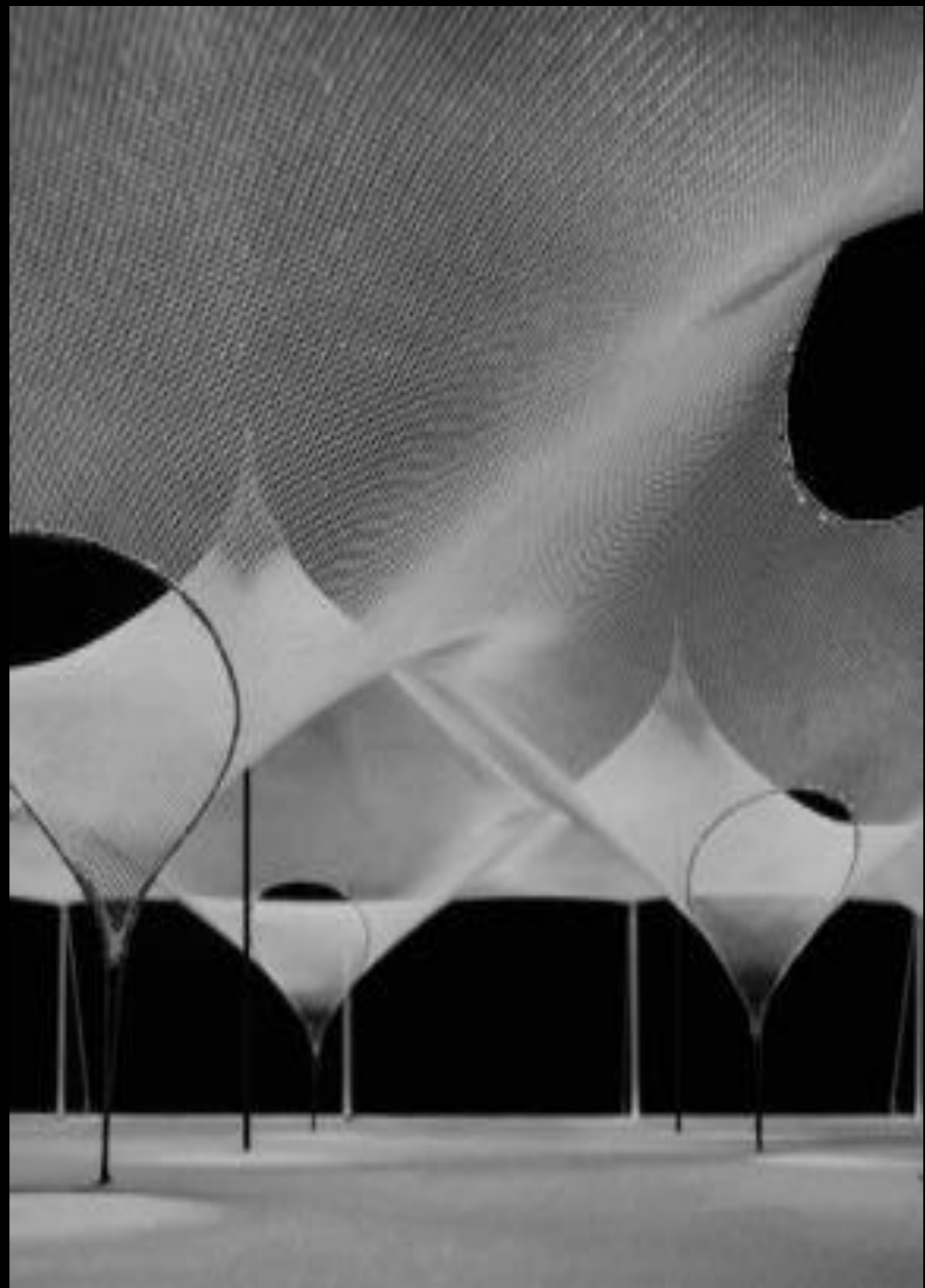


Arquitectura tensada

EVOLUCIÓN Y APLICACIONES



TRABAJO FIN DE GRADO

ARQUITECTURA TENSADA: EVOLUCIÓN Y APLICACIONES

GRADO EN FUNDAMENTOS DE ARQUITECTURA Y URBANISMO



UNIVERSIDAD DE ALCALÁ DE HENARES

AUTOR: HINCAPIÉ LÓPEZ, JHON

TUTORES: MIGUEL SANCHEZ, MANUEL DE
LASTRA SEDANO, ALBERTO

CURSO: 2020/2021

FECHA: 23 DE JULIO DE 2021

“La Arquitectura Textil está en el límite de la expresión de la naturaleza y consigue ambientes habitables con el mínimo de materiales.”

Arquitectura Textil. Monjo Carrió

ÍNDICE

1. RESUMEN
2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS
3. JUSTIFICACIÓN DE LA ARQUITECTURA TENSADA
4. COMPORTAMIENTO DE LA MEMBRANA
 - 4.1 FORMA
 - 4.1.1 MEMBRANA TENSADAS ANTICLÁSTICAS
 - 4.1.2 MEMBRANAS TENSADAS SINCLÁSTICAS
 - 4.2 PRETENSIÓN
 - 4.3 DEFORMABILIDAD
5. APLICACIONES DE LA ARQUITECTURA TENSADA
 - 5.1 ESTRUCTURA ABIERTA
 - 5.1.1 CUBIERTA CON ESTRUCTURA ABIERTA
 - 5.1.2 INTERIOR CON ESTRUCTURA ABIERTA
 - 5.1.3 ADOSADO CON ESTRUCTURA ABIERTA
 - 5.2 ESTRUCTURA CERRADA
 - 5.2.1 CUBIERTA CON ESTRUCTURA CERRADA
 - 5.2.2 INTERIOR CON ESTRUCTURA CERRADA
 - 5.2.3 ADOSADO CON ESTRUCTURA CERRADA
 - 5.3 ESTRUCTURA MÓVIL
 - 5.3.1 CUBIERTA CON ESTRUCTURA MÓVIL
 - 5.3.2 INTERIOR CON ESTRUCTURA MÓVIL
 - 5.3.3 ADOSADO CON ESTRUCTURA MOVIL
6. ESTUDIO DE LOS MATERIALES
 - 6.1 TIPOS DE MATERIALES
 - 6.2 PROPIEDADES DE LAS MEMBRANAS DE TEJIDOS
 - 6.3 MEMBRANAS DE PES-PVC
 - 6.4 MEMBRANAS DE FIBRA DE VIDRIO
 - 6.5 LAMINADO DE ETFE
7. MODELADO DE CUBIERTA, PARQUE OLIMPICO DE MÚNICH, FREI OTTO Y GÜNTER BEHNISCH (1972)
8. CONCLUSIÓN

1. RESUMEN

El trabajo surge del interés sobre la arquitectura tensada, sus propiedades y aplicaciones. Comenzará con el estudio de las diferentes culturas que utilizaron este modelo estructural.

