



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autora | Mercedes Cerdá Talón

Titulación | Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Tutor | José María Vercher Sanchis

Fecha | 2018 - 2019 · Octubre

MEMBRANAS PARA ESTRUCTURAS SUPERFICIALES TENSADAS



MEMBRANAS PARA ESTRUCTURAS SUPERFICIALES TENSADAS

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autora | Mercedes Cerdá Talón

Titulación | Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Tutor | José María Vercher Sanchis

Fecha | 2018 - 2019 · Octubre



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Resumen

El presente trabajo surge del interés sobre las estructuras superficiales tensadas, sistema constructivo que presenta diversas aplicaciones y ventajas notables. En él se estudian las propiedades, funcionamiento, y prestaciones de distintos materiales de membranas aptos para el sistema constructivo de estructuras tensadas, con el objetivo de formar un criterio para escoger el que mejor satisfaga las exigencias de un proyecto.

Para ello, se ha realizado una clasificación de dichos productos desde el punto de vista de la materialidad, entendiendo que su comportamiento en estructuras tensadas depende fundamentalmente del grupo de materiales al que pertenecen. Se ha focalizado, además, en tres materiales a los que se recurre actualmente con mayor frecuencia, que son, poliéster recubierto de PVC, fibra de vidrio y ETFE. La aplicación de cada uno de ellos será más o menos adecuada atendiendo a las características propias de cada proyecto y a las conclusiones extraídas de este estudio.

Palabras clave

Estructuras superficiales tensadas. Arquitectura textil. Membrana. Tejido.

Resum

El present projecte sorgeix de l'interès sobre les estructures superficials tensades, sistema constructiu que presenta diverses aplicacions y avantatges notables. En ell, s'estudien les propietats, funcionament i prestacions de diversos materials de membrana aptes per al sistema constructiu d'estructures tensades, amb l'objectiu de formar un criteri per a triar el que millor satisfaga les exigències d'un projecte.

Per a això, s'ha realitzat una classificació d'aquests productes des del punt de vista de la materialitat, entenent que el seu comportament en estructures tensades depèn fonamentalment del grup de materials a què pertanyen. S'ha focalitzat, a més, en tres materials a què es recorre actualment amb major freqüència, que son, polièster recobert de PVC, fibra de vidre y ETFE. L'aplicació de cada un d'ells serà més o menys adequada atenent a les característiques pròpies de cada projecte i a les conclusions extretes d'aquest estudi.

Paraules clau

Estructures superficials tensades. Arquitectura tèxtil. Membrana. Teixit.

Abstract

The present work starts from the interest about tensile surface structures, which is a constructive system than presents several applications and prominent advantages. It studies the properties, operation and uses of some materials of membranes suitable for the constructive system of tensile structures, with the purpose of forming a criterion to choose the one that best satisfies the requirements of a project.

For this purpose, a classification of these products has been made, from the point of view of materiality, understanding that their behaviour in tensile structures depends principally on the group of materials to which they belong. Moreover, it has focused on three materials that are currently used most frequently, which are, PVC-coated polyester, fiberglass and ETFE. The application of each one of them will be more or less appropriate depending on the individual characteristics of each project and the conclusions drawn from this study.

Keywords

Surface tensile structures. Tensile architecture. Membrane. Fabric.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	9
3. ESTRUCTURAS SUPERFICIALES TENSADAS	11
3.1 VENTAJAS	11
3.2 APLICACIONES	12
3.3 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES Y PRODUCTOS	15
3.4 MEMBRANAS PARA ESTRUCTURAS SUPERFICIALES TENSADAS	16
3.4.1 TIPOS DE PRODUCTOS	16
3.4.2 PROPIEDADES	17
4. MEMBRANAS DE ETFE	21
4.1 PROPIEDADES	21
4.2 PROCESO DE PRODUCCIÓN	24
4.3 CORTE Y UNIONES	24
4.4 PATOLOGÍA	25
5. MEMBRANAS DE TEJIDOS	27
5.1 PROPIEDADES	27
5.2 COMPOSICIÓN	31
5.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN	36
5.4 CORTE Y UNIONES	39
5.5 PATOLOGÍA	39
6. ENSAYOS TÉCNICOS	41
7. CONCLUSIONES	45

8. ANEXO	49
8.1 GLOSARIO	49
8.2 RESULTADOS DE ENSAYOS	50
9. INFORMACIÓN DE TABLAS	54
10. INFORMACIÓN DE FIGURAS Y VÍDEOS	55
11. REFERENCIAS	58
12. BIBLIOGRAFÍA	59

1. INTRODUCCIÓN

Como **arquitectura textil** se entiende el sistema constructivo que consiste en la colaboración de elementos superficiales, es decir, aquellos en que dos de sus dimensiones predominan sobre la tercera, independientemente de su material o de su colaboración con la estructura portante. No obstante, frecuentemente encontramos el término de arquitectura textil para referirse a **estructuras superficiales tensadas**, que son aquellas en las que los elementos superficiales funcionan a tensión. Estos elementos superficiales son normalmente membranas, aunque también se puede utilizar redes metálicas o textiles.

La arquitectura de estructuras tensadas persigue la vuelta a la arquitectura vernácula, primitiva, a la arquitectura de lo mínimo. Son muchas las culturas nómadas que a lo largo de la historia han recurrido a la construcción de estructuras tensadas: desde los tipis de las tribus de Norteamérica, las jaimas árabes o las tiendas de los beduínos, hasta los circos del siglo XIX, que incluyeron plásticos en los textiles para aportar al sistema de protección contra la lluvia. Los textiles permitían la facilidad constructiva y la reducción de la masa material (recursos mínimos). Con un solo elemento de espesores mínimos, inalcanzables con otros materiales, se

conseguía la protección solar, la evacuación de aguas y la protección del viento, además de la rapidez constructiva.

La evolución de las estructuras y de los materiales de los textiles permitió además la cubrición de grandes superficies. Las soluciones de grandes estructuras modernas presentan más parecido a las del sector de



Fig. 1.1 Tienda nómada. Imagen de Moa Corsi.

la náutica que a la arquitectura tradicional. Materiales como el ETFE o el nailon se desarrollaron previamente en la industria naval.

Hoy en día se mantiene la preocupación, como en otros sistemas constructivos actuales, sobre el ahorro energético, confort térmico y acústico, sostenibilidad, coste, durabilidad o apariencia y, a medida que estas exigencias aumentan, también lo hace la complejidad del sistema constructivo. No obstante, las estructuras de membranas tensadas siguen ofreciendo ventajas frente a la facilidad constructiva, entre otros aspectos, en comparación con los sistemas tradicionales.

La investigación y desarrollo industrial de los materiales para bases, tejidos, recubrimientos o acabados, permitirá la mejora del comportamiento de los productos

ya utilizados actualmente en estructuras tensadas, así como el desarrollo de nuevos productos que satisfagan necesidades aún no resueltas.

Este trabajo surge de la indagación sobre las ventajas y posibilidades de las estructuras tensadas, así como la pluralidad de productos ofrecidos por el mercado para este sistema, que hace necesaria la diferenciación de sus prestaciones.

Además, la colaboración de una empresa fabricante de membranas de PES-PVC (poliéster recubierto de PVC), que mostró sus instalaciones, ensayos técnicos y ha aportado información más extensa sobre sus productos, ha significado una motivación considerable para ahondar en éste y otros materiales utilizados en dicho sistema constructivo.

2. OBJETIVOS

En el siguiente estudio se analizan diferentes aspectos de materiales utilizados en estructuras superficiales tensadas. El trabajo parte de un punto de vista general, considerando todas las opciones posibles de materiales para estructuras tensadas. Luego, se hace un análisis más concreto de los materiales más comunes para esta función.

Aunque actualmente el mercado ofrece numerosos productos, se ha realizado una clasificación para entender su comportamiento teniendo en cuenta el grupo de materiales al que pertenecen. Así pues, se ha diferenciado entre tejidos, láminas y placas.

Además, se ha elegido dos materiales para tejidos y uno para láminas con el objetivo de hacer un estudio más específico. Así pues, se analizan aspectos de las láminas de ETFE, de las membranas de fibra de vidrio y de las membranas de poliéster recubiertas de PVC.

El ETFE es una lámina que presenta ciertas propiedades que lo convierten en el material más utilizado en edificios con usos diferentes a los típicos en estructuras

tensadas, como puede ser en edificios permanentes o que requieran mayores exigencias en cuanto a durabilidad o transmitancia óptica. La fibra de vidrio, un tejido entrelazado utilizado comúnmente, se utiliza en casos puntuales o en proyectos con algunas exigencias muy específicas. Por último, el material utilizado hoy en día en la mayoría de proyectos de estructuras tensadas, el poliéster recubierto de PVC, es también un tejido entrelazado.

Debido a que el uso del PES-PVC es, con diferencia, el más extendido y, por tanto, el más experimentado y del que más información se dispone, se ha visto conveniente incidir en el estudio de aspectos de este material en concreto. No obstante, cabe recordar que el mercado ofrece un gran abanico de materiales también válidos para estas estructuras.

El conocimiento de las propiedades, funcionamiento y prestaciones de estos materiales y su posterior comparación servirá de base para la elección del material óptimo para cada proyecto, dependiendo de las exigencias propias de éste.

3. ESTRUCTURAS SUPERFICIALES TENSADAS

Como se aclara en el capítulo anterior, el término “estructuras superficiales tensadas” es más preciso para referirnos al objeto que nos ocupa en este trabajo. Así pues, no se hace referencia a elementos de arquitectura textil sino, concretamente, a elementos que funcionan a tensión.

En este capítulo se estudia, en general, las ventajas y aplicaciones de los distintos materiales y productos utilizados en estructuras superficiales tensadas y, más específicamente, de las membranas.

3.1 VENTAJAS

Los materiales empleados en membranas estructurales deben satisfacer todos los requisitos de una cubierta o cerramiento tradicional, manteniendo sólo una parte de la masa, volumen y coste. Estos requisitos incluyen, entre otros, cobertura y protección contra agentes externos, impermeabilidad y hermetismo, resistencia al fuego, durabilidad, confort acústico y térmico, transmitancia óptica y facilidad de limpieza.

Estructuras superficiales tensadas

- Capacidad de cubrir grandes luces
- Libertad formal
- Fácil transporte
- ↓ Tiempo de montaje
- ↓ Peso propio
- ↑ Resistencia a tensión
- ↓ Coste
- ↓ Consumo y desperdicio de materiales
- Pueden tener alta transmitancia óptica y térmica:
 - | Aportación al ahorro energético
 - | Posible sustituto del vidrio
- Sostenibles:
 - ↓ Consumo y desperdicio de materiales
 - ↓ Energía necesaria para la producción del m²
- Reciclable
- Numerosas aplicaciones
- Seguridad riesgo sísmico

Tabla 3.1 Ventajas del sistema constructivo de las estructuras tensadas. Fuente: Elaboración propia.

3.2 APLICACIONES



Fig. 3.1 Envoltente de PES-PVC en el Millennium Dome, Londres. Imagen propia.

CERRAMIENTO / CUBIERTA

El uso más extendido en cuanto a estructuras superficiales tensadas se refiere es el de cerramiento y cubierta, ya que el sistema constructivo permite que el mismo elemento configure ambas partes de la envolvente de un edificio. Por ello, las membranas utilizadas como envolvente deben satisfacer las mismas exigencias de estabilidad, estanqueidad y aislamiento que las cubiertas o cerramientos tradicionales.



Fig. 3.2 Placas de PMMA en el Estadio olímpico de Múnich. 1968-1972. Frei Otto Imagen de Jorge Royan.

CUBRICIÓN DE ZONAS EXTERIORES

También es muy común la aplicación de estructuras tensadas de membranas en espacios exteriores. Pueden funcionar como elemento de sombreado o como protección de la lluvia y el viento. Es habitual en estadios abiertos al aire libre, donde queda una gran superficie de gradas expuesta a la intemperie y la radiación solar.

CONTROL SOLAR

Los cerramientos de vidrio, por su alta transmitancia de la radiación, requieren ocasionalmente protección solar, que puede consistir en membranas colocadas en el exterior del cerramiento o en su interior. Si se colocan en el exterior, se puede considerar como un elemento esencial en la composición de la fachada. Para el control solar, normalmente se utilizan membranas de PES-PVC cuyo patrón de tejido deja un hueco entre los hilos y el recubrimiento, de manera que se consigue una membrana más permeable.



Fig. 3.3 Membranas de PES-PVC conforman la fachada del Hospital de Cartagena. 2009. Imagen de IASO.



Fig. 3.4 Chimenea de membranas de ETFE en Cristalleries Planell. HARquitectes. Imagen de HARquitectes.

ACONDICIONAMIENTO HIGROTÉRMICO

La alta transmitancia térmica y óptica de las membranas de ETFE permite su empleo en sistemas pasivos de acondicionamiento higrotérmico. Un ejemplo de estos sistemas se puede encontrar en las chimeneas solares que funcionan por efecto venturi. Aunque el uso de este material en sistemas de acondicionamiento tan complejos no sea habitual, cabe tener en cuenta que su aplicación en cerramientos o cubiertas favorece las ganancias energéticas por radiación solar.

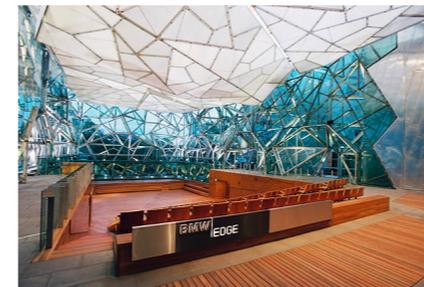


Fig. 3.5 Membranas de absorción acústica de ETFE. Barrisol MCBR-ETFE Barrisol. Imagen de Barrisol.

ABSORCIÓN ACÚSTICA

En espacios con ciertas funciones puede interesar un control exhaustivo de las condiciones acústicas. El comportamiento sonoro de las membranas depende de la estructura de su base y acabado. Para aumentar la absorción acústica de la envolvente de un espacio, se puede recurrir a membranas de hojas con microperforaciones.

ILUMINACIÓN

Los materiales para estructuras tensadas presentan distintos grados de transmitancia óptica que, según el efecto buscado, puede interesar emplear unos u otros. Las membranas translúcidas permiten la difusión de la luz, por lo que pueden funcionar como luminarias integradas en otros elementos arquitectónicos, como fachadas o techos.



Fig. 3.6 Membranas de fibra de vidrio en la fachada de Zenith Music Hall. Estrasburgo. Imagen de Fuksas.



Fig. 3.7 Membranas de PVC en restaurante Les Cols, RCR. Imagen de Pep Sau.

PARTICIONES INTERIORES

Por la flexibilidad de sus formas, las membranas permiten configurar particiones para generar espacios dentro de otros espacios. Para este fin, son válidos varios materiales. Su elección dependerá de las características del espacio que se quiera conseguir.



Fig. 3.8 Membranas de PVC en escultura Marsyas, Anish Kapoor. Tate Modern, Londres. 2002. Imagen de Tate Picture Library.

ARTE/DISEÑO

La flexibilidad formal y diversidad de materiales y acabados en membranas para estructuras tensadas hace que éstas sean un material versátil para su aplicación en obras artísticas o de diseño.

Las características de los diferentes materiales (transmitancia óptica, durabilidad, estructura,...) abren un abanico de posibilidades para la creación de esculturas u elementos de diseño.



Fig. 3.9 Silkchair, de Alvidesign. Imagen de Alvidesign.

MOBILIARIO Y EQUIPAMIENTOS

El sistema de estructuras tensadas también permite el diseño y construcción de otros elementos relacionados con la arquitectura, como son el mobiliario (sillas, hamacas,...), luminarias u otros equipamientos, o mobiliario urbano (bancos, esculturas,...), donde los textiles tensados funcionan como elemento estructural de la pieza.

