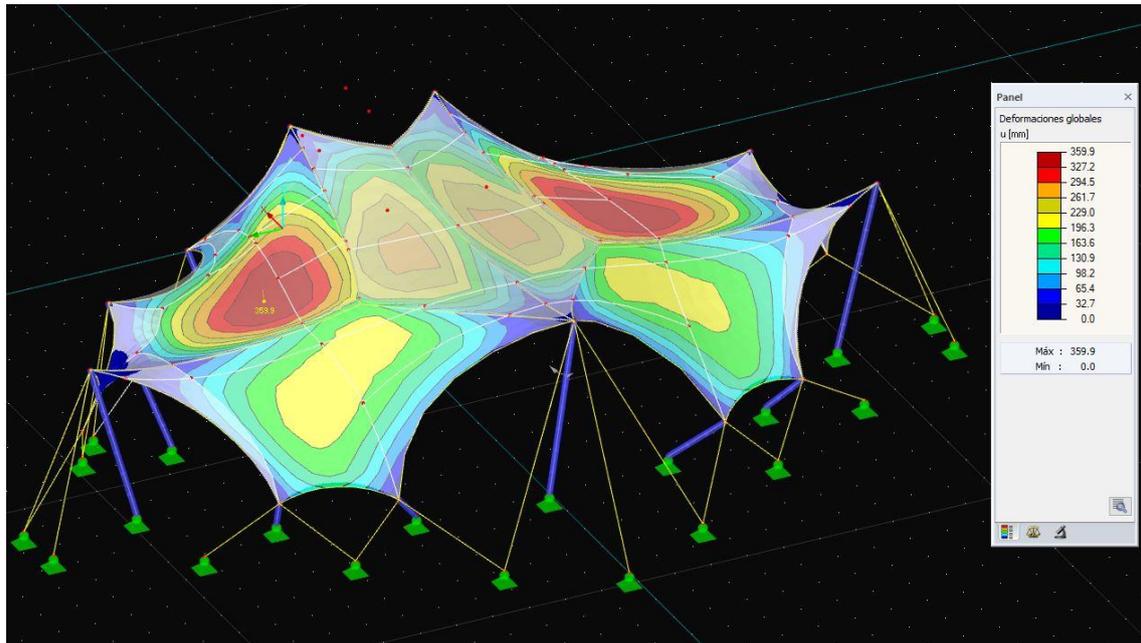
Mapa de tensiones con los concentradores de esfuerzos ocultos.



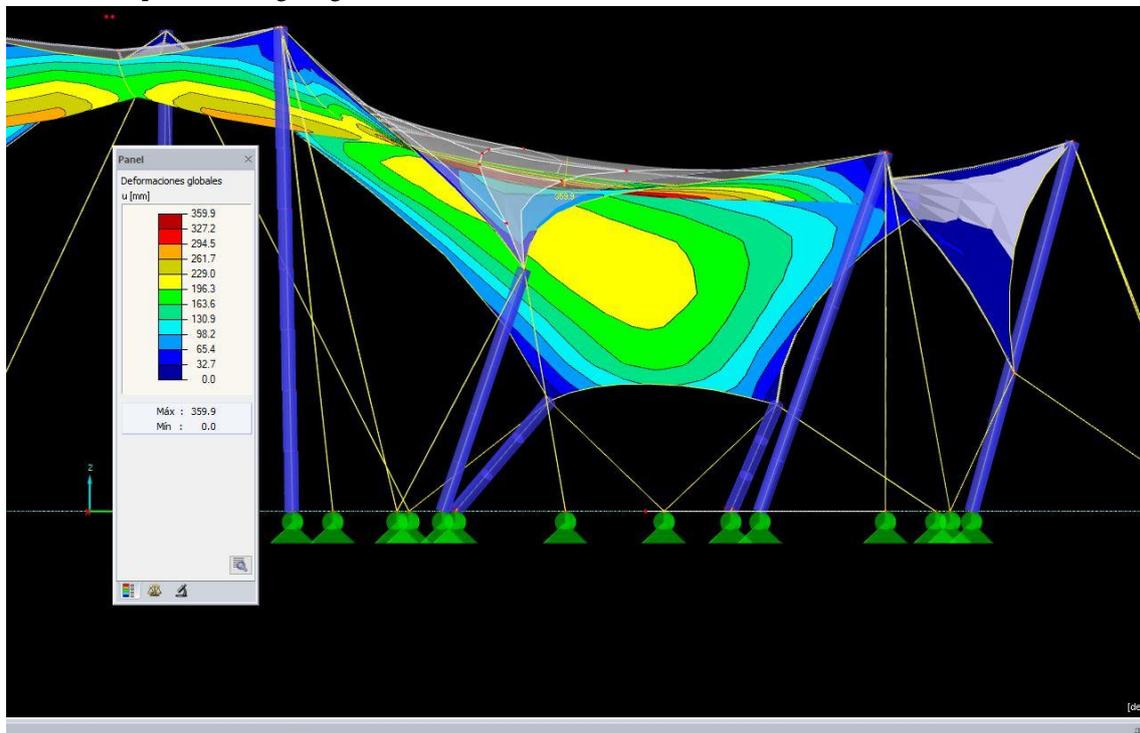
Diagramas de esfuerzos axiales en los cables de la estructura.