A lo largo del mismo, se analizarán las diferentes cualidades de esta arquitectura y el comportamiento de la membrana. Además, se clasificarán la tipología de estructuras que proporciona la Arquitectura tensada.

A continuación, se estudiarán los diferentes materiales con el objetivo de escoger el mejor, y satisfacer así las exigencias del proyecto.

Finalmente, se analizará la cubierta del Parque Olímpico de Múnich del arquitecto Frei Otto de 1972.

PALABRAS CLAVE

Arquitectura tensada, membrana, tejido, arquitectura textil, PVC, EFTE.

ABSTRACT

The work arises from the interest in tensioned architecture, its properties and applications. It will begin with the study of the different cultures that used this structural model.

Throughout it, the different qualities of this architecture and the behavior of the membrane will be analyzed. In addition, the typology of structures provided by Tensioned Architecture will be classified.

Next, the different materials will be studied in order to choose the best one, and thus satisfy the demands of the project.

Finally, the roof of the Munich Olympic Park by the architect Frei Otto from 1972 will be analyzed.

KEY WORDS

Tensile architecture, membrane, fabric, textile architecture, PVC, EFTE.

2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Tiendas primitivas

Las construcciones arquitectónicas más primitivas y naturales, siguen con nosotros y mantienen un papel significativo hoy en día. Los orígenes de esta arquitectura podemos encontrarla gracias a los restos de hace 40.000 años en Ucrania, cuando usaron hueso de mamut y pieles de animal para crear un espacio para protegerse del clima y del resto de agresiones externas, siendo estas pieles uno de los primeros recursos utilizados por el hombre.

“surge del estudio y la observación del modo en que repercuten una serie de factores en la apariencia particular de la arquitectura: la utilidad, propósito o finalidad, las sustancias materiales, las artes técnicas, las instituciones del poder y del culto, las formas de vida, los caracteres y condiciones del sitio e incluso la personalidad de quien hace el encargo o de quien concibe o ejecuta la obra” (Daniel García-Escudero, Berta Bardí i Milà, 2015)

Al construirse las tiendas de forma natural y en poco tiempo, además de un fácil desmontaje y transporte estas construcciones se han relacionado con una cultura nómada, hoy en día hay características que se mantienen en construcciones de arquitectura tensada como su montaje efímero, móvil o ligero, pero la evolución de esta técnica de construcción, la mejora en los materiales, los tejidos y las fibras utilizadas, han generado una gran diversidad de proyectos en la arquitectura contemporánea y en el diseño interior. (Bahamón, Minguet, 2004)

La arquitectura vernácula

La arquitectura vernácula no tiene un autor propio, pero ha sido un tema de análisis por los arquitectos por como la experiencia, vivencias y su entorno son tan importantes en la arquitectura, por

ejemplo, Le Corbusier tuvo un encargo de La Asamblea Legislativa en la India (Imagen 1) donde plasmó lo primero que le cautivó al llegar que fueron los cuernos de un toro que le sirvió para inspirarse en este proyecto (Sendai, 2005). Vemos, como los diferentes lugares y experiencias nos repercuten.

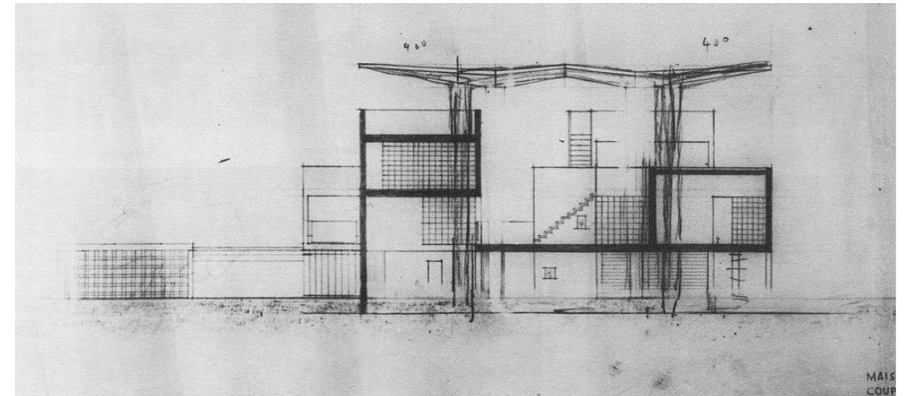


Imagen 1. South-west Elevation of the Project for Mr. Hutheesing. (Sendai, 2005)

También es importante fijarse en el textil de la arquitectura vernácula ya que gracias al movimiento moderno este textil se ha desarrollado y ha ayudado para crear nuevos materiales.

Es importante para entender el análisis de la arquitectura vernácula fijarse en la relación entre la función de las tiendas y su contexto socioeconómico del grupo en el que se encuentran, también en su estructura, materiales, entorno y su construcción, (Imagen 2) tanto si son construcciones efímeras o para periodos largos.