3.3 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES Y PRODUCTOS

En los textos sobre estructuras tensadas, se encuentran frecuentemente clasificaciones de este sistema desde el punto de vista de su funcionamiento estructural o la forma de las estructuras (formas anticlásticas en estructuras tensoestáticas o formas sinclásticas en estructuras presostáticas). No obstante, en este trabajo nos ocupan las membranas empleadas en dicho sistema constructivo, por lo que se ha realizado una clasificación que atiende exclusivamente a las características generales de los materiales que las conforman.

Materiales para estructuras tensadas	
MEMBRANAS	REDES
<ul style="list-style-type: none"> • TEJIDOS ENTRELAZADOS • LÁMINAS • PLACAS 	<ul style="list-style-type: none"> • METÁLICAS • TEXTILES

Fig. 3.10 Clasificación de las estructuras tensadas en función del material del elemento superficial tensado. Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que el análisis se centra en las membranas, es decir, en los elementos superficiales continuos, también se pueden encontrar redes textiles o metálicas empleadas como elementos superficiales sometidos a tensión.

En cuanto a las membranas, cabe diferenciar su proceso de producción o su conformación. Así pues, encontramos placas, láminas o tejidos.



Fig. 3.11 Red textil en House for Contemporary Art Z33. Imagen de Numen.

Las membranas textiles están constituidas por una base o tejido al que se le aplica un recubrimiento y, normalmente, un acabado. Los materiales más utilizados dentro de este grupo son el PES-PVC (Poliéster recubierto de PVC) y la fibra de vidrio-PTFE (fibra de vidrio recubierta de Politetrafluoretileno) (ver cap. 8.1 *Glosario*).

Las placas o láminas se consiguen habitualmente por extrusionado y son productos relativamente lisos e isotropos (propiedad que, como se verá posteriormente, es fundamental para entender el funcionamiento de las membranas). Dentro de este subgrupo se utiliza comúnmente las láminas de ETFE o PVC o las placas de PMMA.

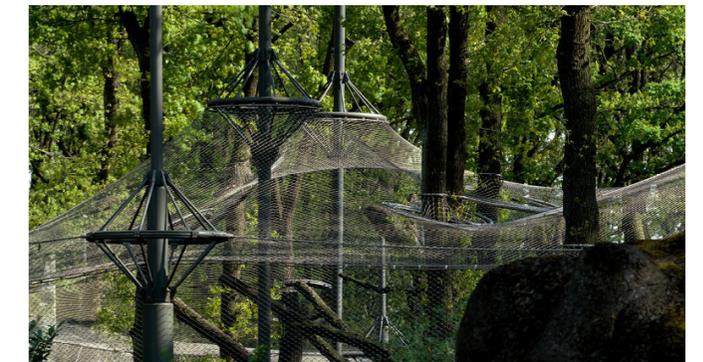


Fig. 3.12 Red metálica en el Burger zoo, Holanda, 2002. Imagen de Carl Stahl Architektur.

3.4 MEMBRANAS PARA ESTRUCTURAS SUPERFICIALES TENSADAS

3.4.1 TIPOS DE PRODUCTOS

A pesar de que en el apartado 3.2 *Aplicaciones* se muestran diversos materiales empleados en estructuras tensadas, para las aplicaciones mostradas se utilizan comúnmente tres de ellos, que son: PES-PVC, fibra de vidrio y láminas de ETFE. Por ello, en este trabajo se realiza un análisis más exhaustivo de estos tres productos.

No obstante, conviene no olvidar otros productos (u otros materiales utilizados como recubrimiento o acabado) también útiles para usos similares, como son las placas de PMMA, las láminas de PVC, los tejidos de aramidas, etc.

TEJIDOS ENTRELAZADOS					
Tejido base	Poliéster	Nailon	PTFE	HDPE	
Recubrimiento	PVC	PVC	PTFE	LDPE	
Acabado	Acrílico/ PVDF/ PVF	Acrílico/ PVDF/ PVF			
Tejido base	Fibra de vidrio	Fibra de vidrio	LCP	Aramidas	
Recubrimiento	PTFE	Silicona			
Acabado	FEP				
LÁMINAS					
Base	ETFE	PVC			
Recubrimiento	FEP				
PLACAS					
	PMMA	PVDF			

Tabla 3.2 Productos utilizados como membranas. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 PROPIEDADES

Las membranas funcionan normalmente tanto como estructura resistente del edificio, como cerramiento. No obstante, tradicionalmente su carácter de cerramiento quedaba en segundo plano por la temporalidad del uso que albergaban las construcciones realizadas con membranas. El propósito de extender el sistema constructivo de membranas a obras de uso más permanente, obliga a un mayor control térmico, acústico y lumínico, así como una mayor protección contra el fuego.

La siguiente tabla resume las propiedades de los materiales más utilizados en estructuras tensadas. Sin embargo, se muestran valores orientativos, que no corresponden a ningún producto en concreto ofrecido por el mercado sino a un tipo de membrana, con el fin de proporcionar un rango de valores para cada una de ellas.

Hay que tener en cuenta que estos valores pueden variar significativamente dependiendo de varios factores, como el espesor, el tipo de tejido, el recubrimiento o el formato de las piezas.

Las propiedades se explican con más detalle en el correspondiente capítulo de cada membrana. La transmitancia térmica, a pesar de ser una propiedad importante, no se considera en esta tabla ya que, como se explica en posteriormente, no es posible determinar el comportamiento térmico mediante un único valor de transmitancia, puesto que en sistemas de membranas tensadas influyen otros factores. Así pues, serán necesarios otros análisis y ensayos en condiciones próximas a la realidad para tener un conocimiento verídico sobre su comportamiento.

	PES-PVC Acrílico	PES-PVC PVDF	Fibra de vidrio- Silicona	Fibra de vidrio- PTFE	ETFE
RESISTENCIA A TRACCIÓN de trama/urdimbre (kN/m)	800 / 950	800 / 950	960 / 700	684/633	550
RESISTENCIA A DESGARRE de trama/urdimbre (kN/m)	115 / 100	115 / 100	100 / 100	100 / 100	200
MASA/unidad SUPERFICIE (g/m ²)	500 - 950	500 - 1300	500 - 1300	500 - 1300	200 - 350
TRANSMITANCIA ÓPTICA (%)	10-15	10-15	<80	10-20	85
COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO	Combustible No inflamable	Combustible No inflamable	No combustible	No combustible	Combustible No inflamable
AUTOLIMPIEZA	Baja ¹	Media	Media	Alta	Muy alta
EXPECTATIVA DE VIDA (años)	15 - 20	15 - 20	>25	>25	>25
COSTE (€/m ²)	3.5 - 5.5	5.5 - 11.5	50	55	30 - 120

(1) Necesita un tratamiento superficial

Tabla 3.3 Propiedades comparativas generales de membranas para estructuras tensadas. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades térmicas

El ambiente térmico difiere significativamente en estructuras de membranas y en edificios con sistemas constructivos tradicionales. Estas diferencias dependen tanto de los materiales de la membrana como del espacio que encierran.

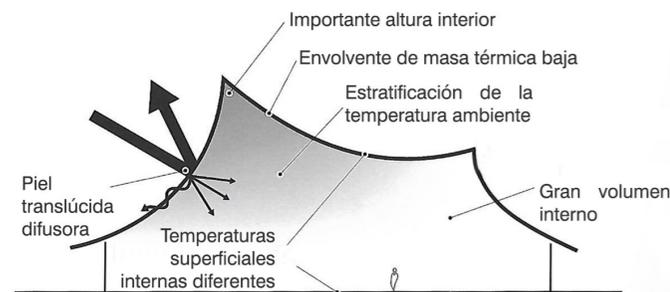


Fig. 3.13 Características de los cerramientos de membrana tensada. Imagen de Forster y Mollaert.

Los edificios de estructuras presentan un gradiente térmico mayor que las construcciones convencionales. La existencia de grandes volúmenes de aire en construcciones de este tipo, conlleva la acumulación de aire más caliente en los puntos altos de la estructura, dejando el aire más frío en las partes más bajas o más ocupadas. Este fenómeno se incrementa durante el día, cuando incide la radiación solar (durante la noche se invierte, al disminuir la temperatura exterior).

Esta diferencia de temperatura en el cerramiento genera corrientes de convección en todo el volumen de aire encerrado que provocan a su vez una distribución no uniforme de temperaturas, dificultando la predicción de las condiciones térmicas interiores.

En sistemas constructivos tradicionales, la resistencia térmica consiste sobre todo en resistencia a la conducción, que se consigue aumentando la masa térmica y añadiendo materiales de conductividad térmica baja.

No obstante, la escasa masa de las membranas hace que ésta presente una reducida inercia térmica. Las mediciones han mostrado que la diferencia de temperatura entre las dos superficies opuestas de una sola piel de membrana es siempre menor de $0,5^{\circ}\text{C}^2$. Así pues, el control de la transmisión térmica se focaliza en los fenómenos de la **convección** y la **radiación**.

Se puede provocar cambios en la convección mediante la ventilación natural que, a su vez, se produce gracias a la estratificación de temperatura en el interior dentro del edificio. Dependiendo de las condiciones ambientales, se debe procurar que la convección se produzca en menor o mayor medida.

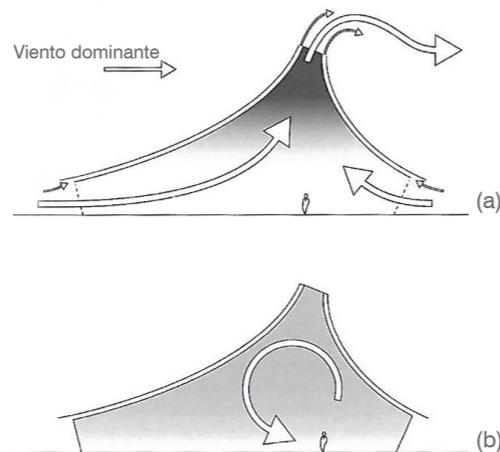


Fig. 3.14 Estrategias de ventilación (a) durante el verano y (b) durante el invierno. Imagen de Forster y Mollaert.

Las transferencias por radiación dependen exclusivamente de las propiedades térmicas y ópticas del material de la membrana. No obstante, estas transferencias siguen sin representarse (en edificación se trabaja normalmente con la magnitud de transmitancia térmica U, aunque en el caso de las membranas, no es el valor que mejor refleja el comportamiento térmico del espacio).

• Membranas de doble capa

El uso de membranas de hoja múltiple es una solución para reducir la transmisión térmica a través de la membrana, disminuir el riesgo de condensación, controlar las características acústicas del espacio y aumentar la protección contra incendios. La cámara reduce la transmisión térmica por convección entre la hoja exterior y el espacio interior.

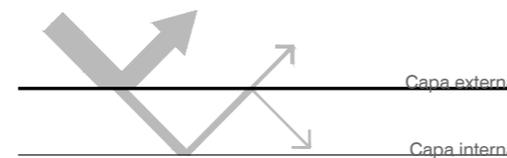


Fig. 3.15 Transmitancia de membranas de doble capa. Reelaboración de imagen de Forster y Mollaert.

La hoja exterior se refuerza con una hoja adicional y se pretensa para soportar las cargas de viento y nieve. La hoja interna cuelga de la exterior. Ambas hojas quedan separadas de 100 a 500 mm generalmente⁵. La separación debe ajustarse teniendo en cuenta las renovaciones del aire de su interior (para controlar la temperatura de las superficies de la membrana y la posible condensación), la absorción acústica y la deformación de la hoja exterior debido a su exposición ambiental (para evitar el contacto entre hojas).

• Membranas aisladas

Las membranas aisladas se obtienen insertando un material aislante entre la membrana exterior y los forros interiores. Los materiales aislantes pueden ser protecciones de espuma, mantas de fibra o películas celulares y se elige en función del nivel de aislamiento y transmitancia óptica. Se puede incorporar una barrera de vapor para reducir el riesgo de condensación. Normalmente, se deja una cámara de aire junto al aislante para ayudar a controlar la condensación.

Propiedades lumínicas

La transmitancia óptica de las membranas es una ventaja desde el punto de vista energético, ya que puede permitir la iluminación exclusivamente natural durante el día, así como una reducción del consumo de calefacción. El material elegido para las membranas debe satisfacer los niveles lumínicos exigidos por la funcionalidad, así como las determinaciones perceptivas del espacio.

La mayoría de materiales para las membranas produce un efecto de dispersión lumínica, es decir, la luz recibida en su cara exterior, se dispersa por la superficie de la membrana y se transmite al interior de manera difusa. Esto provoca un efecto de filtro en las membranas, lo que elimina el inconveniente del deslumbramiento, como ocurre en otros materiales de alta transmitancia óptica. No obstante, la luz difusa no genera sombras marcadas y, por lo tanto, se reduce el contraste, lo que desde el punto de vista del usuario, puede confundirse con un nivel de iluminación insuficiente⁵.

Por otra parte, la translucidez de las membranas permite que la luz artificial interior genere ambiente lumínico exterior.



Fig. 3.16 Ambiente lumínico en el interior del Millennium Dome. Imagen de Skibbreen Eagle.

Propiedades acústicas

Para garantizar el confort de los usuarios del edificio, así como de sus vecinos, es necesario controlar la acústica, tanto la absorción como el aislamiento. La naturaleza ligera de las membranas hace que no se pueda controlar de la misma manera que en sistemas constructivos tradicionales, donde el aislamiento acústico se consigue con la masa de los materiales del cerramiento.

Por lo general, en membranas de doble hoja “normales” se reduce la transmisión entre 5 y 10 dB para frecuencias por debajo de 500 Hz. Esta reducción no se ve afectada por el pretensado de la membrana⁵.

Por otra parte, algunas mediciones han demostrado que la colocación de pequeños pesos en la membrana mejora considerablemente el aislamiento a bajas frecuencias sin reducir demasiado la transmisión de luz¹³. Las membranas con pesos adicionales (MAW) presentan de 5 a 11 dB más de resistencia a la transmisión de las bajas frecuencias (300 Hz generalmente). Para que esta solución funcione de manera efectiva, la cámara de aire debe tener un espesor mayor de 500 mm¹. Se debe garantizar la impermeabilidad en las conexiones de estos pesos con la hoja exterior de la estructura.

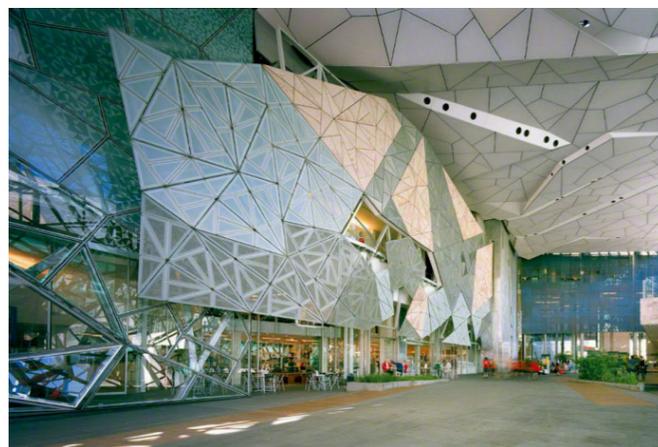


Fig. 3.17 Membranas acústicas Barrisol. Imagen de Barrisol.

- Efecto tambor

Cabe considerar el efecto generado por la lluvia intensa o granizo cuando, por la naturaleza de la membrana, se amplifica el nivel acústico. En estos momentos puntuales se pueden alcanzar niveles superiores a los 90 dBA, valor que dependerá de la tensión y curvatura de la piel.

Comportamiento frente al fuego

El comportamiento de las membranas frente al fuego depende de la base y sobre todo, del recubrimiento. Éste debe cumplir varias normativas de seguridad frente al fuego, como la francesa M2, la alemana B1, o la NFPA estadounidense.