Campo de desplazamientos en la membrana para la combinación de acción 17: ELS



Detalle sobre como aun deformada en el punto más hundido de la membrana, hay suficiente inclinación para desahogar aguas.



07. Bibliografía

Libros, revistas y artículos

“La arquitectura textil” Juan Mojo Carrio.

“Los detalles constructivos de las tenso estructuras.”, José Ignacio de Llorens Duran.

“Tenso-estructura de cubierta”, Ezael Pedroza.

“Superficies sinclásticas y anticlásticas”, Tonio Retana.

“Estudio y aplicación de superficies curvas en el patrimonio arquitectónico”. Jose Antonio, Gonzalez Casares.

“Fachadas textiles: sistemas constructivos con láminas de ETFE”, Julio Viejo Romero-Mazariegos.

“Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tenso-estructura”, Carlos César Morales-Guzmán

“Introducción a las estructuras textiles”, Universidad politécnica de Cataluña.

“Construir con membranas”, Javier Tejera Parra(tectónica 36)

“Materiales 2: Arquitectura Textil”, Benito Lauret Aguirregabiria, Universidad politécnica de Madrid.

“Tensoestructuras”, Luis Alberto Marroquin Rivera.

“Arquitectura textil, ETFE”, Rodrigo Miranda Rojas.

“Orientacion estructural”, Piero Milenko Morales Trujillo.

Tesis, trabajos fin de carrera:

“Análisis teórico-experimental de estructuras membranales”. Raul Vallecillo Ascariz.

“Membranas Textiles. Construcciones flexibles, sutiles raptos de luz”, Valentina Quivira Catalan.

“Diseño y cálculo de una cubierta de barras y membranas tensadas para un estadio.”, Eloy Torrecilla Gomez.

“Membranas para estructuras superficiales tensadas”, Mercedes Cerda Talón.

“Arquitectura tensada, evolución y aplicaciones”, Jhon Hincapie Lopez.

“Diseño y cálculo de una cubierta de barras y membranas tensadas para un estadio.”, Carmen Escaned Canalis.

“Fundamentos en la morfogénesis de las tensoestructuras. Membrane House”, Beatriz Arnaiz Barrio.

“Diseño y análisis estructural de un mirador de estructura mixta acero-hormigón en voladizo, atirantado a un mástil de hormigón armado”, María Ruiz Zarza.

“Estudio sobre la arquitectura textil. Caso concreto: Anteproyecto de cubrición de la plaza de toros de Alicante”, Carlos Antona Moltó.

“Fachadas activas, Estudio de la fachada con membrana textil como segunda piel”, Natalia Bublik Abufon.

WEBS:

IASO: <https://www.iasoglobal.com/es-ES>

Serge Ferrari: <https://www.sergeferrari.com/es-es>

Wintess3: <http://blogwintess.blogspot.com/>

Dlupal: <https://www.dlupal.com/>

Foro Plataforma Arquitectura: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl>

Estididesign: <http://www.etsididesign.com/>

Archi Expo: <https://www.archiexpo.es/>

Universidad de Zaragoza: <https://zaguan.unizar.es/>

Universidad politécnica de Cataluña: <https://upcommons.upc.edu/>

Macalloy: <https://macalloy.com/>

Acerinox: <https://www.acerinox.com/es/>

Codigo Tecnico de Edificación: <https://www.codigotecnico.org/>

Foro Solo Arquitectura: <https://www.soloarquitectura.com/>

TCT Tensoestructuras: <https://www.tct.mx/>

Tenso-Estructuras: <https://tenso-estructuras.com/>

WAGG: <https://wagg.com.ar/>

Puntos de Arquitectura: <https://www.puntosdearquitectura.com/>

Apuntes de Arquitectura: <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/>