Las tiendas nómadas en general tienen como característica la necesidad de un continuo montaje y desmontaje por tanto precisan de una estructura flexible y fácil de transportar,

normalmente esta estructura consiste en una forma geométrica en planta circular o cuadrada de fácil montaje que se fue transmitiendo de generación en generación, esto hace que tengan una continua transformación. (Bahamón, Minguet, 2004)



Imagen 2. Tienda vernácula (Bahamón, Minguet, 2004)

La tienda Tuareg y el mundo nómada africano

La cultura de los Tuareg está ubicada en el área sur del Sáhara, estudios genéticos enfocados a conocer el origen y la difusión de la especie humana por el planeta en tiempos prehistóricos determinan que esta población es de origen euroasiático como la bereber, sus tribus guerreras se agrupaban en confederaciones independientes y muy difíciles de agrupar, esto facilitó la conquista por parte de los franceses en el siglo XIX. (Peraldi-Mittelette, 2018)

Durante su constante movimiento con sus rebaños y camellos, los materiales que más trabajaban eran el cuero, la madera y el metal produciendo vestimentas, muebles y sus propias tiendas. Una de sus costumbres más importantes era la celebración de una boda, era un acontecimiento donde toda la comunidad proporcionaba materiales para la creación de una nueva casa para el matrimonio, el papel de la mujer era muy importante ya que era la encargada de la fabricación y la preservación de las tradiciones, esto se ve reflejado en el interior de las tiendas. El espacio se conforma de 5 metros de largo por 3 metros de ancho, y se dividen por el mástil o mástiles centrales, los rasgos culturales, sociales y familiares se reflejan en la decoración tanto interior como exterior de la tienda con una gama cromática y dibujos detallados. (Bahamón, Minguet, 2004)

La tienda Beduina y el islam

Originarios de la península arábiga, las conquistas árabes del siglo VII y su estilo de vida nómada ha ido cambiando a lo largo del tiempo. En este momento se han asentado al norte de África y se consideran de ascendencia árabe. (Imagen 3)

Los beduinos viven en tiendas rectangulares que montan y desmontan según las estaciones de lluvia y sequía. Tienen una estructura compuesta por mástiles de madera, tensores de cuerdas y piedras con función de cimentación, la colocación de las piedras y los tensores tienen la función de soportar los fuertes vientos de la región. (Imagen 4) La cubierta está fabricada con pelo de camello y de cabra, los laterales de la tienda se pueden enrollar para que entre la brisa o cerrar en momento de lluvia. (Bahamón, Minguet, 2004)



Imagen 3. Tienda Beduina (Bahamón, Minguet, 2004)

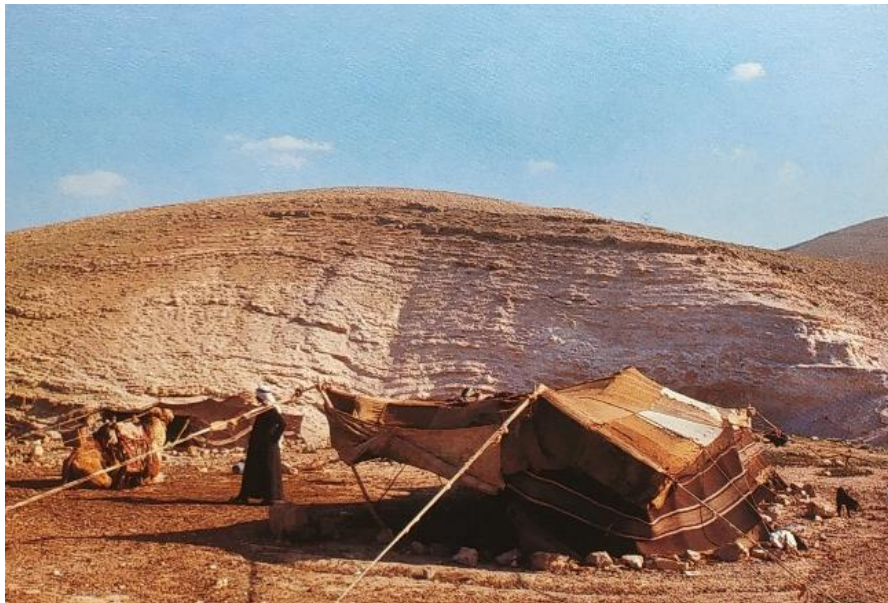


Imagen 4. Tienda Beduina (Bahamón, Minguet, 2004)

Las Yurtas Kazajas y la tienda asiática

Numerosas características de los pueblos de Asia y Oriente próximo se encuentran en la cultura Kazaja que se asentaron en lo que hoy conocemos como Kazajistán, su etnia es procedente de las migraciones mongolas y chinas. Sus características culturales como la composición de sus viviendas temporales son gracias a su situación geográfica y la mezcla cultural. Hablamos de un pueblo nómada que buscaba territorios llanos para su ganado mayormente ovino.

Las tiendas en las que vivían se llaman yurts, estaban acondicionadas para resistir las bajas temperaturas del lugar, tenían una estructura sólida y un poco más complejas que las de otras culturas, las yurts eran de planta circular y un perímetro cilíndrico con una cubierta cónica. (Imagen 5) Estaban compuestas por una estructura robusta de madera y unos 60 mástiles entrelazados entre ellos, con una forma fácil de montar y desmontar. Su envolvente era de fieltro, tejidos de lana y materiales vegetales dando una sensación acolchada en el exterior. Este tipo de tienda se puede encontrar representada en regiones de China, Afganistán, Irán, Turquía o Rusia. (Bahamón, Minguet, 2004)



Imagen 5. Tienda Yurt (Bahamón, Minguet, 2004)

La tienda tipi de Norteamérica

Cuando se habla de los indios norteamericanos se nos viene a la cabeza las tiendas tipi, siendo la tienda típica cónica que construían para sus campamentos. Los nativos norteamericanos era un pueblo claramente nómada que al final del siglo XVIII se establecieron en las praderas centrales del continente norteamericano. Eran principalmente agricultores, pero también cazadores y dominaron una extensa zona del territorio, especialmente desde la llegada de los caballos, introducidos por los españoles.

Su dominio se fue mermando cuando las fronteras de Estados Unidos fueron avanzando hacia el oeste y desaparecieron los bisontes que tenían una gran importancia para esta población, aunque la mayoría de su cultura fue eliminada una gran huella se quedó en la sociedad norteamericana como es la tipología clara de sus tiendas de campaña, teniendo hoy en día muchas variantes.