A pesar de que todas las membranas se funden a altas temperaturas, la clasificación del comportamiento se determina en función de la resistencia al fuego, facilidad propagación, inflamabilidad, generación de humos o desprendimiento de gotas incandescentes. Estos procesos dependen de la temperatura que se haya alcanzado y, en el caso de membranas textiles, del tipo de recubrimiento y del pretensado. La elección de la membrana para un proyecto dependerá de las exigencias de éste frente a la seguridad ignífuga y del riesgo de propagación del exterior al interior de la membrana.

Se puede aumentar la seguridad frente al fuego con una membrana interior adicional. En estructuras muy altas, deben añadirse cables de seguridad que soporten la estructura metálica, de manera que el fallo de la membrana no suponga el colapso de la estructura suspendida.

4. MEMBRANAS DE ETFE

4.1 PROPIEDADES

• RESISTENCIA A TRACCIÓN Y AL DESGARRE

En un sistema presostático de cojines, las fuerzas perimetrales entre cojines están en equilibrio. No obstante, en el perímetro del sistema, como en el extremo de una cubierta, los esfuerzos los absorbe la estructura primaria. Para ello, el perímetro de los cojines debe ser lo suficientemente resistente como para transmitir estos esfuerzos a la estructura.

Por otra parte, la flexibilidad de las láminas de ETFE depende de su grosor, no siendo recomendables espesores mayores de 2,5 milímetros ya que, a partir de este límite, las membranas se vuelven frágiles.

El tamaño de los cojines depende, tanto del espesor de las membranas, como de su capacidad para transmitir esfuerzos a la estructura. Una vez hinchados los cojines, las membranas de ETFE adquieren una gran resistencia a tensión y al impacto.

A pesar de que el ETFE puede ser fácilmente perforado, presenta una curva de carga con un pequeño rango elástico y una tensión de 400% hasta el fallo, lo que explica su gran resistencia al desgarre.

El ETFE representa la principal alternativa del vidrio, ya que, mientras éste presenta inconvenientes como su gran peso, coste o fragilidad, las láminas de ETFE se caracterizan por su ligereza, resistencia y durabilidad.

En los principios del desarrollo del ETFE, también se planteó el uso de otros materiales que podían funcionar como alternativas del vidrio, como el FEP o el PVF (Tedlar). No obstante, el primero presenta una baja resistencia a esfuerzos estructurales y el PVF una baja resistencia al fuego.



Fig. 4.1 Cojines de ETFE en Allianz Arena, Munich. Imagen de Temme Obermeier GmbH.

Al contrario que las membranas de tejidos, las láminas de ETFE tienen un **comportamiento isótropo**, es decir, presentan la misma resistencia mecánica en todas las direcciones.

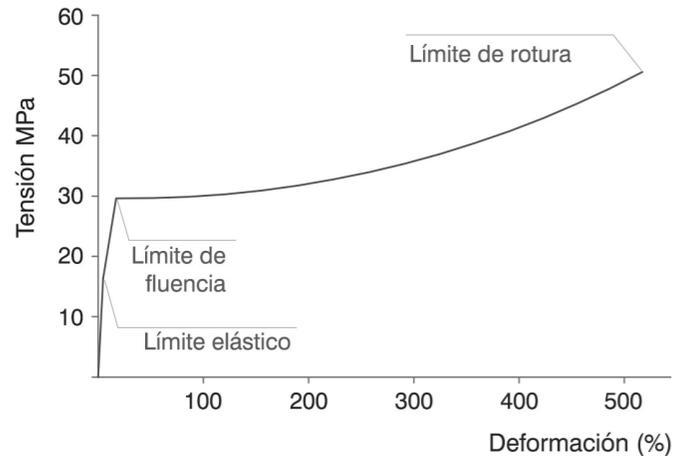


Fig. 4.2 Gráfica tensión-deformación de membrana de ETFE. Reelaboración de imagen de López, Oliván y Maldonado.

• **COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO**

El ETFE es un material combustible pero no inflamable, es decir, es autoextinguible. Esto se debe a la presencia de flúor y un bajo nivel de oxígeno en su estructura molecular.

A diferencia de materiales como el PVC, que desprende dioxinas rápidamente cuando combustiona, el ETFE sólo lo hace cuando la combustión se produce a partir de 800°C. No obstante, las láminas de ETFE se “reblan-decen” a partir de los 200°C y se contraen por la columna de gases calientes.

El fallo de las membranas al alcanzar una temperatura relativamente baja en comparación con otros materiales, permite la ventilación de humos en caso de incendio.

• **SOLDABILIDAD**

El ensamblaje típico comprende de dos a cinco capas de lámina de grosores variables. La unión de varias piezas de ETFE se realiza con una soldadura de 5 mm de ancho con las piezas a unir sobrepuestas. Con una soldadura de 1 mm se garantiza el funcionamiento óptimo de la soldadura, por lo que estas uniones se ejecutan con un margen de seguridad considerable.

• **SOSTENIBILIDAD**

Aunque el ETFE no es un material natural ni biodegradable, es 100% reciclable, por lo que satisface el ciclo “de la cuna a la tumba” para la estrategia de sostenibilidad. Además, contribuye considerablemente en el comportamiento ambiental de los edificios donde se emplea⁹.

El R-22 (o clorodifluorometano), la materia prima del ETFE, no es un derivado del petróleo y es admitido por el Protocolo de Montreal, implementado en 1989 para reducir las sustancias que destruyen la capa de ozono. Además, la producción de la resina del ETFE, que necesita mucha menos energía que la producción del vidrio, es de base acuosa y no necesita disolventes.

Las nuevas estructuras auto-sustentantes por aire son más eficientes energéticamente, ya que una unidad de inflado, que puede servir 1000 m² de cojines neumáticos, operando el 50% del tiempo, consume la misma energía que una bombilla doméstica común.

El ETFE presenta también un bajo coste de mantenimiento durante su ciclo de vida, ya que su superficie lisa permite su auto-limpieza, efecto no tan visible en membranas de tejidos, cuya superficie más irregular puede almacenar suciedad y moho. Además, estudios de comparación con un cerramiento de vidrio han demostrado que el ETFE ofrece ventajas considerables en cuanto al coste de mantenimiento durante toda su vida útil.

• **TRANSMITANCIA ÓPTICA**

El ETFE se caracteriza por una gran transmitancia óptica que suele aproximarse al 85%, aunque puede llegar hasta el 90%. Esta propiedad lo convierte en una alternativa competente del vidrio. El 15% restante ayuda a la dispersión de la radiación solar y, por tanto, a la protección frente a deslumbramientos. Se puede conseguir aumentar aún más esta dispersión de la radiación solar directa aplicando aditivos colorantes.

Como se explica en el apartado 3.2 *Aplicaciones*, el nivel de transmitancia óptica del material es un recurso para incluir la iluminación del edificio y del entorno en su arquitectura.



Fig. 4.3 Cerramiento de ETFE. Serpentine Pavillion, Londres, 2015. SelgasCano. Imagen de Serpentine Gallery.

• **DURABILIDAD**

Pruebas de exposición en localizaciones naturales han demostrado una alta resistencia del ETFE a la degradación y a la decoloración debida a luz ultravioleta, la polución, la alta humedad y el agua salada. Esta durabilidad es intrínseca del ETFE, no de los recubrimientos que se le puedan aplicar⁹.

La garantía ofrecida por los fabricantes de láminas de ETFE es de 25 años. No obstante, los primeros cerramientos de ETFE, que datan de principios de la década de 1980, han demostrado el buen comportamiento del material frente a la exposición de agentes externos tras varias décadas de vida útil.



Fig. 4.4 Protección solar de ETFE en Embajada de EE.UU, Londres. Imagen propia.

4.2 PROCESO DE PRODUCCIÓN

El ETFE es un copolímero de etileno y tetrafluoretileno. Para su procesado se calienta la resina a temperaturas mayores de 380°C. Las láminas de ETFE pueden obtenerse mediante soplado o extrusionado del producto fundido.

El extrusionado tiene un coste mayor pero, a su vez, se consigue un producto de mayor calidad óptica: presenta transmitancias ópticas y tolerancias mayores en su espesor. Las láminas extrusionadas se pueden encontrar en el mercado en una amplia gama de productos que difieren en su espesor, transmitancia óptica, color o brillo de la superficie. Las láminas obtenidas por soplado se utilizan habitualmente en invernaderos.

Se pueden aplicar patrones impresos en la superficie de estas láminas para controlar la transmitancia. El pigmento plateado es el más común, utilizado comúnmente para aumentar la reflexión de la luz solar y, por tanto, disminuir la transmitancia. Para conseguir la compatibilidad entre los materiales y garantizar una buena cohesión, se puede recurrir a la aplicación química, a descargas eléctricas o a la radiación de alta intensidad⁹.

4.3 CORTE Y UNIONES

El corte se realiza mediante una hoja giratoria. Los láser, aunque son precisos, no se utilizan para cortar ETFE debido al bajo espesor de este material (unos 2'2 mm) y a las altas temperaturas con las que trabajan (a 800°C aproximadamente). Además, a estas temperaturas, el ETFE desprende gases tóxicos.

El coste del ETFE es similar al del vidrio de baja calidad de invernaderos. No obstante, el sistema constructivo que hace uso del ETFE, supone una ventaja respecto al sistema tradicional de vidrio, ya que las grandes dimensiones que pueden alcanzar las piezas de ETFE hacen

que se reduzca el perímetro de bordes con sus respectivas uniones y, en consecuencia, su coste es menor ⁴.

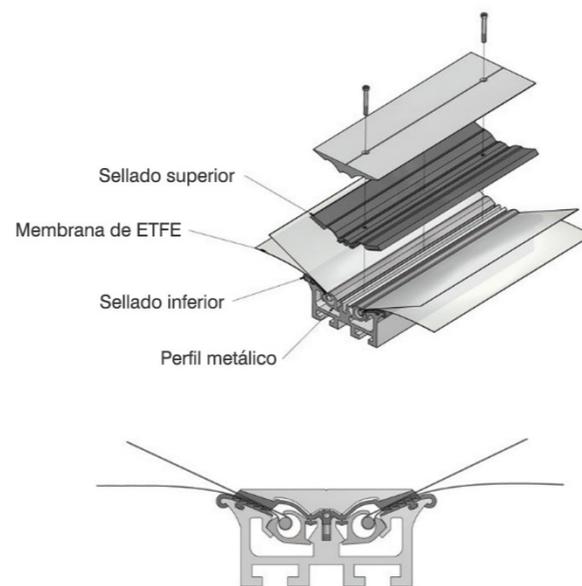


Fig. 4.5 Detalle de unión de Keder. Imagen de GrabCAD.

• Instalación

Las unidades de instalaciones neumáticas se inflan mediante motores eléctricos. Válvulas de no retorno garantizan que se mantenga la presión en el interior de los cojines durante 4-8 horas sin suministro de aire. En el caso en que el suministro falle, la estructura del edificio permanece intacta, siendo el principal impacto una disminución del aislamiento hasta que el suministro de aire se restablece.

A pesar de que se procura la máxima estanqueidad de los cojines, se le aporta de una pequeña unidad extra de aire para compensar posibles fugas en uniones y costuras.

4.4 PATOLOGÍA

El fallo en estructuras tensadas puede deberse al material, fabricación, diseño, instalación, uso o mantenimiento. No obstante, la mayor parte de anomalías que afectan a las láminas de ETFE (acumulación de suciedad en la superficie, pudrición,...) lo hacen en mayor medida en membranas de tejidos (de ahí la alta durabilidad del ETFE), por lo que se describen en el apartado 5.5, correspondiente a patología en membranas de tejidos.

• DESINFLADO

El desinflado de los cojines conlleva la disminución de la presión del fluido interno, y por lo tanto, una transmisión de las cargas a la estructura principal poco eficaz. Sistemas de monitoreo activo proporcionan información en tiempo real sobre la presión en el interior de los cojines, las condiciones climáticas locales y los niveles de temperatura y humedad. La detección de cualquier fallo o cambio dentro del funcionamiento del sistema puede permitir ajustes de presión y rendimiento.

• PERFORACIONES DE AVES

El daño más común de perforación o desgarre en láminas de ETFE se produce por el picoteo de las aves. Este fenómeno es de mayor importancia en membranas de ETFE debido a su menor resistencia al desgarre. No obstante, en sistemas de cojines, no supone una amenaza para la estabilidad del cojín en general ya que, como se explica en el apartado correspondiente a "Desinflado", suelen contar con una supervisión activa integrada que se ajustará automáticamente para compensar una caída ligera de presión. Además, se puede instalar un alambre disuasivo para evitar que las aves se posen en los perfiles metálicos¹².

La unión típica entre cojines se realiza mediante una cuerda de PES o PVC introducida en un bolsillo del cojín de ETFE, que se hace pasar por un perfil de aluminio extruido (ver Fig. 4.5). Este perfil incluye un canal de recogida del vapor condensado¹.



Fig. 4.6 Cojines de ETFE con dispositivo para inflado. Imagen propia.

5. MEMBRANAS DE TEJIDOS

Las membranas textiles están compuestas por una base o tejido recubierto por resinas poliméricas. Pueden llevar otras capas de acabado o capas separadoras.

En este capítulo, se estudian las membranas de tejidos de fibra de vidrio y, especialmente, de poliéster. Ambas mantienen muchas similitudes entre sí debido a su naturaleza de tejido, por lo que se hablará de tejidos en general, matizando las diferencias entre cada material.

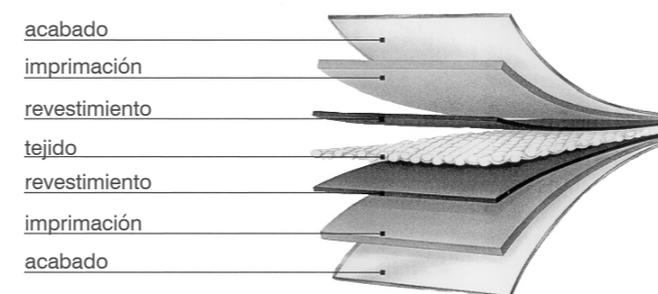


Fig. 5.1 Membrana para estructuras tensadas. Imagen de Forster y Molleart.

5.1 PROPIEDADES

A diferencia de los materiales de estructuras convencionales, en membranas se exigen coeficientes de seguridad mayores por su peor comportamiento y durabilidad, además de que sus propiedades pueden cambiar drásticamente a lo largo del tiempo debido a acciones meteorológicas o cargas aplicadas a largo plazo.

• RESISTENCIA A TRACCIÓN Y AL DESGARRE

Mientras que la resistencia a tracción se mide por el estiramiento desde extremos opuestos, el desgarre se refiere a un fallo local, cuando se aplican fuerzas en un punto y en sentidos contrarios. Ambas propiedades están inversamente relacionadas, es decir, una membrana con mayor resistencia a tracción será más propensa al desgarre.

La resistencia del tejido se determina por la resistencia de una unidad de anchura, que es menor a la resistencia de un hilo multiplicada por el número de hilos por unidad de anchura. Esto se explica por la ondulación en cada cruce del hilado, ya que, además de la fuerza axial a la que está sometida el tejido, se introduce un

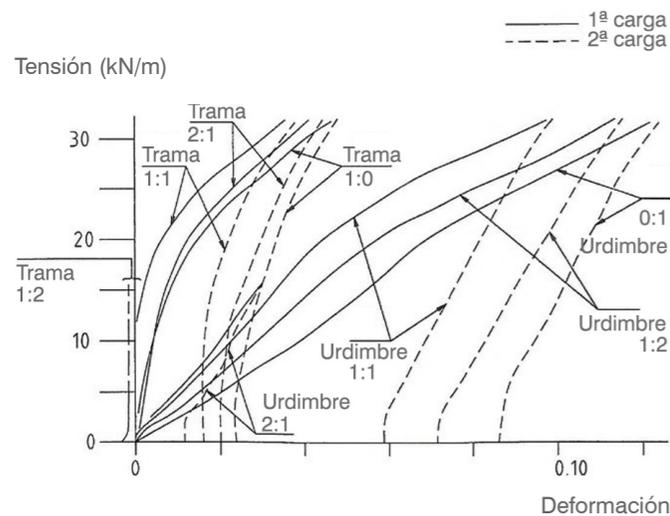


Fig. 5.2 Diagrama tensión-deformación biaxial de las membranas de poliéster. Imagen de Shaeffer.

momento flector que reduce la resistencia del tejido revestido. Todas las fibras muestran un comportamiento no elástico, es decir, una relación no lineal entre tensiones y deformaciones.