Instituto avanzado de arquitectura de Cataluña: <https://www.iaacblog.com/>

Pfeifer: <https://www.pfeifer.info/es/home/>

Archello: <https://archello.com/es>

Mehler tex-nologies: <https://www.mehler-texnologies.com/>

Sergatex: <https://sergatex.cl/>

Scielo chile: <https://www.scielo.cl/>

Verseidag: <https://www.verseidag.de/>

Saint cobain: <https://www.sheerfill.com/>

Arquitectura viva: <https://arquitecturaviva.com/>

Arquitectura Textil: <https://www.arquitecturatextil.com/>

Lastra y Zorrilla: <http://www.arquitextil.net/>

Ateca Trabajos Verticales: <https://atecatrabajosverticales.es/>

Tecnología de los plásticos: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/>

Rarquitectura: <https://rarquitectura.wordpress.com/>

Tectonica: <https://tectonica.archi/>

Obras expansión: <https://obras.expansion.mx/>

Arquitectura Reciente: <http://arquitecturareciente.blogspot.com/>

Archdaily: <https://www.archdaily.mx/>

Samyn and partners : <https://samynandpartners.com/>

Asombrosa Arquitectura: <http://asombrosaarquitectura.blogspot.com/>

Tensaform: <http://www.tensaform.com/>

08. Indice de figuras

Fig. 1 Exterior Palacio de la minería en Ciudad de México	6
Fig. 2 Interior Palacio de la minería en Ciudad de México.....	6
Fig. 3 Cubierta metálica y de policarbonato.....	6
Fig. 4 Cubierta de hormigón.	6
Fig. 5. Tienda beduina	7
Fig. 6. Velarium en el Coliseo Romano	7
Fig. 7 Carpa de Circo en Elche.....	7
Fig. 8 Cilindro. Geometría de curvatura simple.....	8
Fig. 9. Hiperboloide. Geometría antíclastica.....	8
Fig. 10 Elipsoide. Geometría Sinclastica.	8
Fig. 11 Modelo de membranas de jabón de estructuras tronco conoides	8
Fig. 12 Modelo de membranas de jabón estructuras de paraboloides hiperbólicas.	8
Fig. 13 Geometría sinclastica, cúpula esférica.....	9
Fig. 14 Estructuras neumáticas. Izq., baja presión. Der. Alta presión.	9
Fig. 15 Relacion de la tensión tangencial con el radio de curvatura y la presión interna.....	9
Fig. 16 Geometría antíclastica formada por cojinetes.	10
Fig. 17 Geometría sinclastica formada por cojinetes. Cupula del Milenio, Valladolid.	10
Fig. 18. Esquema del sistema de inflado de los cojinetes.....	10
Fig. 19 Sistema inflado en los cojinetes, Conductos de regulación de presión.....	10
Fig. 20 Junta entre Fachada y cubierta.....	11
Fig. 21 Vista exterior Allianz Arena.	11
Fig. 22 Detalle Constructivo, envolvente de la cubierta y fachada.	11
Fig. 23 Detalle constructivo de los cojinetes de ETFE.....	11
Fig. 24 Vista exterior Khan Shadyr, Kazajistan.	12
Fig. 25 Union del trípode al anillo superior de la envolvente.....	12
Fig. 26 Base del Trípode, anclajes articulados en una dirección.....	12
Fig. 27 Conoide	13
Fig. 28 Paraboloides de revolución.....	13
Fig. 29 Velaria o Paraboloides Hiperbolicos.	13
Fig. 30 Cable infinitamente tensado	13
Fig. 31 Cable horizontal flectado.....	13
Fig. 33 Punto estabilizado por 4 cables.	14
Fig. 34 Punto estabilizado por 3 cables.	14
Fig. 35 Cable y familia de cables estabilizadores.....	14
Fig. 36 Entramado de cables estabilizados.....	14
Fig. 37 Cubierta ligera en la estación intermodal de las palmas.	15
Fig. 38 Detalle constructivo del apoyo de uno de los mástiles.	15
Fig. 39 Esquema del equilibrio de los mástiles.	15
Fig. 40 Vista exterior del Edificio M&G Ricerche	16
Fig. 41 Esquema de los apoyos de los arcos.....	16
Fig. 42 Boceto del perfil del edificio.	16
Fig. 43 Vista frontal de la cubierta del centro de innovación Skysong.....	17
Fig. 44 Vista superior de la tensoEstructura	17
Fig. 45 Tenso- estructura en el parque botánico de Huesca.....	18
Fig. 46 Pergola Frente Fluvial, Expo Zaragoza.....	18