Las tiendas tipis, usaban como estructura un mástil de madera que se ataba en uno de sus extremos para después crear una forma cónica cubierta por cortezas de árboles, piel de caribú u otros materiales. (Imagen 6) Su facilidad para ser desmontada y transportada como un remolque, que era arrastrado desde uno de sus extremos y además llevaba en su interior las posesiones de cada familia. Además, de su funcionalidad también tenía una connotación espiritual para su cultura. (Bahamón, Minguet, 2004)



Imagen 6. Tienda Tipi de Norteamérica (Bahamón, Minguet, 2004)

Revolución de nuevas fibras textiles. Carpa de circo “Chapiteau”

Los tejidos han sido un instrumento necesario para la protección de las personas, no solo contra el clima sino muchos más usos cotidianos como la caza o las guerras. Los primeros tejidos fueron fabricados con materiales naturales como la seda o la lana, con procesos elementales y posteriormente con un sistema más técnico hicieron posible el uso del algodón y del lino. Hacia finales del siglo XIX con la innovación del rayón o viscosa, que imitaba la seda, pero lograda con fibras artificiales, así los tejidos se volvieron más sofisticados y versátiles. Pero es en el siglo XX fue cuando se revolucionó el estudio con los tejidos sintéticos.

En 1935 se descubrió el nailon, un material de índole nitrogenado del que se hacen filamentos elásticos muy resistentes. Las fibras sintéticas son polímeros, largas cadenas de átomos de carbono, junto a átomos incorporados generalmente de hidrogeno, nitrógeno y oxígeno. Contrario a las fibras naturales que se deterioraban con el paso del tiempo, los

polímeros se pueden disolver o fundir para darle forma de hilo y obtener un material con mayor resistencia y durabilidad.

Un ejemplo claro de esta innovación en el siglo XIX son las carpas de circo, con un diámetro de 50 metros estas están formadas por cuatro mástiles principales situados cerca del centro del anillo donde se encontraba el escenario circense, la lona colgaba de ellos hasta unos postes que se encontraban en el perímetro atirantando así la lona y quedando anclada por cuerdas en el suelo. (Imagen 7) Entre el perímetro y los mástiles principales se encontraba otro anillo de mástiles secundarios colocados en un ángulo de 60° respecto al suelo, creando una pretensión de la tela para disminuir la vibración y el movimiento de la superficie.

Siendo estructuras ambulantes, tenían dos de las principales claves para las estructuras tensada: tienen **forma superficial indeformables** y tienen **pretensión**. (Forster, Mollaert, 2009)

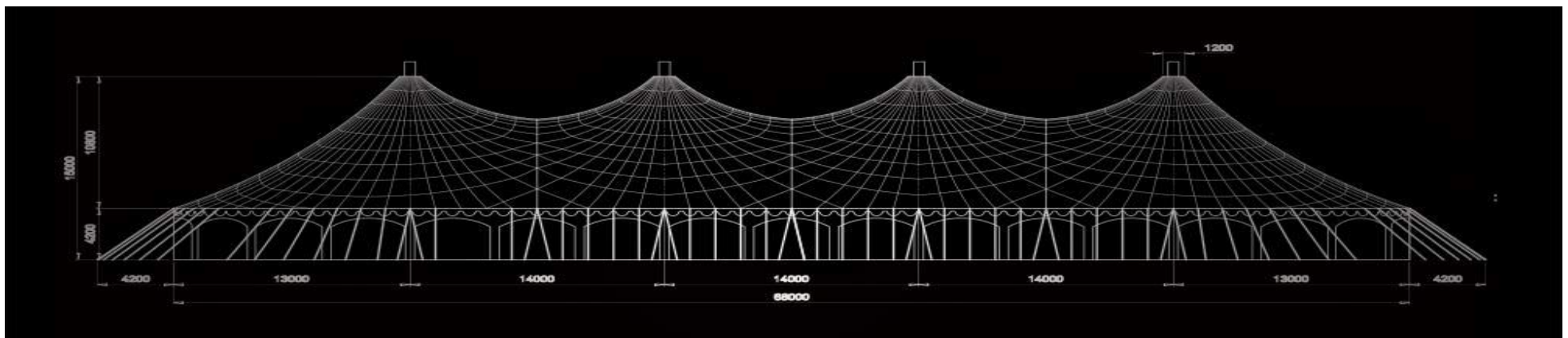


Imagen 7. Chapiteau, Arquitectónicos tensos, Imagen obtenida de: <http://www.arcade-reception.fr/project/chapiteaux/>

En la línea temporal de la arquitectura tensada podemos destacar tres aspectos muy importantes que debemos tener en cuenta para entender el desarrollo de este tipo de arquitectura.

Flexibilidad: en la primera etapa de la línea de tiempo se encuentra que los beduinos fueron una de las culturas que utilizó los materiales textiles para autoconstruir sus espacios provisionales, asimismo, en el coliseo romano se tuvo otra aplicación de la estructura provisional, utilizando el principio importante de que dicha estructura debía ser flexible para adecuar el espacio a otros requerimientos.

Prefabricación: en la segunda etapa de la línea de tiempo nos encontramos con el uso de la geometría aplicada a la tecnología industrial. Con el descubrimiento de materiales más fuertes y ligeros surgieron innumerables prototipos prefabricados que ayudaron a construir este tipo de espacios grandes con gran rapidez; poco después, la aparición de materiales ligeros ayudó a generar geometrías más auto equilibradas. El doctor Frei Otto (1962), con su sistema de tenso-estructura, cubría espacios arquitectónicos más rápido en la construcción. Estas aplicaciones demuestran que una estructura geometrizada y bien diseñada puede cumplir con varias funciones y se ajusta a diferentes entornos fácilmente.

Transformación: en la última etapa de la línea del tiempo se encuentra que las estructuras plegables tienen la capacidad de transformar el espacio, esto porque la sociedad demanda áreas más dinámicas y multifuncionales. (Morales-Guzmán, 2018)

3 Justificación del uso de la arquitectura tensada

Todo el proceso histórico en las diferentes partes del mundo, el complemento tecnológico y la evolución de las membranas tensadas, nos facilitará el análisis del uso real hoy en día de las nuevas soluciones que nos proporciona la arquitectura tensada. Como sistema constructivo tiene cualidades muy especiales, sobre todo la forma que se puede conseguir con ello y por la naturaleza de los materiales que componen la membrana; por tanto, presenta soluciones arquitectónicas que los sistemas constructivos tradicionales no nos podrían ofrecer.