Debido al **comportamiento anisótropo** de los tejidos, varía considerablemente el valor de la resistencia (a tracción o a desgarre) entre la dirección de urdido y de relleno, siendo mayor en la de urdido.

La resistencia también varía dependiendo de si se trata de cargas iniciales o a largo plazo, ya que las fibras se deforman más tras estar sometidas a cargas durante un periodo de tiempo.

Los tejidos de fibra de vidrio presentan una resistencia a desgarre mayor que otros tejidos debido a su alta resistencia al corte.

• AISLAMIENTO TÉRMICO

Los materiales para membranas permiten un rango de transmitancia térmica del 1 al 95%. No obstante, los de uso más común pueden alcanzar, como máximo, un 25%.

En algunas situaciones puede interesar la aplicación de acabados de alta reflectancia o materiales que actúen de barreras UV. Se puede conseguir otros valores de transmitancia con capas adicionales para aumentar la reflexión o absorción de radiación solar, ayudando así a reducir costes energéticos. No obstante, esto afectará al comportamiento de todo el espacio interior y reducirá la transmitancia óptica.

Una capa simple de la membrana VALMEX FR 1000 (PES-PVC) de 1050 g/m² tiene un valor de transmitancia de U=5,7 W/m². En este sentido es muy similar al vidrio: un doble vidrio con una cámara de aire de 200 mm, tendrá un valor aproximado de U=2,7 W/m² ⁶.

• DEFORMACIÓN Y ESTABILIDAD DIMENSIONAL

Estos aspectos son fundamentales ya que las membranas funcionan a tensión. La pérdida de tensión en alguna parte de la membrana, supone una contribución poco óptima del material a la transmisión de cargas.

La deformación excesiva de la membrana se contrarresta con el pretensado. En las membranas de tejidos entrelazados, la dirección de los hilos de relleno, al presentar menor resistencia a tensión, es más proclive a la inestabilidad dimensional.

Cambios de temperatura o del contenido de humedad también pueden afectar a la estabilidad dimensional del material. Un incremento de temperatura provocará un aumento del alargamiento de las fibras, en función del coeficiente de dilatación del material⁴.

Por su parte, la presencia de agua favorece el proceso de congelación y descongelación.

• COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO

Las membranas de PES-PVC alcanzan la termofluencia a los 70°C. A partir de los 100°C, empiezan a derretirse las uniones soldadas, facilitando la evacuación de gases. Un foco puntual de fuego aplicado directamente sobre la membrana produce un agujero, cuya extensión se auto-detendrá cuando cese el contacto de la membrana con la llama.

Por otra parte, el recubrimiento de PVC se funde a partir de los 150°C aproximadamente. Las normativas para la seguridad frente al fuego definen la composición del PVC, que contiene aditivos para la prevención de desprendimiento de gotas inflamadas. En resumen, las membranas de PES-PVC son combustibles pero no inflamables. Los daños producidos por el fuego en estos tejidos son puntuales, aunque hay que garantizar que

en caso de incendio la distensión de la membrana no provocará el colapso del soporte estructural.

El PTFE, en cambio, no se derrite hasta alcanzar los 300°C, por lo que la acumulación de gases puede provocar una explosión de las membranas.

Los tejidos de fibra de vidrio son no combustibles y soportan temperaturas de hasta 1000°C. Las uniones en membranas con recubrimientos de PTFE no fallan hasta alcanzar los 250°C.

• SOLDABILIDAD

Los materiales de las distintas capas tienen que ser solubles, a la vez que deben mantener la flexibilidad y transmitancia óptica.

El objetivo es conseguir recubrimientos de calidad con la menor cantidad, por motivos económicos y ecológicos.

La soldabilidad de las membranas no depende del porcentaje de este recubrimiento, sino de las capas entre el recubrimiento y el acabado final. Estas capas facilitan, además, la facilidad de manufactura y la estabilidad del producto (evitan la pérdida de adherencia del acabado)⁶.

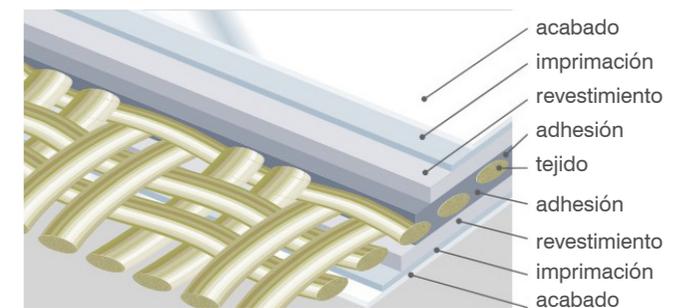


Fig. 5.4 Sección típica de la membrana PES-PVC de Mehler Imagen de Giugliano.

• SOSTENIBILIDAD

La conservación del medio ambiente va más allá de actividades relacionadas con la gestión de residuos, como la reutilización o el reciclaje.

Así pues, el carácter sostenible de las membranas de tejidos trata de la selección de las materias primas, el control del uso de químicos -regulada también por la UE-, la disminución de las emisiones, la optimización de los procesos o la reutilización de los residuos de los tejidos y revestimientos (en membranas de peor calidad).

-Reutilización

Los materiales de las membranas reciclados se trituran y se transforman en productos de uso común en la industria. De esta manera, no es necesario el uso de químicos para separar los componentes.

-Reciclaje

Un proceso patentado por Slovay permite separar la resina de PVC del tejido de poliéster empleando una disolución química selectiva, de manera que se permite el reciclado de ambos componentes.

• DURABILIDAD

El poliéster puede llegar a perder el 20% de su resistencia, y el nailon hasta el 90% tras un periodo de exposición de 110 semanas. Por ello, es importante determinar el comportamiento de un material, no sólo en el instante inicial, sino después de un tiempo sometido a condiciones ambientales próximas a las del proyecto.

La protección a la radiación ultravioleta se puede conseguir mediante aditivos protectores en el tejido o absorbentes en el recubrimiento. La aplicación de PVDF como acabado de membranas de PES, también mejora el comportamiento frente a agentes externos respecto a un acabado de acrílicos.

Por su parte, una característica destacable de la fibra de vidrio es que presenta una resistencia a los agentes atmosféricos y los UV mayor que la de los tejidos de poliéster o nailon.

5.2 COMPOSICIÓN

• MEMBRANAS DE PES-PVC

Fibras e hilos

Ya que las fibras son demasiado cortas y finas para usarlas como elementos estructurales, deben unirse para formar hilos. Se pueden agrupar paralelamente o retorcidas entre sí. En el primer caso, la rigidez del hilo será la suma de las rigideces de las fibras, mientras que en el segundo caso, la rigidez del hilo resulta menor porque las fibras se pueden alargar más bajo cargas axiales aplicadas.

Un hilo está compuesto por unas 200 fibras. La definición básica de los hilos depende del número de fibras básicas, de la densidad lineal (en g/km), del diámetro de la fibra, del número de giros por metro y del tratamiento de acabado. La tabla 5.2 recoge algunas propiedades de los hilos de materiales utilizados habitualmente en membranas.

Tejido base

El tejido de las membranas se compone de dos grupos de hilos, los hilos de urdimbre, que se disponen a lo largo de la membrana, y los que la recorren paralela a ella, llamados hilos de trama o de relleno (ver Fig. 5.6).

Los tejidos base se obtienen entrelazando hilos de la trama entre dos capas de hilos de urdimbre a 90°. La definición de los tejidos depende de la densidad de hilos (número de hilos por cm²), de su gramaje (g/m²), del patrón utilizado, de la ondulación de los hilos en ambas direcciones, de la porosidad (o factor de protección), y de sus propiedades físicas y mecánicas.

Los patrones más utilizados son los tejidos lisos (o de entrelazado normal), o los tejidos Panamá (o 2-2) (ver Fig. 5.7). La ondulación es menor en tejidos de tipo Panamá.



Fig. 5.5 Esquema de reutilización de las membranas de PES-PVC de Mehler. Imagen de Giugliano.

	Poliéster de alta tenacidad	Fibra de vidrio	Aramida de alto módulo	LCP
Densidad (g/cm ³)	1.38	2.6	1.45	1.4
Resistencia a tracción (GPa) (N/tex)	0.97-1.17	2.4	3.32	3.28
Alargamiento a rotura (%)	0.7-0.85	0.92	2.35	2.4
Módulo de elasticidad (GPa) (N/tex)	11-15	4.5	1.5	2.5
Absorción de agua (%)	12-15	73	160	104
	9-11	28	109	74
	0.4	<0.1	1.2-3	<0.1

Tabla 5.1 Propiedades generales de los hilos. Fuente: Forster y Mollaert.

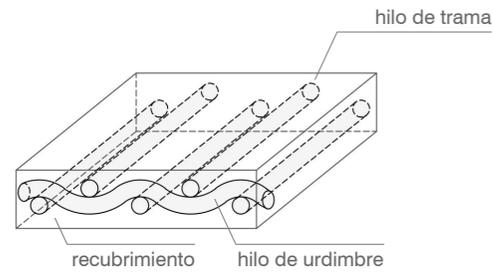


Fig. 5.6 Esquema de las direcciones de los hilos del tejido. Reelaboración de imagen de Shaeffer.

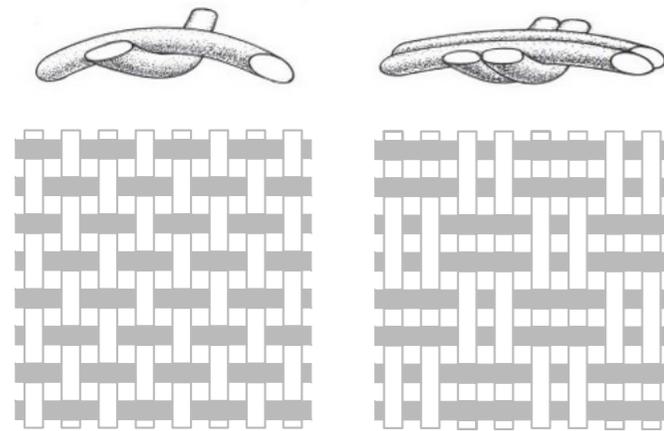


Fig. 5.7 Izda.: Hilos y tejido entrelazado normal; Dcha.: Hilos y tejido entrelazado 2-2 (o Panamá). Imagen de Forster y Molleart.

Otro patrón es el de “urdimbre sobrepuesta” o tejido plano, que consiste en una malla de hilos de urdimbre y de trama superpuestos unos sobre otros (no tejidos entre sí). Un hilo muy fino los cose entre sí para mantenerlos unidos. En estos tejidos se reduce la ondulación, pero también su resistencia³.

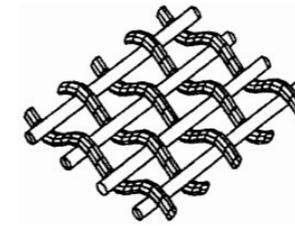
El gramaje del tejido depende en parte de la densidad de los hilos. Por otra parte, la ondulación depende también de las condiciones del pretensado. Con ondulaciones mayores se consiguen tejidos de mayor grosor y mayor alargamiento, por lo que en tejidos lisos, el pretensado en ambas direcciones también ayuda a aumentar la rigidez.

El hilo de la urdimbre y el de la trama tienen propiedades distintas, debido a la diferencia entre sus hilados y revestimientos. La diferencia más importante es la del “salto de trama”. Durante el revestimiento de la tela, al rebasar la temperatura de transición a vidrio, los hilos de la trama se contraen, ya que por la naturaleza del tejido, están menos “sujetos”. Esto no sucede con los hilos de urdimbre, ya que siguen bajo tensión. Este efecto supone un módulo elástico E menor y un alargamiento de rotura mayor en la dirección de la trama. Para contrarrestar esta anisotropía, se pretensa la trama durante el tejido.

•Acabado del tejido

El **ensimaje** consiste en la aplicación de un componente hidrófobo en los hilos (en tejidos conocidos como low-wick) mejora la compatibilidad entre el tejido y el recubrimiento, de manera que ayuda a disminuir la difusión de humedad en el interior del tejido.

Tejido holgado



Ventajas:

- ↑ Adherencia mecánica
- ↑ Resistencia al desgarre

Inconvenientes:

- ↓ Resistencia a tensión
- 3 capas de espesor

Tejido prieto



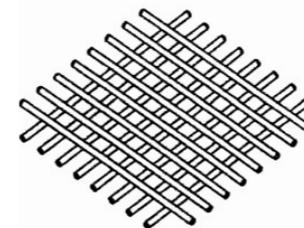
Ventajas:

- ↑ Resistencia a tensión
- Facilidad de uso de sistemas de recubrimiento líquido

Inconvenientes:

- No adherencia mecánica (sólo química)
- ↓ Resistencia al desgarre
- 3 capas de espesor

Tejido plano



Ventajas:

- 2 capas de espesor
- ↑↑ Resistencia al desgarre
- Buen equilibrio entre resistencia a tensión y al desgarre
- Buen equilibrio entre adhesión y adherencia

Inconvenientes:

- ↓ Deformación en las direcciones de urdido y trama
- Escasa colaboración entre hilos de urdido y de trama

Tabla. 5.2 Ventajas y desventajas de distintos patrones de tejido. Fuente: reelaboración de tabla de Shaeffer.

Recubrimiento

- Finalidad del recubrimiento

El recubrimiento le aporta uniformidad al tejido, facilitando el comportamiento solidario de los hilos. Aporta también el material necesario para las uniones entre tejidos selladas por calor.

El enlace producido entre el tejido y el recubrimiento es de carácter mecánico y químico. La imprimación hace que aumente la compatibilidad entre el tejido y el recubrimiento. Esta compatibilidad o adhesión se consigue con una buena humidificación de las fibras por la resina líquida del recubrimiento.

- Componentes del recubrimiento



Fig. 5.8 Esquema de los componentes del recubrimiento. Fuente: Elaboración propia.

Para el recubrimiento de membranas de tejidos, se aplica normalmente un compuesto líquido que se consigue mezclando **resinas de PVC** con otros compuestos como los **emulsionantes**. La elección de estos compuestos es importante porque de ellos depende la reología, las propiedades térmicas, la capacidad de auto-limpieza y el aspecto de la superficie.

Otro componente principal del recubrimiento son los **plastificantes**. Estos son ftalatos, fosfatos, parafinas cloradas u otros ésteres.

Los fosfatos son los plastificantes utilizados más comúnmente y los que mejor se comportan frente al fuego. No obstante, son susceptibles de ataques biológicos, ya que funcionan como depósito alimenticio de bacterias y hongos. Su compatibilidad con el PVC los hace necesarios en el procesado del recubrimiento pero, al igual que con los fosfatos, son sensibles a la hidrólisis.

Las parafinas cloradas tienen una gran capacidad plastificante, y una adecuada resistencia al fuego. Sin embargo, también tienden a favorecer la acumulación de suciedad.

Los **aditivos colorantes**, además de modificar el cromatismo y, por tanto, la estética, intervienen en la transmitancia óptica, modificando la estabilidad de los UV de la membrana.

El poliéster, al ser un material orgánico caracterizado por un grupo éster, es sensible a la hidrólisis. Para disminuir los efectos de los agentes atmosféricos y la acumulación de la suciedad, se emplean **estabilizadores** térmicos de la oxidación y de los UV.



Fig. 5.9 Recubrimiento de PTFE sobre tejido. Imagen propia.