Fig. 47 Algodón hilado.....	19
Fig. 48 Fibra de vidrio.....	19
Fig. 49 PES a través de un microscopio	19
Fig. 50 Entrelazado simple.....	20
Fig. 51 Entrelazado doble o Panama.....	20
Fig. 52 Tejido de fibra de vidrio en sarga.....	20
Fig. 53 Tejido Superpuesto.....	20
Fig. 54 Diferencia en la disposición de los hilos.....	21
Fig. 55 Ensayo de tracción de la urdimbre.....	21
Fig. 56 Ensayo de tracción de la trama.....	21
Fig. 57 Ensayo uniaxial de tracción.....	22
Fig. 58 Curva tensión/deformación no lineal.....	22
Fig. 59 Curvas representativas del ensayo de carga cíclica de tracción de la membrana flexlight 1502S2.....	22
Fig. 60 Efecto sombrilla como forma de ventilación.....	23
Fig. 61 Efecto invernadero como forma de evitar la pérdida de calor.....	23
Fig. 62 Transmisión de calor mediante radiación en un sistema de doble capa.....	23
Fig. 63 Membrana aislante termo-acustica.....	24
Fig. 64 Incidencia de la radiación solar en una membrana.....	24
Fig. 65 Proceso de reciclaje Polyloop	25
Fig. 66 distribución del impacto ambiental.....	26
Fig. 67 Tejido sin tratamiento Low-wick.....	27
Fig. 68 Tejido Con tratamiento de Low-wick.....	27
Fig. 69 Esquema membrana PES+PVC.....	27
Fig. 70 Soldadura de dos membranas.....	28
Fig. 71 Tabla de propiedades Gama Valmex Mehatop.....	28
Fig. 72 Proceso de producción de la fibra de vidrio.....	29
Fig. 73 Edificio Magical en LLeida. Fachada de fibra de vidrio+PTFE.....	30
Fig. 74 Propiedades de las membranas de Fibra de vidrio+PTFE del gama de Sheerfill, distribuida por el fabricante Saint-Cobain	30
Fig. 75 estructura del ETFE.....	31
Fig. 76 Exterior del Parque botánico EDEN.....	31
Fig. 77 Interior Parque zoológico Arnheim.....	31
Fig. 78 Curva Tensión/deformación del ETFE.....	32
Fig. 79 Esquema esfuerzos en un cojinete	32
Fig. 80 Centro comercial Arena Multiespacio, Valencia.....	33
Fig. 81 Imagen del Bar/Terraza Villa Feliche. (Izq) Local (Der) cubierta exterior.....	36
Fig. 82 Planta sobre la que se va a trabajar	36
Fig. 83 Alzado 1º Modelo.....	37
Fig. 84 Planta 1º Modelo	37
Fig. 85 Reacción de la membrana ante la carga de nieve.....	37
Fig. 86 Union de los 3 mastiles mediante el cable cumbrera.....	38
Fig. 87 Modelo intermedio apoyado por líneas de nivel con un incremento de 10 cm.	38
Fig. 88 Forma final, visibilidad de los apoyos y cables interiores. Elaboración propia.....	38
Fig. 89 Forma final de la cubierta.....	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 90 Mástil comprimido por cables a tracción.....	40
Fig. 91 Diferencia de momentos entre un apoyo articulado y empotrado.....	40
Fig. 92 Diferencia de cortantes entre un apoyo articulado y empotrado.....	40
Fig. 93 Aplicación cargas de Nieve.....	42

Fig. 94 Aproximación mediante lajas de la inclinación del modelo.....	43
Fig. 95 Líneas de inclinación del modelo.....	43
Fig. 96 Aplicación de las cargas de viento en la sección interior de la membrana.....	43
Fig. 97 Esquema estados limites genéricos	44
Fig. 98 Evolución de los desplazamientos máximos de la membrana al aumentar la pretensión. CO17: ELS nieve predominante y simultaneidad de viento Y presión	47
Fig. 99 Evolución de la tensión máxima en la membrana al aumentar la pretensión. CO13: ELU nieve predominante y simultaneidad de viento Y presión.....	47
Fig. 100 Forma con pretensión 0.8 MPa	47
Fig. 101 Forma con pretensión 1.25 MPa	47
Fig. 102 Pico de tensiones en la membrana , en la luz de la puerta lateral y axil del cable unido (40KN-12KN).....	48
Fig. 103 Esquema deformaciones genéricas de una membrana y un cable.	48
Fig. 104 Disposición exterior cable.....	48
Fig. 105 Perfil de la cubierta.....	50
Fig. 106 Alzado de la cubierta.....	50