Este tipo de estructuras requieren una mano de obra especializada, que cuida los detalles. Es un trabajo casi artesano que prima la calidad a la cantidad, por lo que genera mucho más empleo. (Navarro Carreto, 2019)

1 En primer lugar, una de sus cualidades es la posibilidad de cubrir o cerrar grandes espacios a un coste muy reducido y además con una gran rapidez de ejecución. La capacidad estructural y peso reducido ($\leq 1 \text{ Kg/m}^2$) ayudan para resolver proyectos de grandes luces con un coste bajo en la estructura y en la propia membrana. (Gallardo et al., 2020)

Puede cubrir luces de 10m a 30m de luz libre. En cuanto a su ejecución si contamos que la membrana puede venir prefabricada con todas sus cualidades de taller que estudiaremos más adelante y que, por tanto, la obra precisa de la ejecución de las estructuras de soporte y la sujeción de la membrana.

Por otro lado, la ligereza de las estructuras tensadas se debe por la estabilidad estructural que se encuentra en la forma pretensada

de la membrana más que por la masa de los materiales que utilizamos. (Imagen 8)

Por tanto, son mucho más ligeras que las estructuras construidas convencionales, pero ofreciendo una gran estabilidad, esto se expresa gracias a la combinación de una masa baja y grandes espacios cubiertos de manera coherente y uniforme en la organización y configuración de todos los detalles. (Monjo Carrió, 1985)



Imagen 8. Tensed structures, Parque Olímpico de Múnich, de Frei Otto y Günter Behnisch (1972) (imagen obtenida de: <https://revistalibero.com/blogs/contenidos/lapiel-de-serpiente-del-olimpico-de-munich>)

2 Por otra parte, debemos tener en cuenta el carácter de temporalidad de algunas cubiertas tensadas, a pesar de la resistencia de dicho material, su carácter prefabricado y flexible tiene la posibilidad de un fácil montaje y desmontaje, por tanto, transportable.

Por ejemplo, esta es una característica de las carpas de los circos, exposiciones, pabellones, etc. Y es una de las características que podemos atribuir a proyectos cuando su uso es temporal por ejemplo mercados públicos o piscinas en la que su estructura es fija, pero tiene la necesidad de que la membrana sea plegable o desmontable, este factor será condicionante en su confección.

La ligereza de su estructura tensada le proporciona una clara ventaja sobre otras construcciones. También hay que tener en cuenta que todas estas características, son además esenciales en momentos de catástrofes y emergencias cuando se precisa dar cobijo a un gran número de personas y en poco tiempo.

Por otra parte, los proyectos de estructuras móviles pueden ser igual de confortables que los proyectos de edificación convencional dando así un nuevo punto de vista en el campo de la construcción, eso sí separando las propiedades del edificio y las del terreno. (Imagen 9)

“El edificio se vuelve mueble en vez de ser inmueble, lo cual es de gran importancia en el desarrollo acelerado de las ciudades de hoy en día, con los consiguientes cambios del uso en zonas especiales, puesto que tales edificios pueden moverse y volverse a usar” (Forster, Mollaert, 2009) Pag 81.



Imagen 9. Cubierta Starwave para la “la Biennale di Venezia 1996”, Frei Otto, SL Rasch. Estructura móvil para exposición con cimentación temporal mediante contrapesos. (Rasch Archivos)

3 El ambiente que proporciona el cerramiento es un carácter del proyecto muy importante a tener en cuenta. Al ser una membrana puede ser que esta no nos proporcione un fantástico aislamiento, pero tendríamos que estudiar qué tipo de material sería el más adecuado si es lo que buscamos, en algún caso nos puede proporcionar un mejor contacto con el entorno exterior.

Por un lado, tenemos la transmisión lumínica de la membrana, que es variable según el tipo de tejido o recubrimiento, ofreciendo una gama de transmisión pequeña de luz para las más opacas, del orden del 10%, hasta una gran transmisión para las más claras, del orden del 50%. Vemos, pues, que el ambiente interior bajo una cubierta tensada puede ser muy variable y adaptarse a las necesidades de iluminación, llegando a proporcionar una oscuridad total con el uso de membranas opacas.

Por otra parte, el aislamiento térmico puede ser que sea bajo, pero gracias a las nuevas tecnologías podemos obtener un fantástico rendimiento con los nuevos materiales que hay en el mercado, sin embargo, mediante el diseño de la cubierta y el proyecto en sí, podemos ayudarnos de las energías naturales a nuestra conveniencia, por ejemplo, en invierno tenderemos a buscar el efecto invernadero y aprovechamos de la transmitancia de la energía solar. (Imagen 10) Si el aire en el interior lo mantenemos en reposo, la membrana nos ayudará a captar la energía calorífica del exterior y las radiaciones directas como las difusas, aumentando así la temperatura en el interior. (Monjo Carrió, 1985)

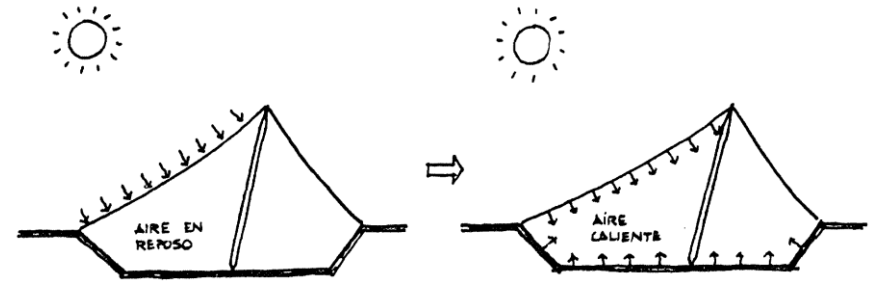


Imagen 10. Efecto invernadero, LA ARQUITECTURA TEXTIL (TEXTILE ARCHITECTURE) Juan Monjo Garrió, Doctor Arquitecto Catedrático de Construcción de la E.T.S. de Arquitectura de Valladolid.

En verano lo que buscamos es lo contrario al efecto invernadero, (Imagen 11) trabajaremos con el efecto sombrilla, en este caso vamos a evitar las radiaciones directas a través de la membrana, estableciendo corrientes naturales de aire de bajo de ella, preferiblemente de dirección ascendente, con el objetivo de una renovación constante del aire, bajando así la temperatura del interior.