Los aditivos **retardadores** aumentan la inflamabilidad de la membrana. Estos aditivos pueden ser fosfatos, óxido de antimonio, hidratos de aluminio, etc. No obstante, el cloro del PVC es el que, junto con el óxido de antimonio, mayor resistencia frente al fuego presenta.

El recubrimiento del PVC contiene aditivos como retardantes de llama, colorantes, fungicidas o estabilizadores de UV que protegen el color y la base de la membrana, reduciendo el grado de degradación.

Las membranas cuyos hilos están urdidos entre sí, tienen un espesor total de 3 hilos, mientras que si los hilos de una dirección se disponen directamente sobre los que van en la dirección perpendicular (tejido plano, ver Fig. 5.2), la membrana tiene un espesor total de 2 hilos. Esto se traduce en que en el primer caso, se necesitará mayor cantidad de recubrimiento para conseguir un acabado igual de uniforme.

Acabado

El acabado se comporta como una barrera contra la dispersión del plastificante y los efectos de los agentes atmosféricos, permitiendo un buen deslizamiento y facilitando la auto-limpieza de la membrana. Es importante llegar a un equilibrio entre la resistencia a agentes exteriores, la optimización de la soldadura y la estética.

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. En caso de aplicar PVDF en ambas caras, se coloca una capa separadora entre ellas, ya que dos caras de PVDF se repelen.

Otro acabado, aunque no tan habitual, son las películas de PVF (fluoruro de polivinilo). Los fluoropolímeros presentan una resistencia mayor a los UV que los acrílicos.

•MEMBRANAS DE FIBRA DE VIDRIO

Tejido base

El tejido base de la fibra de vidrio está formado por hilos, conformados a su vez por fibras microscópicas. Los tejidos de fibra de vidrio con revestimiento (para membranas empleadas en arquitectura) se producen con vidrio de tipo E, cuya composición es:

53-54 % SiO_2
 14-15 % Al_2O_3
 20-24 % CaO , MgO
 6,5-9 % B_2O_3

Al igual que en los tejidos de poliéster, las membranas se tejen con hilos de trama y de urdimbre, por lo que se consigue también un material anisótropo.

El patrón de sarga, aparentemente con urdido de los hilos a 45° , permite la adaptación perfecta del tejido a la forma, siendo el más idóneo para superficies curvas.

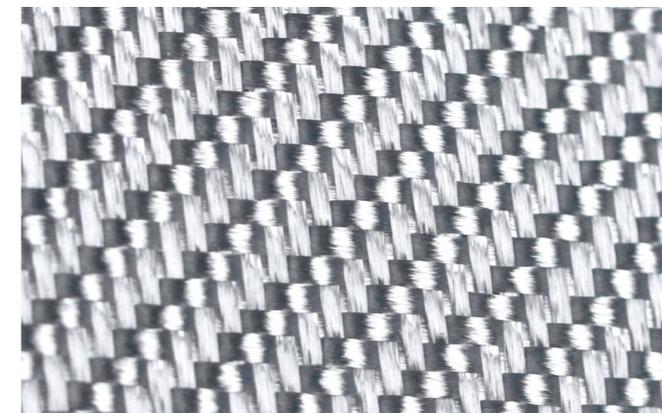


Fig. 5.10 Patrón de sarga en tejido de fibra de vidrio. Imagen de Rock West Composites.

Recubrimiento

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.

-Recubrimiento de PTFE

La fibra es resistente a altas temperaturas y puede soportar la temperatura de aplicación del PTFE. Este material presenta una gran durabilidad, que no está favorecida por la aplicación de aditivos (como en revestimientos de PVC), sino por su alta resistencia a la radiación UV.

-Recubrimiento de silicona

Este material presenta la ventaja, frente al PTFE, de una buena facilidad de manejo. No obstante, presenta peor autolimpieza y soldabilidad, por lo que requieren de tratamientos superficiales.

Acabado

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.

5.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN

El proceso de producción de las membranas y, por lo tanto, su constitución, explican muchas de las propiedades de estos productos y su comportamiento. En el caso de las membranas de PES-PVC, se ha tenido la oportunidad de observar en primera persona su fabri-

cación, por lo que se ha profundizado en el proceso de producción de este producto en concreto. No obstante, cabe tener en cuenta que el proceso es similar en membranas de tejidos entrelazados, variando los materiales empleados en cada fase del proceso.

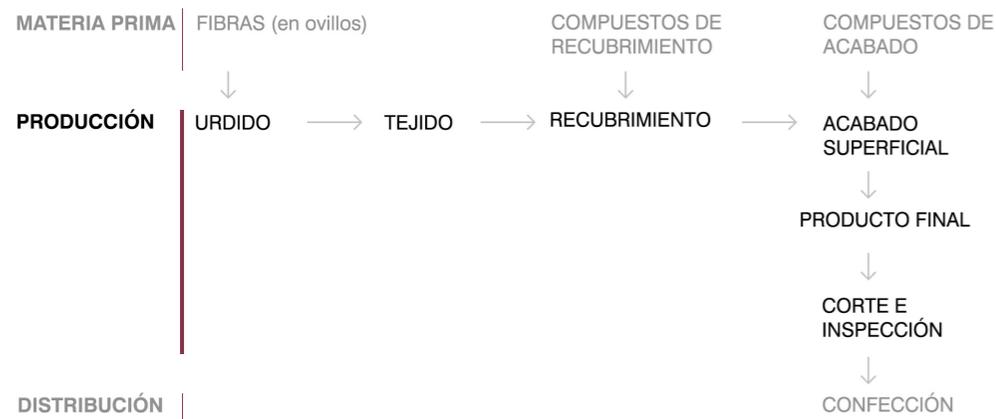


Fig. 5.11 Esquema general de la fabricación de las membranas PES-PVC. Fuente: Elaboración propia.

1º| PREPARACIÓN DE CARRETES

Los hilos de poliéster llegan a la fábrica en bobinas. La primera máquina se encarga de desenrollar el hilo de muchas bobinas simultáneamente (Fig. 5.13). Éste pasa por un tensiómetro que controla que todos los hilos lleguen con la misma tensión, de lo contrario al tejerlos provocarían zonas destensadas. Los hilos se enrollan en un carrete por fajas, dependiendo del patrón de tejido. Por ejemplo, si el patrón de un tejido lleva 3 hilos en la dirección de tejido, que se unirán mediante un hilo en la dirección de la trama, en este carrete se agruparán los hilos en fajas de 3.

Fig. 5.12 Bobinas de hilo de poliéster. Industrial Sedó. Imagen propia.



Fig. 5.13 Preparación de los carretes de hilo de poliéster. Industrial Sedó. Imagen propia.

2º| URDIDO

En la fase de urdido intervienen los telares (Fig. 5.14). En la parte delantera del telar se coloca el carrete de urdido con los hilos de la dirección del tejido preparados en fajas (la preparación de estos carretes se explica en el apartado 1º).

A un lado del telar se coloca la bobina de los hilos de trama. El telar pasa automáticamente un hilo de trama a la vez que sube o baja los hilos del tejido. En la parte posterior del telar se encuentra el carrete donde se va enrollando el tejido ya urdido.

Los telares tienen habitualmente una anchura de 2,5 metros, pudiendo alcanzar los 3 metros. Esta dimensión condiciona la anchura máxima de las piezas de las membranas, por lo que en proyectos de escala mediana, se utilizan habitualmente piezas de 2,5 metros de ancho.



Fig. 5.14 Tejido del poliéster en telares. Industrial Sedó. Imagen propia.

3º| RECUBRIMIENTO

Una vez obtenido el tejido base, se procede al recubrimiento. El material empleado con este fin llega a la fábrica en sacos de resinas de PVC, que se mezclarán con emulsionantes, plastificantes y aditivos, entre los que se añaden compuestos para aumentar la compatibilidad poliéster-PVC (isocianatos), o aditivos colorantes (Fig. 5.15).

La línea de montaje empieza aplicando el compuesto de recubrimiento (Fig. 5.16). Se hace pasar el tejido por el horno, donde una cadena con enganches en la dirección de la línea, y por tanto, del tejido, lo tensa en sus bordes consiguiendo un pretensado (se tensa en la dirección de la trama, la menos resistente a tracción, ya que se pretende reajustar la anisotropía del material).

A continuación, se hace pasar la membrana por unos rodillos para enfriar la mezcla de PVC y por un detector de grosor del revestimiento.

4º| ACABADO

Se hace pasar la membrana por un rodillo metálico en la cara vista, con lo que se consigue un acabado más liso y brillante. La cara no vista pasa por un rodillo de goma, que deja la marca del textil base y un acabado no tan liso como en la otra cara.



Fig. 5.15 Preparación de la mezcla de PVC. Industrial Sedó. Imagen propia.

5º| INSPECCIÓN

Por último, se procede a un control visual. Se desenrolla el producto final sobre unas lámparas, mientras un operario revisa la aparición de posibles defectos (grumos de recubrimiento acumulado, partículas que caen en la mezcla de PVC,...). Si se encuentra un defecto puntual, se corta en tejido en ese punto, pero si se trata de una patología de todo el material, se cataloga como membrana de segunda categoría.

•MEMBRANAS DE FIBRA DE VIDRIO

Las fibras se pueden producir con diámetros de 3, 6, 9 y 11 micras. La resistencia de la fibra depende fundamentalmente de su diámetro.

La fibra de vidrio se obtiene por fundición, de manera que las capas exteriores se enfrían más rápidamente que el núcleo, provocando una pretensión: se producen tensiones de compresión en la superficie en la dirección axial, y tensiones de tracción en el núcleo. Las tensiones producidas por cargas externas de tracción se suman a las de esta pretensión. Esto hace que las fibras, a pesar de su alta resistencia a tracción, presenten también una gran fragilidad y, por tanto, baja resistencia al doblado.



Fig. 5.16 Revestimiento del tejido de poliéster. Industrial Sedó. Imagen propia.

5.5 PATOLOGÍA

La mayoría de anomalías producidas en membranas para estructuras tensadas se producen con mayor gravedad en membranas de tejidos, aunque también pueden afectar a láminas o placas, tal y como se explica en el apartado 4.4, correspondiente a patología de las láminas de ETFE.

• FALLO POR RESISTENCIA

La tensión en las membranas depende de la luz, superficie, curvatura, pretensión y cargas. El fallo por resistencia en membranas se debe muchas veces a la falta de consideración de la resistencia a desgarre, teniendo en cuenta únicamente la resistencia a tracción.

• CARGAS A LARGO PLAZO

Estudios en proyectos de varias edades muestran la evolución de la resistencia mecánica de las membranas. Las membranas de mayor edad presentan casi inalterada su resistencia en la dirección de la trama (en un 97% de la inicial), pero disminuye hasta un 84% de la resistencia inicial en la dirección de urdido⁷.

• ATAQUE DE AGENTES EXTERNOS

La exposición durante la vida útil de las membranas a ataques químicos, radiación solar, cambios de humedad y temperatura, o combinaciones de varios agentes externos, afectan a su durabilidad. Para ello, es necesario proteger las membranas con un espesor suficiente de recubrimiento y asegurar la buena adherencia de éste al tejido base.

• AGUA ESTANCADA

La falta de tensión o mal diseño de la membrana puede crear bolsas en la cubierta que almacenen agua y

5.4 CORTE Y UNIONES

Los patrones de corte se generan con modelos 3D computarizados y se transfieren a plotters o máquinas de corte.

El proceso de unión o ensamblaje de las membranas se produce normalmente por inducción de alta frecuencia. Para esto, se utilizan máquinas de soldar diseñadas específicamente. Para el trabajo de detalles como esquinas, se utilizan herramientas de soldadura portátiles. La resistencia de las soldaduras debe ser, al menos, el 70% de la resistencia del material.



Fig. 5.17 Soldaduras en piezas de membranas de PES-PVC. Imagen propia.

que, al evaporarse, dejen la suciedad que había arrasado. Aparte del efecto estético que conlleva, esta suciedad puede fomentar la aparición de hongos en la superficie de la membrana. Para evitar esto, se puede recurrir también a un sistema de drenaje adicional¹⁰.

• ENSUCIAMIENTO DE LA SUPERFICIE

La suciedad de las membranas proviene generalmente de la polución ambiental, aunque también puede haber ensuciamiento en zonas localizadas, como en el caso del agua estancada. Esta suciedad provoca la disminución de la transmitancia óptica que, puede ser evitada con el tratamiento adecuado del acabado de las membranas, de manera que se consiga un nivel suficiente de autolimpieza.

• PEELING

El defecto en la adherencia del recubrimiento al tejido base es el denominado *peeling*. La adherencia entre el tejido base y el recubrimiento depende en parte del contenido de humedad y de las condiciones ambientales durante el proceso de recubrimiento, de los mecanismos químicos y mecánicos de la estructura y, especialmente, del factor de adherencia del recubrimiento⁴.

• WICKING

La filtración de agua en el tejido base, debido a la existencia de poros en el recubrimiento o a su falta de adherencia, favorece la aparición de bacterias y hongos. Los cantos en el perímetro de la pieza son especialmente vulnerables a este efecto. Como consecuencia, aparecen manchas y disminuye la adherencia del recubrimiento, facilitando a su vez el peeling. El hidrofugado de los hilos del tejido (tratamiento conocido como *low wick*) reduce el riesgo de *wicking*.

TRACCIÓN UNIAxIAL

Este ensayo se realiza mediante probetas de 5 cm de anchura y 30 centímetros de longitud que se traccionan hasta su rotura.

La tracción se produce en la dirección del urdido o en la dirección de la trama, dependiendo del ensayo. Como se puede observar en los resultados de ambos ensayos en una misma membrana (ver Anexo 8.2.a), la resistencia a tracción en la dirección de urdido es ligeramente mayor. Esto se debe a que, por la anisotropía del tejido, se pretensa para equilibrar la resistencia mecánica en las dos direcciones. Aunque se intenta ajustar al máximo ese equilibrio, el producto final sigue mostrando una ligera diferencia de propiedades en sus dos direcciones principales.



Vídeo 6.1 Ensayo de tracción uniaxial en membrana de PES-PVC. Industrial Sedó. Fuente propia.

6. ENSAYOS TÉCNICOS

TRACCIÓN BIAxIAL

Debido a la anisotropía de las membranas de tejidos entrelazados, el ensayo de tracción biaxial es el que aporta valores de resistencia a tracción más parecidos a la realidad. Se realiza mediante un dispositivo de ejes gemelos (Fig. 6.2). Para ello, se utiliza una muestra cuyas direcciones de trama y urdimbre se orientan a 45° del perímetro. Las tensiones se producen a lo largo de un borde y perpendicularmente a él.

Cuando existe una diferencia de tensiones en las direcciones ortogonales, aparecen tensiones angulares, que se miden en el sistema de coordenadas de la principal dirección anisotrópica. La tensión a la que se somete la muestra se puede medir a partir de las deformaciones angulares producidas.

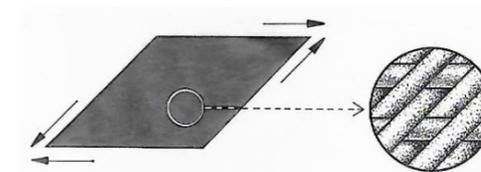


Fig. 6.1 Deformación angular de un tejido. Imagen de Forster y Mollaert.

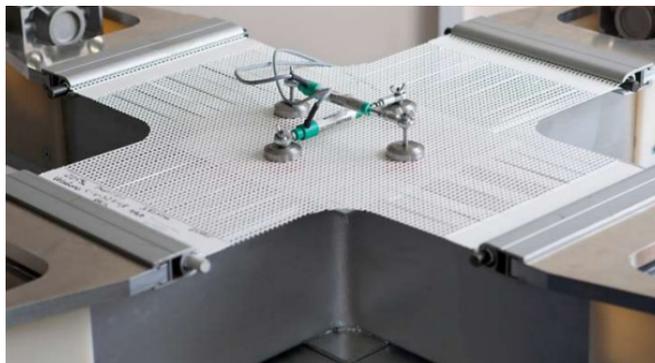


Fig. 6.2 Dispositivo de ensayo de tracción biaxial. Imagen de Base Structures.