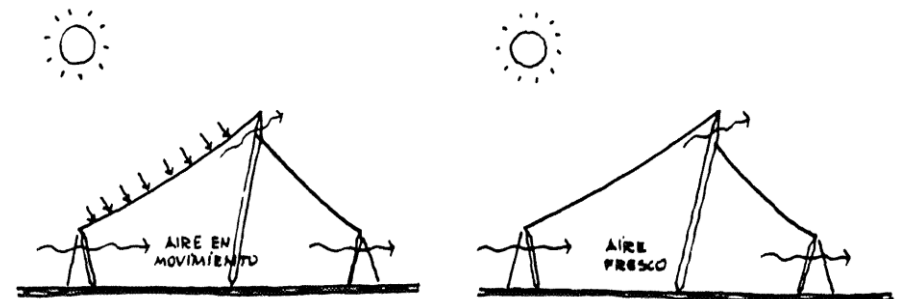


Imagen 11. Efecto sombrilla, LA ARQUITECTURA TEXTIL (TEXTILE ARCHITECTURE) Juan Monjo Garrió, Doctor Arquitecto Catedrático de Construcción de la E.T.S. de Arquitectura de Valladolid.

Como ejemplo de proyectos, (Imagen 12) este aeropuerto Haj en Jeddah (Arabia Saudí) se encuentra en pleno desierto y consigue temperaturas de 24°C, gracias al diseño de la cubierta que proporciona un continuo cambio del aire en el interior.



Imagen 12. King Abdulaziz International Airport Hajj Terminal, Jeddah, Saudi Arabia - Fazlur Rahman Khan for Skidmore, Owings & Merrill (1981) (imagen obtenida de: <https://document.onl/documents/carpas-o-velarias.html>)

En definitiva, el uso de estas soluciones va acompañado de un buen diseño de proyecto que aproveche estructuralmente la membrana y obtenga una forma adecuada del entorno, (Imagen 13) en cualquier caso, podemos distinguir dos funcionalidades: en la que la membrana proporciona un uso integral del proyecto como solución arquitectónica o un complemento al diseño y función del edificio. (Monjo Carrió, 1985)

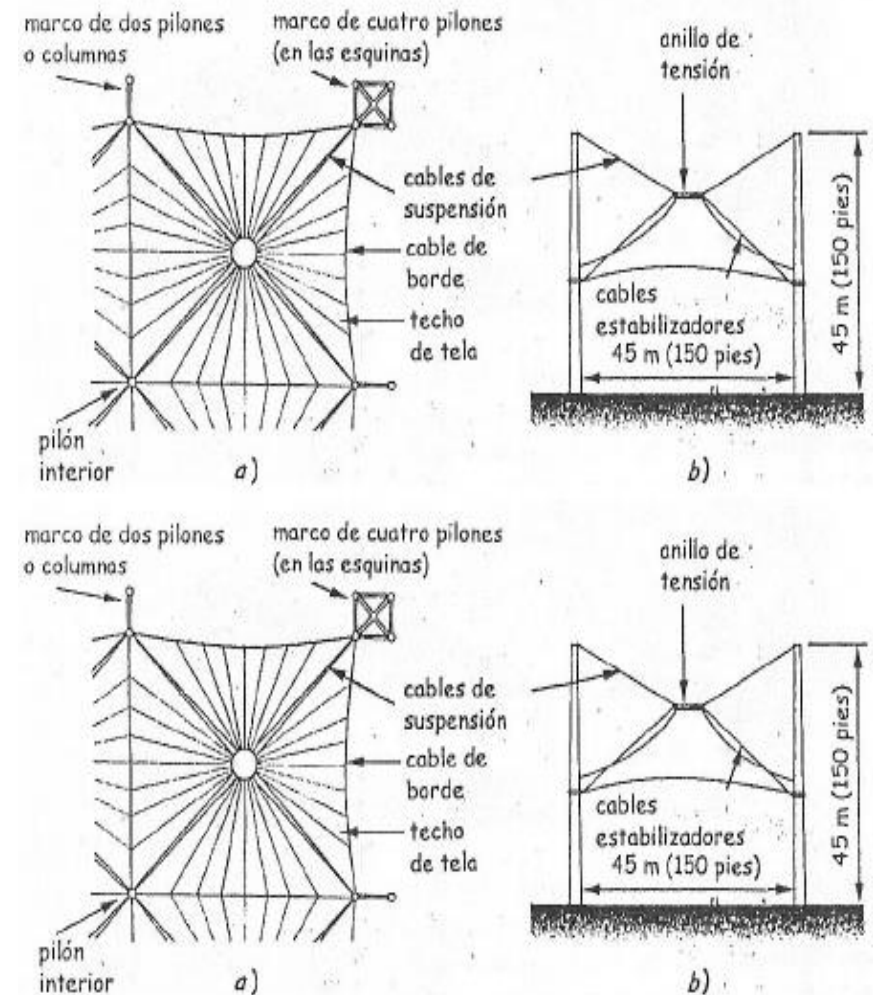


Imagen 13. King Abdulaziz International Airport Hajj Terminal, Jeddah, Saudi Arabia - Fazlur Rahman Khan for Skidmore, Owings & Merrill (1981) (imagen obtenida de: <https://document.onl/documents/carpas-o-velarias.html>)

4 Otra de las principales cualidades de una cubierta es la protección ante los agentes atmosféricos y proporcionar confort ante el sol, la lluvia, el viento y la nieve. La elección del material y la forma de la membrana se han de adaptar al lugar y a sus características atmosféricas. Siempre que sea posible debemos usar los medios pasivos para esta protección utilizando la propia arquitectura para minimizar el consumo energético del edificio.

Para proteger de la lluvia y de la nieve la forma de la membrana debe permitir una buena evacuación, esta debe de ser rápida y fácil, para evitar embolsamientos en la membrana por acumulación del agua o nieve.

Las estructuras de las membranas tensadas son especialmente susceptibles a estos agentes especialmente en su fase de montaje, hasta que establezcamos su forma y pretensión final. El material y sus uniones han de ser impermeables para que no penetre la lluvia y además hay que tener especial cuidado a la hora de proyectar sus bordes con el fin de que no se produzca la de agua hacia el interior de la membrana.

Por ejemplo, nos fijamos en la cubierta modular para asambleas en Malasia, (Imagen 14) se desarrolló la estructura móvil, modular, para condiciones de confort en clima tropical por Jürgen Bradatsh con Frei Otto para SL -Rasch en 1997. Entre las soluciones del diseño la forma arquitectónica más las propiedades térmicas del tejido para evitar la transmisión excesiva de las radiaciones solares y para incrementar la ventilación natural. (Imagen 15) La hoja de membrana externa está hecha con un tejido de hilos abiertos, evitando la excesiva radiación de la segunda membrana, que es impermeable. (Forster, Mollaert, 2009)



Imagen 14. Cubierta modular para asambleas, SL Rasch y Jürgen Bradatsh con Frei Otto, Malasia 1997 (Forster, Mollaert, 2009)

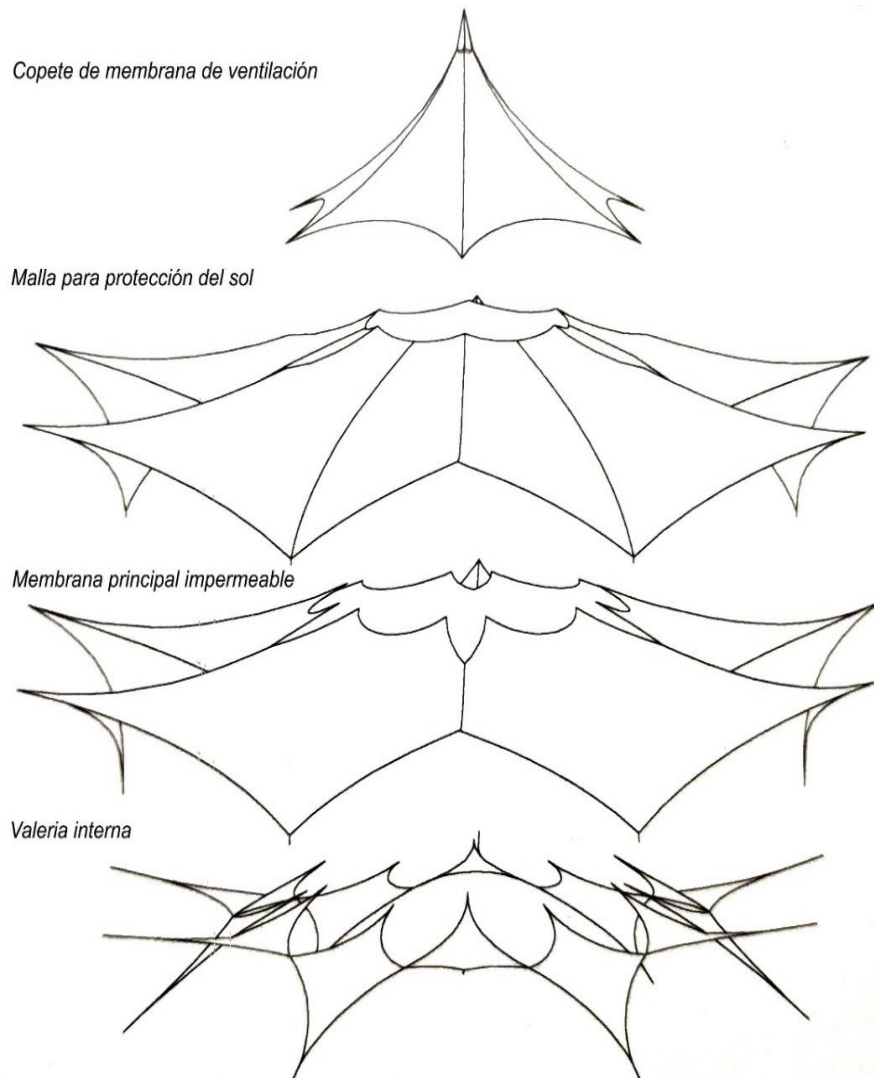


Imagen 15. Cubierta modular para asambleas, SL Rasch y Jürgen Bradatsch con Frei Otto, Malasia, 1997. (Forster, Mollaert, 2009) Pag 80.

5 La estructura de la membrana tensada no tiene carácter de rigidez como tenemos en mente cuando pensamos en una estructura convencional, esta cambia de forma bajo la influencia del viento, la nieve, etc. Las formas geométricas de la membrana responden a unas cargas aplicadas deformándose para formar radios más pequeños en la dirección de las cargas, y con ello una forma más eficaz para cada caso concreto. La flexibilidad de las estructuras tensadas permite desplazamientos sin que se formen grandes deformaciones permanentes.

El pretensado y la elasticidad de la membrana permite un grado de cambio y de respuesta, los diferentes materiales que componen la membrana tienen una gran flexibilidad que permiten los pliegues sin que estos se fracturen o se desgaren; estos materiales son las condiciones previas para la edificación con estructura móviles.

La especial forma curva de las membranas tensadas tiene un carácter escultural muy alto, encontrando un equilibrio en sí misma. Los movimientos ascendentes y descendentes de la forma anticlástica están en equilibrio dando la sensación de flotar sin esfuerzo, desafiando la gravedad. Esta cualidad la podemos encontrar tanto en proyectos interiores como en el exterior.

La arquitectura tensada da la “libertad” al arquitecto de crear espacios dramáticos y muy complejos, cambiando el espacio de manera espectacular, con juego de luz y sombras con las diferentes condiciones de iluminación natural del día. El ángulo de la luz de la mañana acentúa las curvas y el relieve de las cubiertas; y cuando el sol está en su mayor apogeo crea unos bordes fluidos de la membrana proyectando sombras curvas sobre el terreno.

Este tipo de edificios pueden hacer grandes contribuciones para enriquecer el panorama arquitectónico. Son construcciones con una estructura muy expuesta que hace visible el flujo de fuerzas y que observadores más o menos cualificados pueden entender fácilmente. Tienen una actitud positiva hacia la tecnología y la innovación, lo que lleva a ingenieros y arquitectos a huir de la monotonía y puedan volver a la experimentación constante para conseguir nuevas soluciones. (Navarro Carreto, 2019)

Apoyándose en la luz traslúcida que entra y la reflectividad de los materiales que forman la membrana de una manera muy ventajosa, se puede llegar a transformar la estructura en una escultura de luz.