Los hilos del tejido empiezan a trabajar a tracción a partir de un cierto valor de tensión. Antes de alcanzar este valor, la resistencia a la deformación del material es baja, ya que la proporciona solamente el revestimiento. Una vez alcanzada esa tensión, la resistencia a la deformación aumenta drásticamente.

DESGARRE

En este ensayo se determina el comportamiento del tejido protegido ante la propagación del rasgado. Se puede hacer mediante probetas de 5 cm de anchura trapezoidales, de “pantalón” o probetas en las que se realiza un corte previo en el centro.

En la primera de ellas, más utilizada comúnmente, se realiza un corte paralelo al borde libre más corto. La diferencia con un ensayo de corte central, es la forma de comportamiento de la membrana. En este ensayo, las tensiones se reparten en el perímetro del corte y, por tanto, las deformaciones también se distribuyen de tal manera (se puede observar una deformación en forma de elipse). En probetas trapezoidales no se produce tal reparto de tensiones ni, consecuentemente, de deformaciones.

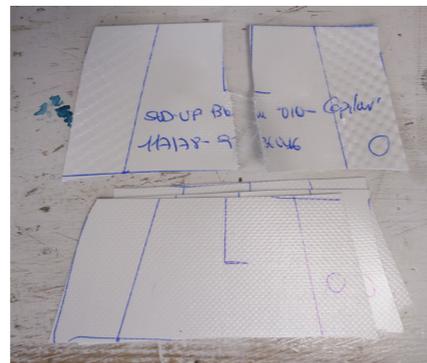


Fig. 6.3 Muestras trapezoidales para ensayo de desgarre. Industrial Sedó. Imagen propia.

En las probetas de “pantalón”, se realiza un corte perpendicular al borde libre más corto, dejando dos “tiras” cuya anchura es la mitad de la de la probeta (5 cm). Cada una de estas “tiras” se fijan a la mordaza superior o inferior.

Al igual que en los ensayos de tracción simple, se puede realizar para determinar la resistencia al desgarre en la dirección de la trama o de la urdimbre (ver resultados de ensayos en Anexo 8.2.b).

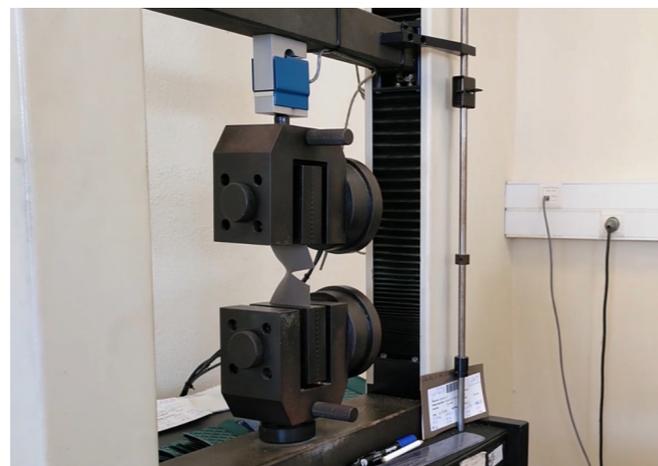


Fig. 6.4 Ensayo de desgarre. Industrial Sedó. Imagen propia.



Vídeo 6.2 Ensayo de desgarre en membrana de PES-PVC. Industrial Sedó. Fuente propia.

DESGARRE BIAXIAL

Al igual que en el ensayo de tracción, la resistencia a desgarre también se puede medir sometiendo la muestra a esfuerzos biaxiales. Para ello, se realiza un corte en el centro de la muestra que se traccionará en dos direcciones.

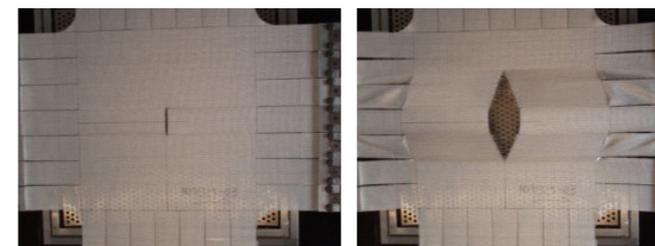
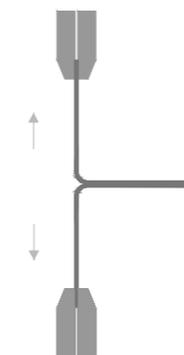


Fig. 6.5 Ensayo de desgarre biaxial. Imágenes de Laboratorio Blum.

ADHERENCIA



Este ensayo se realiza en membranas de tejidos entrelazados para determinar la adherencia entre el tejido base y el recubrimiento. Se separan estas capas, se fija cada una de ellas a la mordaza inferior o superior y se tracciona como en un ensayo de tracción o desgarre uniaxial.

Fig. 6.6 Esquema de ensayo de adherencia. Reelaboración de imagen de Mecmesin.

CARGAS A LARGO PLAZO

El comportamiento de las membranas ante esfuerzos de tensión empeora a medida que las cargas que los provocan se mantienen en el tiempo. Así, el ensayo de cargas a largo plazo consiste en simular su comportamiento ante los esfuerzos sufridos durante su uso. Este comportamiento dependerá de la intensidad y número de ciclos de cargas aplicadas.



Fig. 6.7 Ensayo de cargas a largo plazo. Imágenes de Laboratorio Blum.

DESGASTE

Con el ensayo de abrasión se pretende determinar la resistencia de una membrana al desgaste. Esto se consigue contabilizando el número de ciclos de desgaste antes de la rotura del material. Para ello, se utiliza una probeta circular de 10 cm de diámetro.

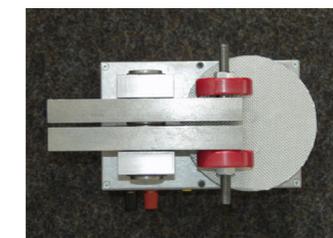


Fig. 6.8 Dispositivo para ensayo de desgaste. Imágenes de Laboratorio Blum.

DRENAJE

El drenaje es la capacidad del material para expulsar la humedad de su interior. Para ello, se toman muestras de 2 cm de anchura y se sumergen en una disolución con colorante. Posteriormente se extraen y se dejan reposar durante un tiempo determinado. Se mide la distancia de los bordes hasta el color de la disolución, de manera que, esta distancia será menor en aquellas membranas que presenten un mejor drenaje.

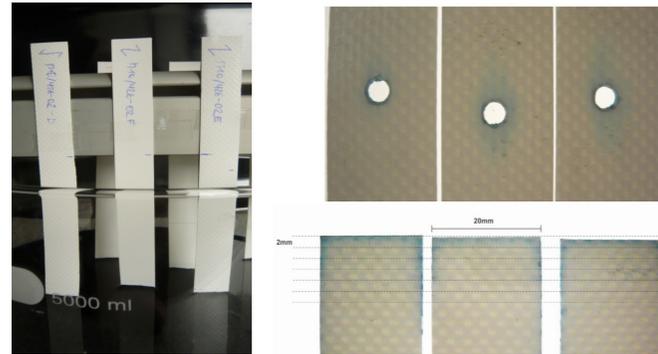


Fig. 6.9 Ensayo de drenaje. Imágenes de Laboratorio Blum.

ANÁLISIS MICROSCÓPICO

La finalidad del análisis microscópico es comprobar si existe alguna anomalía en la estructura del material.

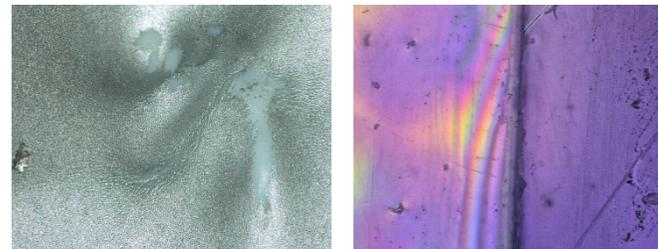


Fig. 6.10 Análisis microscópico de ETFE. Imagen de Laboratorio Blum.

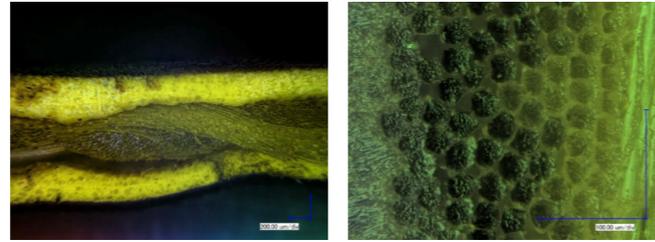


Fig. 6.11 Análisis microscópico de membrana de PES-PVC. Imagen de Laboratorio Blum.

PRUEBA DE EXPLOSIÓN

Es importante determinar la resistencia de las membranas para prevenir una explosión por la acumulación de gases en el espacio que encierran. Estos materiales presentan la ventaja respecto al vidrio de que, en caso de explosión, no se proyectan fragmentos cortantes.

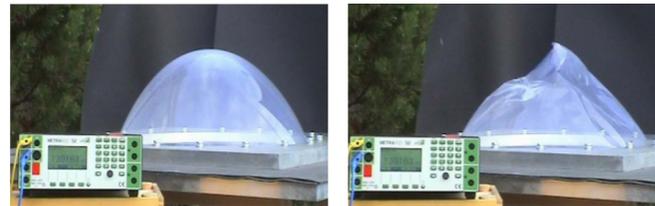


Fig. 6.12 Ensayo de explosión en membrana de ETFE. Imagen de Blum, Bögner-Balz y Köhnlein.

PRUEBA DE UNIONES, DETALLES Y BORDES

Estas pruebas consisten en ensayos de tracción sobre elementos añadidos a las membranas o sobre uniones de varias membranas (por ejemplo, en soldaduras).

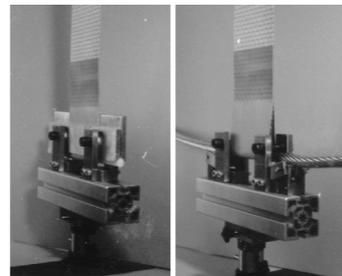


Fig. 6.13 Izda.: Prueba de unión. Dcha.: prueba de borde. Imágenes de Laboratorio Blum.

7. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo, se han mostrado aspectos de varias membranas aptas para estructuras tensadas. Esta información, además de las cargas a las que estarán sometidas las membranas, el uso del edificio, su emplazamiento, temporalidad, diseño o el tiempo y presupuesto para su ejecución, será fundamental a la hora de elegir el material que se empleará en un proyecto.

Membranas en estructuras tensadas

Las estructuras tensadas presentan algunas características generales comunes independientemente del material utilizado en sus membranas.

El funcionamiento a tensión y el bajo espesor de las membranas, entre otras características, en estructuras tensadas hace que el espacio que éstas encierran mantengan unas características generales independientemente del material empleado en las membranas.

La baja masa por superficie de las membranas y, consecuentemente, el mayor gradiente térmico en estas estructuras en comparación con construcciones tradicionales, hace que el control de la **transmisión térmica**

se centre en los fenómenos de convección y radiación.

Mediante la alteración de la convección se puede conseguir que en invierno se uniformice la temperatura en el interior de las estructuras, ya que se pone en movimiento la masa de aire caliente que ha ascendido a las partes no ocupadas del espacio. En verano, se puede aprovechar el efecto de esta estratificación de temperaturas para ayudar a la ventilación. Las cámaras de aire entre dos membranas también ayudan al control de la transmisión por convección. La radiación se puede controlar con la aplicación de filtros en el recubrimiento de las membranas.

Por otra parte, la **transmitancia óptica** de las membranas hace que éstas se conviertan en una fuente de luz natural (y calor), con el ahorro energético que esto supone. Además, la transmisión lumínica se produce de forma difusa, es decir, las membranas se comportan como filtro contra el deslumbramiento.

Al igual que la transmitancia térmica, la **transmitancia acústica** no se puede controlar con la masa de los materiales debido al escaso espesor de las membranas. Para aumentar el aislamiento y absorción acústica se puede recurrir a membranas de doble capa.

Comparación entre membranas

A pesar de que se mantengan las características generales del espacio en estructuras tensadas, cada material empleado en las membranas admite matizaciones en cuanto a su comportamiento. La comparación entre membranas de ETFE y membranas de tejidos, más concretamente, poliéster y fibra de vidrio, ha permitido el entendimiento de cada uno de ellos y la diferenciación en su comportamiento frente a varios aspectos.

•Fibra de vidrio / PES

Los tejidos de PES-PVC tienen un uso más extendido debido a su buena relación **calidad-precio**, ya que es el material más económico y presenta una alta resistencia a tracción y un relativo buen comportamiento para las exigencias de la mayoría de proyectos.

Todas las membranas de tejidos, por su naturaleza, presentan un **comportamiento anisótropo**, por lo que deben pretensarse para equilibrar la diferencia de resistencia mecánica en las dos direcciones principales. Este pretensado también es necesario para contrarrestar la deformación excesiva de las membranas, que se acentúa en aquéllas con una resistencia a tracción menor.

En algunos casos, se puede requerir la aplicación de aditivos en el tejido o en el recubrimiento para mejorar la **durabilidad** de las membranas. La sustitución del acabado de acrílicos por PVDF también aumenta la durabilidad de las membranas, pero incrementa ligeramente su coste.

Las membranas de tejidos son reciclables y reutilizables, aunque el grado de **sostenibilidad** de cada material también está relacionado con otros aspectos como la selección de las materias primas, el control del uso de químicos, la disminución de las emisiones u optimización de los procesos de producción.

La fabricación y comportamiento de los tejidos de fibra de vidrio presentan muchas similitudes con los de poliéster, aunque difiere de éste, especialmente, en su mayor **durabilidad** y **resistencia a desgarre**, debido a su también mayor resistencia a corte.

Igualmente, se diferencia de las membranas de poliéster en cuanto a su comportamiento frente al fuego. Mientras las membranas de PES-PVC son **combustibles pero no inflamables**, los tejidos de fibra de vidrio son **no combustibles**. La facilidad de ventilación de humos en caso de incendio y el riesgo de explosión de las membranas, dependerá de la temperatura alcanzada en el fallo de las uniones de las membranas (sobre los 100°C en membranas de PES y sobre los 250°C en membranas de fibra de vidrio).

No obstante, el uso de las membranas de fibra de vidrio no es tan frecuente ya que su **coste** -mayor que el de las membranas de poliéster- y su relación **calidad-precio** hace que, frente a requerimientos de resistencias y durabilidades mayores, se opte habitualmente por láminas de ETFE.

•ETFE

Por su parte, las membranas de ETFE se utilizan normalmente como sustituto del vidrio debido a su alta **transmitancia óptica** (del 85% aproximadamente). Otras de sus propiedades como su alta resistencia al desgarre o **expectativa de vida**, de 25 años, frente a la expectativa de 15-20 años del poliéster, lo convierten en el material más recurrente en edificios permanentes o con exigencias técnicas mayores.

A diferencia de las membranas de tejidos, las láminas de ETFE son **materiales isotrópos**, por lo que no es necesario pretensarlos para compensar la diferencia de

resistencia mecánica en sus dos direcciones principales.

Las láminas de ETFE son **combustibles pero no inflamables**, con un punto de fusión relativamente bajo (sobre los 200°C) que permite la ventilación de humos en caso de incendio. Además, no se desprenden gases tóxicos de la combustión hasta alcanzar los 800°C.

El ETFE no es un material natural ni biodegradable, pero es **100% reciclable**. Su materia prima no es un derivado del petróleo y su producción tiene un **impacto ambiental** menor que el del vidrio. El **coste de mantenimiento** también es menor que el del vidrio o el de las membranas de tejidos, ya que su superficie regular permite una mejor autolimpieza.

No obstante, su **elevado coste**, en comparación con otros materiales para membranas, hace que el uso de las láminas de ETFE no esté tan extendido como el de las membranas de poliéster.

Por último, la reducción del coste material y de mantenimiento, la mejora del aislamiento y del comportamiento a largo plazo, la reducción del gasto energético y la mayor eficacia del reciclaje son algunos de los retos que siguen vigentes en los sistemas de membranas tensadas y representan el foco de atención en el futuro de estos materiales.

Los resultados finales de este trabajo se centran en unos pocos productos que corresponden a los utilizados comúnmente en la actualidad. Sin embargo, cabe no olvidar que las estructuras tensadas permiten la utilización de una amplia gama de productos, muchos de ellos ya ofrecidos por el mercado y que, si bien no están tan experimentados, pueden suponer objeto de estudio y aplicación en proyectos posteriores.

8. ANEXO

8.1 GLOSARIO

TEJIDOS / BASES

- PES (Poliéster)
- Nailon
- PTFE (Politetrafluoretileno. *Teflon*)
- HDPE (Polietileno de alta densidad)
- LDPE (Polietileno de baja densidad)
- Aramidas (Poliamida aromática)
- Fibra de vidrio
- LCP (Polímeros de cristal líquido basados en poliéster aromático)
- ETFE (Etileno tetrafluoretileno)
- PVC (Policloruro de vinilo)
- PMMA (Polimetilmetacrilato)
- PVDF (Polifluoruro de vinilideno)

RECUBRIMIENTOS

- PVC (Policloruro de vinilo)
- PTFE (Politetrafluoretileno)
- Silicona
- PUR (Poliuretano)

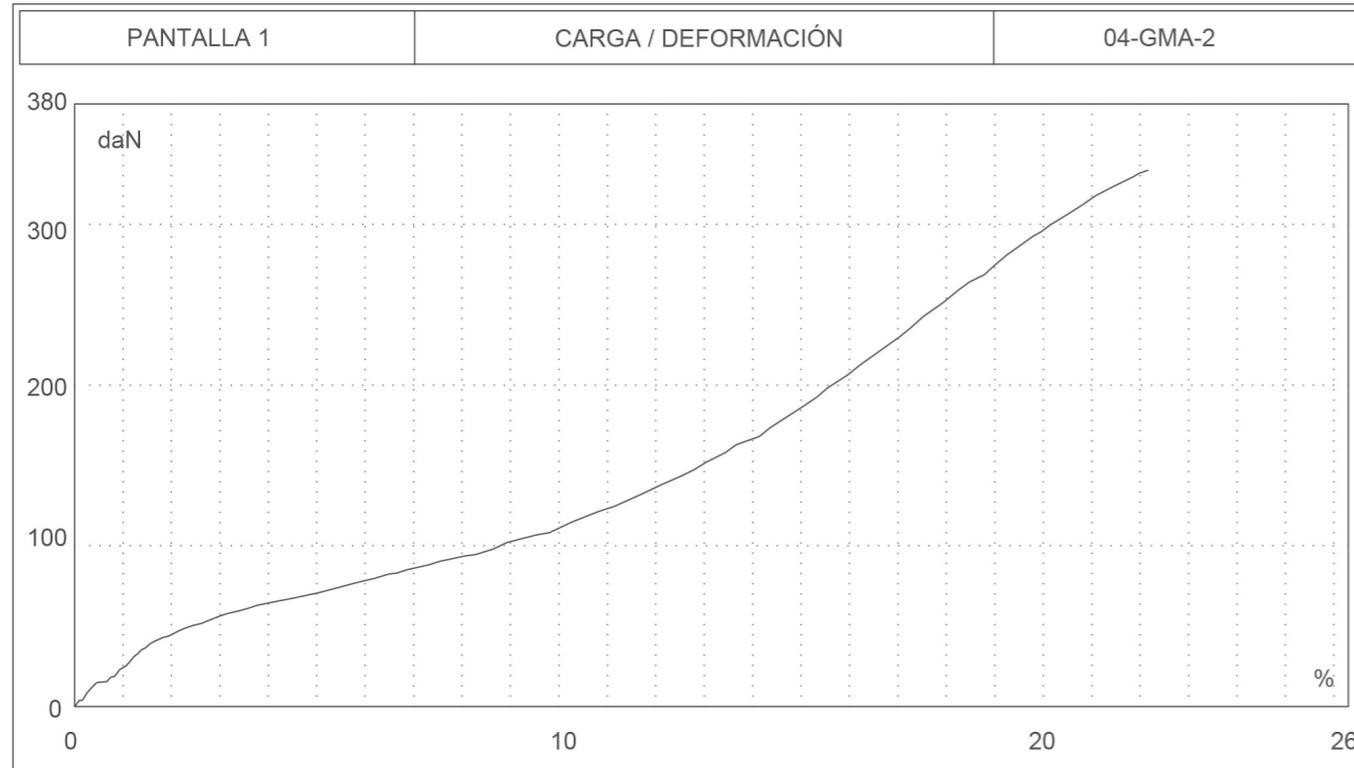
ACABADOS

- Acrílicos
- PVDF (Polifluoruro de vinilideno)
- PVF (Fluoruro de polivinilo. *Tedlar*)
- FEP (Fluoroetileno-propileno)

8.2 RESULTADOS DE ENSAYOS

a) Ensayo de tracción

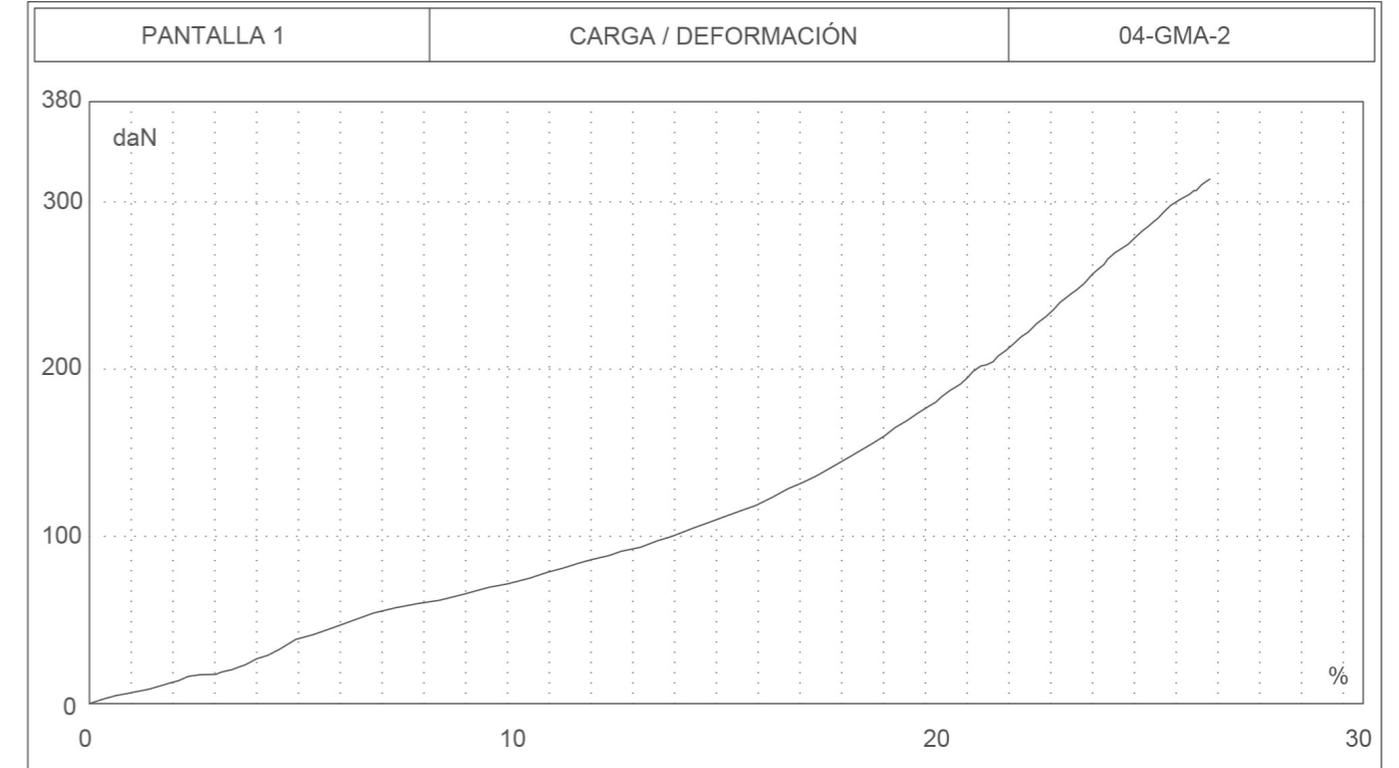
·Dirección urdido



RESULTADOS MUESTRA 1 LOTE 2
 Carga a peak 339.8 daN
 Deformación a peak 22.24 %
 Deformación a end 22.24 %

Fig. 8.1 Reelaboración de diagrama Tensión-Deformación en ensayo de tracción uniaxial en la dirección del urdido. Ensayo de Industrial Sedó

·Dirección trama

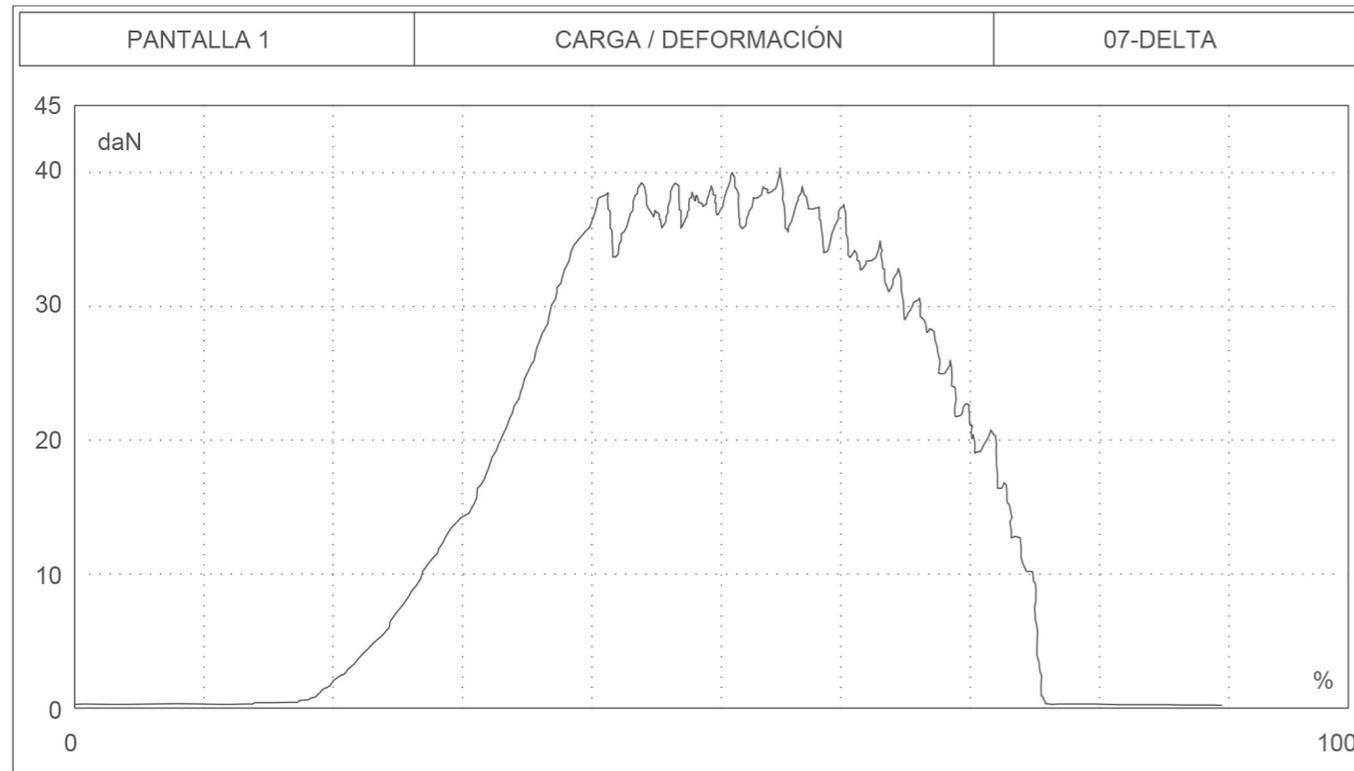


RESULTADOS MUESTRA 1 LOTE 2
 Carga a peak 313.5 daN
 Deformación a peak 26.72 %
 Deformación a end 26.72 %

Fig. 8.2 Reelaboración de diagrama Tensión-Deformación en ensayo de tracción uniaxial en la dirección de la trama. Ensayo de Industrial Sedó

b) Ensayo de desgarre

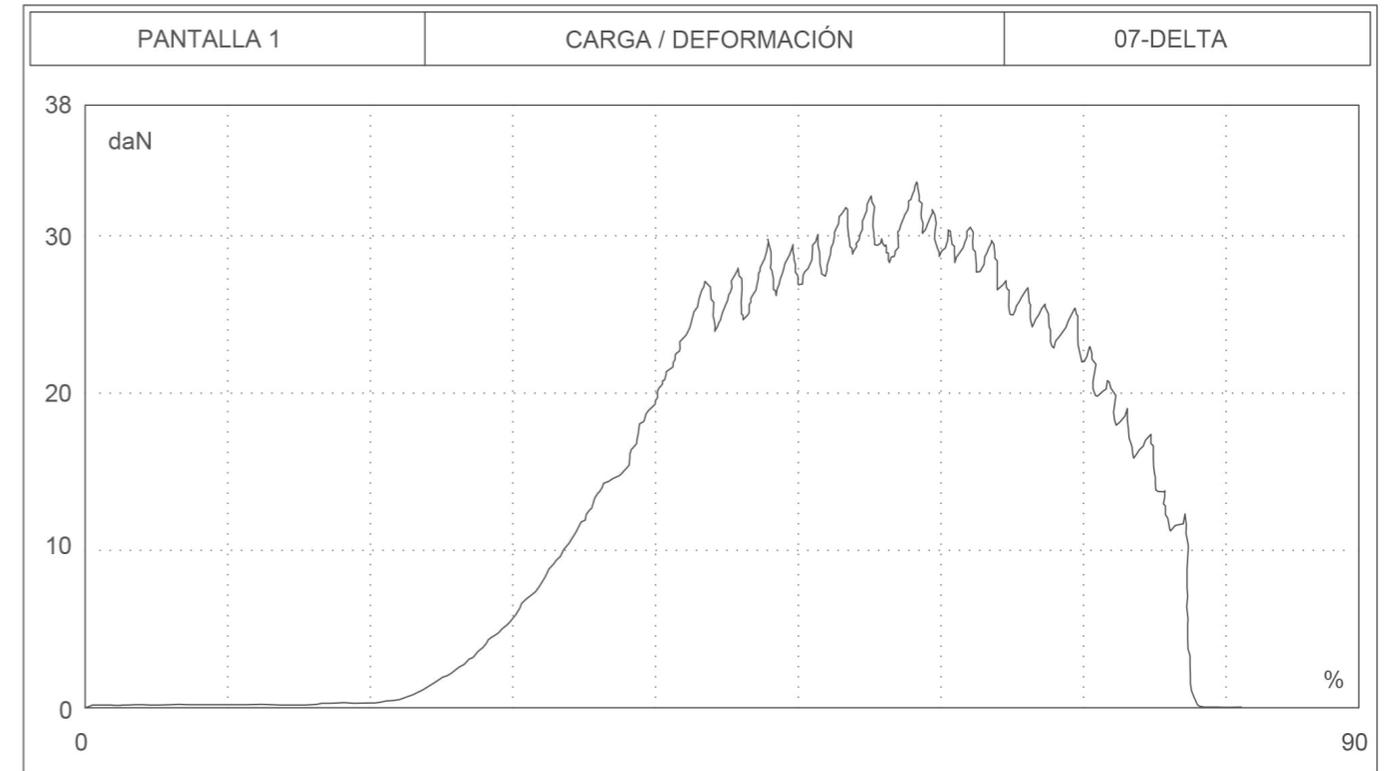
·Dirección urdido



RESULTADOS MUESTRA 1 LOTE 2
 Carga a peak 40.71 daN
 Deformación a peak 51.56 %
 Carga a % 0.01526 daN
 Deformación a daN %

Fig. 8.3 Reelaboración de diagrama Tensión-Deformación en ensayo de desgarre uniaxial en la dirección del urdido. Ensayo de Industrial Sedó

·Dirección trama



RESULTADOS MUESTRA 1 LOTE 2
 Carga a peak 40.71 daN
 Deformación a peak 51.56 %
 Carga a % 0.01526 daN
 Deformación a daN %

Fig. 8.4 Reelaboración de diagrama Tensión-Deformación en ensayo de desgarre uniaxial en la dirección de la trama. Ensayo de Industrial Sedó

9. INFORMACIÓN DE TABLAS

Tabla 3.1 Ventajas del sistema constructivo de las estructuras tensadas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.2 Productos utilizados como membranas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3 Propiedades comparativas generales de membranas para estructuras tensadas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.1 Propiedades generales de los hilos.

Fuente: Forster y Mollaert.

Tabla 5.2 Ventajas y desventajas de distintos patrones de tejido.

Fuente: Reelaboración de tabla de Shaeffer.

10. INFORMACIÓN DE FIGURAS Y VÍDEOS

Imagen de portada Fachada de ETFE en embajada de EEUU, Londres. Imagen propia.

Fig. 1.1 Tienda nómada. Imagen de Moa Corsi.

Fig. 3.1 Envolvente de PES-PVC en el Millennium Dome, Londres. Imagen propia.

Fig. 3.2 Placas de PMMA en el Estadio olímpico de Múnich. 1968-1972. Frei Otto. Imagen de Jorge Royan.

Fig. 3.3 Membranas de PES-PVC conforman la fachada del Hospital de Cartagena. 2009. Imagen de IASO.

Fig. 3.4 Chimenea de membranas de ETFE en Cristalleries Planell. HARquitectes. Imagen de HARquitectes.

Fig. 3.5 Membranas de absorción acústica de ETFE. Barrisol MCBR-ETFE Barrisol. Imagen de Barrisol.

Fig. 3.6 Membranas de fibra de vidrio en la fachada de Zenith Music Hall. Estrasburgo. Imagen de Fuksas.

Fig. 3.7 Membranas de PVC en restaurante Les Cols, RCR. Imagen de Pep Sau.

Fig. 3.8 Membrana de PVC en escultura Marsyas, Anish Kapoor. Tate Modern, Londres. 2002. Imagen de Tate Picture Library.

Fig. 3.9 Silkchair, de Alvidesign. Imagen de Alvidesign.

Fig. 3.10 Clasificación de las estructuras tensadas en función del material del elemento superficial tensado. Fuente: Elaboración propia.

Fig. 3.11 Red textil en House for Contemporary Art Z33. Imagen de Numen.

Fig. 3.12 Red metálica en el Burger zoo, Holanda, 2002. Imagen de Carl Stahl Architektur.

Fig. 3.13 Características de los cerramientos de membrana tensada. Imagen de Forster y Mollaert. Créditos: Thibaut Devulder.

Fig. 3.14 Estrategias de ventilación (a) durante el verano y (b) durante el invierno. Imagen de Forster y Mollaert. Créditos: Thibaut Devulder.

Fig. 3.15 Transmitancia de membranas de doble capa. Reelaboración de imagen de Forster y Mollaert.

Fig. 3.16 Ambiente lumínico en el interior del Millennium Dome. Imagen de Skibbereen Eagle.

Fig. 3.17 Membranas acústicas Barrisol. Imagen de Barrisol.

Fig. 4.1 Cojines de ETFE en Allianz Arena, Munich. Imagen de Temme Obermeier GmbH.

Fig. 4.2 Gráfica tensión-deformación de membrana de ETFE. Reelaboración de imagen de López, Oliván y Maldonado.

Fig. 4.3 Cerramiento de ETFE. Serpentine Pavillion, Londres. 2015. SelgasCano. Imagen de Serpentine Gallery.

Fig. 4.4 Protección solar de ETFE en Embajada de EEUU, Londres. Imagen propia.

Fig. 4.5 Detalle de unión de Keder. Imagen de GrabCAD.

Fig. 4.6 Cojines de ETFE con dispositivo para inflado. Imagen propia.

Fig. 5.1 Membrana para estructuras tensadas. Imagen de Forster y Mollaert.

Fig. 5.2 Diagrama tensión-deformación biaxial de las membranas de poliéster. Imagen de Shaeffer.

Fig. 5.3 Diagrama tensión-deformación biaxial de las membranas de fibra de vidrio. Imagen de Shaeffer.

Fig. 5.4 Sección típica de la membrana PES-PVC de Mehler. Imagen de Giugliano.

Fig. 5.5 Esquema de reutilización de las membranas de PES-PVC de Mehler. Imagen de Giugliano.

Fig. 5.6 Esquema de las direcciones de los hilos del tejido. Imagen de Shaeffer.

Fig. 5.7 Hilos y tejido entrelazado normal e Hilos y tejido entrelazado 2-2 (o Panamá). Imagen de Forster y Mollaert.

Fig. 5.8 Esquema de los componentes del recubrimiento. Fuente: Elaboración propia.

Fig. 5.9 Recubrimiento de PTFE sobre tejido. Imagen propia.

Fig. 5.10 Patrón de sarga en tejido de fibra de vidrio. Imagen de Rock West Composites.

Fig. 5.11 Esquema general de la fabricación de las membranas PES-PVC. Fuente: Elaboración propia.

Fig. 5.12 Bobinas de hilo de poliéster. Industrial Sedó. Imagen propia.

Fig. 5.13 Preparación de los carretes de hilo de poliéster. Industrial Sedó. Imagen propia.

Fig. 5.14 Tejido del poliéster en telares. Industrial Sedó. Imagen propia.

Fig. 5.15 Preparación de la mezcla de PVC. Industrial Sedó. Imagen propia.

Fig. 5.16 Revestimiento del tejido de poliéster. Industrial Sedó. Imagen propia.

Fig. 5.17 Soldaduras en piezas de membranas de PES-PVC. Imagen propia.

Fig. 6.1 Deformación angular de un tejido. Imagen de Forster y Mollaert.

Fig. 6.2 Dispositivo de ensayo de tracción biaxial. Imagen de Base Structures.

Fig. 6.3 Muestra trapezoidal para ensayo de desgarre. Industrial Sedó. Imagen propia.

Fig. 6.4 Ensayo de desgarre. Industrial Sedó. Imagen propia.

Fig. 6.5 Ensayo de desgarre biaxial. Imágenes de Laboratorio Blum.

Fig. 6.6 Esquema de ensayo de adherencia. Reelaboración de imagen de Mecmesin.

Fig. 6.7 Ensayo de cargas a largo plazo. Imágenes de Laboratorio Blum.

Fig. 6.8 Dispositivo para ensayo de desgaste. Imágenes de Laboratorio Blum.

Fig. 6.9 Ensayo de drenaje. Imágenes de Laboratorio Blum.

Fig. 6.10 Análisis microscópico de ETFE. Imagen de Laboratorio Blum.

Fig. 6.11 Análisis microscópico de membrana de PES-PVC. Imagen de Laboratorio Blum.

Fig. 6.12 Ensayo de explosión en membrana de ETFE. Imagen de Blum, Bögner-Balz y Köhnlein.

Fig. 6.13 Prueba de unión y Prueba de borde. Imágenes de Laboratorio Blum.

Fig. 8.1 Reelaboración de diagrama Tensión-Deformación en ensayo de tracción uniaxial en la dirección del urdido. Ensayo de Industrial Sedó.

Fig. 8.2 Reelaboración de diagrama Tensión-Deformación en ensayo de tracción uniaxial en la dirección de la trama. Ensayo de Industrial Sedó.

Fig. 8.3 Reelaboración de diagrama Tensión-Deformación en ensayo de desgarre uniaxial en la dirección del urdido. Ensayo de Industrial Sedó.

Fig. 8.4 Reelaboración de diagrama Tensión-Deformación en ensayo de desgarre uniaxial en la dirección de la trama. Ensayo de Industrial Sedó.

Vídeo 6.1 Ensayo de tracción uniaxial en membrana de PES-PVC. Industrial Sedó. Fuente propia.

Vídeo 6.2 Ensayo de desgarre en membrana de PES-PVC. Industrial Sedó. Fuente propia.

11. REFERENCIAS

- (1) B. F. López, M.L. Oliván, C.D. Maldonado. *Proceso, recomendaciones y guía para el diseño, montaje e instalación de la lámina de ETFE*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- (2) CROOME D, MOSELEY, P. (1984). *Energy and Thermal performance of airhouses*. The design of air-supported structures, the Institute of Structural Engineers.
- (3) EUNI SON, M. (2004). *The Design and Analysis of Tension Fabric Structures*. University of California, Berkeley, EEUU.
- (4) FANG, R. (2008). *The Design and Construction of Tension Fabric Structures*. Cornell University, Nueva York, EEUU.
- (5) FORSTER, B. Y MOLLAERT, M. (2009). *Arquitectura Textil. Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas*. Madrid: Munilla-Lería.
- (6) GIUGLIANO, P. (2008). *Technical guideline to permanent tensile architectures*. Mehler Technologies
- (7) J. LLORENS. *Textile Roofs: Pathology*. 21st International Workshop on the design and Practical Realisation of Membrane Structures.
- (8) KUUSISTO, K. (2010). *Textile in Architecture*. Tampere University of Technology, Finlandia.
- (9) LECUYER, A. (2008). *ETFE: Technology and Design*. Basilea: Birkhäuser Verlag AG.
- (10) LEOPOLDO, A. P. (2016). *Polymeric Membranes in Architecture*. Universidad Técnica de Lisboa, Portugal.
- (11) SCHWARTZ P. (2008). *Structure and Mechanics of Textile Fibre Assemblies*. Cambridge. Woodhead Publishing Limited.
- (12) WILSON, A. (2013). *ETFE Foil: A Guide to Design*. Architen Landrell.
- (13) WYERMAN B. (1984). *Acoustical design guidelines for fabric structures*. International Symposium on Architectural Fabric Structures: The Design Process.

12. BIBLIOGRAFÍA

LIBROS, REVISTAS Y ARTÍCULOS

- BAHAMÓN, A. (2004). *Arquitectura textil. Transformar el espacio*. Barcelona: Instituto Monsa de Ediciones S.A.
- BLUM R., BÖGNER-BALZ H., KÖHNLEIN J. (2016). *On the mechanical behaviour of ETFE-films: Elastic range, yielding conditions, break determined by different test methods and the influence of the results on the analysis of ETFE-structures*. International Symposium on “Novel Structural Skins: Improving sustainability and efficiency through new structural textile materials and designs.
- CASSINELLO, P., BÖGLE, A., CACHOLA S., P., Schlaich Bergermann und Partner (2011). *Estructuras ligeras*. Madrid: Mairera libros.
- CREMERS, J., KNIPPERS, J., GABLER, M., LIENHARD, J. (2011). *Construction Manual for Polymers + Membranes: Materials semi-finished products form-finding design*. Múnich: Birkhäuser Verlag AG.
- CROOME D, MOSELEY, P. (1984). *Energy and Thermal performance of airhouses*. The design of air-supported structures, the Institute of Structural Engineers.
- FORSTER, B. Y MOLLAERT, M. (2009). *Arquitectura Textil. Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas*. Madrid: Munilla-Lería.
- LECUYER, A. (2008). *ETFE: Technology and Design*. Basilea: Birkhäuser Verlag AG.
- LLORENS, J. (2016). *Textile Roofs: Pathology*. 21st International Workshop on the design and Practical Realisation of Membrane Structures.
- LÓPEZ, B. F.; OLIVÁN, M.L.; MALDONADO C.D. (2016). *Proceso, recomendaciones y guía para el diseño, montaje e instalación de la lámina de ETFE*. XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Mérida, Yucatán: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- LUDWIG G. (1972). *The work of Frei Otto*. Nueva York: The Museum of Modern Art.
- SCHWARTZ P. (2008). *Structure and Mechanics of Textile Fibre Assemblies*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

SHAEFFER, R.E. (1996). *Tensioned Fabric Structures: A Practical Introduction*. New York: NY. American Society of Civil Engineers.

TEJERA, J. (2011). *Construir con membranas*. Revista Tectónica nº 36. Madrid : ATC Ediciones

WILSON, A (2013). *ETFE Foil: A Guide to Design*. Architen Landrell.

WYERMAN B. (1984). *Acoustical design guidelines for fabric structures*. International Symposium on Architectural Fabric Structures: The Design Process.

TESIS

EUNISON, M. (2004). *The Design and Analysis of Tension Fabric Structures*. University of California, Berkeley, EEUU.

FANG, R. (2008). *The Design and Construction of Tension Fabric Structures*. Cornell University, Nueva York, EEUU.

KUUSISTO, K. (2010). *Textile in Architecture*. Tampere University of Technology, Finlandia.

LEOPOLDO, A.P. (2016). *Polymeric Membranes in Architecture*. Universidad Técnica de Lisboa, Portugal.

INFORMACIÓN DE EMPRESAS

GIUGLIANO, P. (2008). *Technical guideline to permanent tensile architectures*. Mehler Technologies

LABORATORIO BLUM (2011). *Laboratory testings on fabrics*. International Textile Architecture Seminar, Toledo.

WEBS DE FABRICANTES DE TEJIDOS

Barrisol. www.barrisol.com

Base Structures. www.basestructures.com/

Industrial Sedó. www.industrialsedo.com

Mehgies. www.mehgies.com

Moñita. www.monita.es

Serge Ferrari. www.sergeferrari.com

Tecnodimension. www.tecnodimension.com

Versedaig. www.verseidag.de/es

WEBS DE FIGURAS

Alvidesign. <http://alvidesign.se/alvi-silkchair/>

Barrisol. <http://barrisol.com/es/productos/gama-de-productos/acoustic>

Base Structures. <http://www.basestructures.com/services/design/>

Carl Stahl Srchitecture. https://www.carlstahl-architektur.com/1/references/reference/news/burgers-zoo/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=48f566ab86837c967335321e98994112

Fuksas. <http://fuksas.com/?p=638>

GrabCAD. <https://grabcad.com/library/etfe-membrane-profile-1>

HArquitectes. <http://www.harquitectes.com/projectes/centre-civic-cristalleries-planell-barcelona/>

IASO. <https://www.iasoglobal.com/es-ES/proyecto/hospital-de-cartagena>

Jorge Royan. https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Munich_-_Frei_Otto_Tensed_structures_-_5293.jpg

Mecmesin. <https://www.mecmesin.com/peel-test-adhesion-testing>

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

Numen. <http://www.numen.eu/installations/net/hasselt/>

Pep Sau. <https://www.archdaily.com.br/br/874396/rcr-arquitectes-1988-2017-arquitectura-viva/5927a1cce58ece97f60000a4-rcr-arquitectes-1988-2017-arquitectura-viva-foto>

Rock West Composites. <https://www.rockwestcomposites.com/303tex-410-group>

Serpentine Gallery. <https://www.serpentinegalleries.org/exhibitions-events/serpentine-pavilion-2015-designed-sel-gascano>

Skibbereen Eagle. <http://www.skibbereeneagle.ie/architecture/londons-dome/>

Tate Picture Library. <https://www.tate.org.uk/whats-on/tate-modern/exhibition/unilever-series/unilever-series-ani-sh-kapoor-marsyas>

Temme Obermeier GmbH. <https://www.to-experts.com/en/projects/detailview-references/maintenance-of-etfe-cushions-and-inner-ceiling/>