Las estructuras de membrana bien diseñadas tienen equilibrio desde un punto de vista formal y estructural, lo que produce que se integren fácilmente o destaquen, tanto en ambiente natural como en actuaciones en el interior de edificaciones históricas o modernas. Llegando a complementar o actuar como contrapunto de ese entorno. (Forster, Mollaert, 2009)



Imagen 16. Convertible shading roof for the Prophet's Mosque in Medina, Saudi Arabia, SL Rasch. (<https://www.sl-rasch.com/en/projects/courtyard/>)



Imagen 17. Convertible shading roof for the Prophet's Mosque in Medina, Saudi Arabia, SL Rasch. (<https://www.sl-rasch.com/en/projects/courtyard/>)

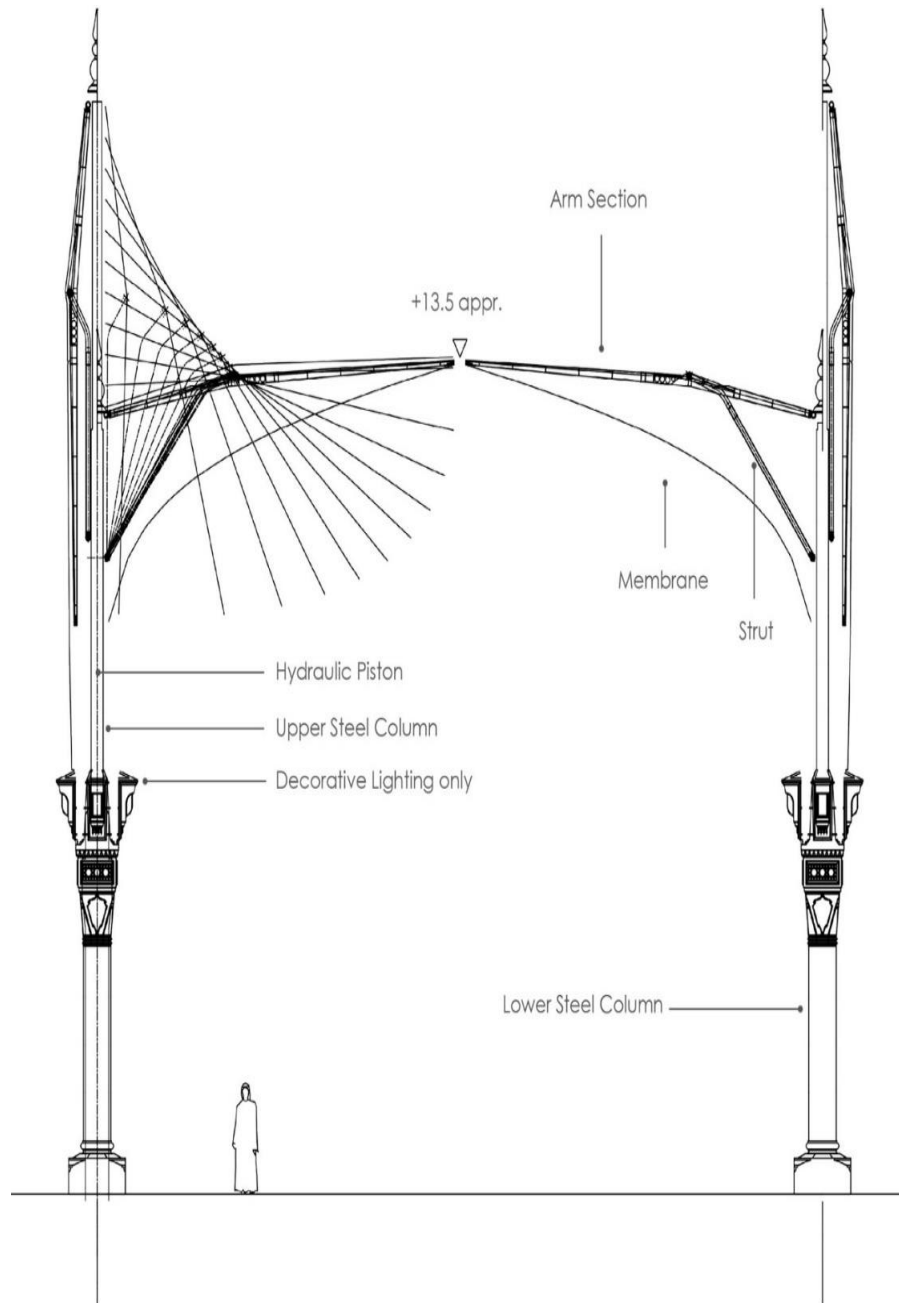


Imagen 18. Convertible shading roof for the Prophet's Mosque in Medina, Saudi Arabia, SL Rasch. (<https://www.sl-rasch.com/en/projects/courtyard/>)

4 Comportamiento de la membrana

4.1 Forma

La forma y el comportamiento físico de la arquitectura convencional es totalmente diferente cuando nos referimos a arquitectura tensada, debemos tener en cuenta tres factores estructurales: la elección de la forma superficial de la membrana, el nivel de pretensión y por supuesto su deformabilidad, en estos casos estamos aludiendo al diseño estructural y no al uso del material.

La mayor parte de las obras de arquitectura tensada contemporánea tienen una geometría superficial “anticlástica”, (Imagen 19) hay cuatro tipos genéricos de superficies anticlásticas de uso común: el cono, la silla de montar, el paraboloides hiperbólico y la de valle paralelo. (Bublik Abufon, 2012)

Las superficies anticlásticas, son definidas como aquellas que en todos los puntos de su superficie hay una doble curvatura. Esto quiere decir si hay una intersección de un plano perpendicular a dicha superficie produce una línea con una concavidad hacia un lado, mientras que la intersección de un plano perpendicular al anterior produce una línea que tiene la concavidad hacia el lado contrario.

Los centros de curvatura en direcciones ortogonales de las membranas están en los lados opuestos de la superficie. Esta configuración tiene unas propiedades muy útiles, porque puede ser pretensada en su totalidad sin que sufra cambios significativos en su forma general. (Forster, Mollaert, 2009)

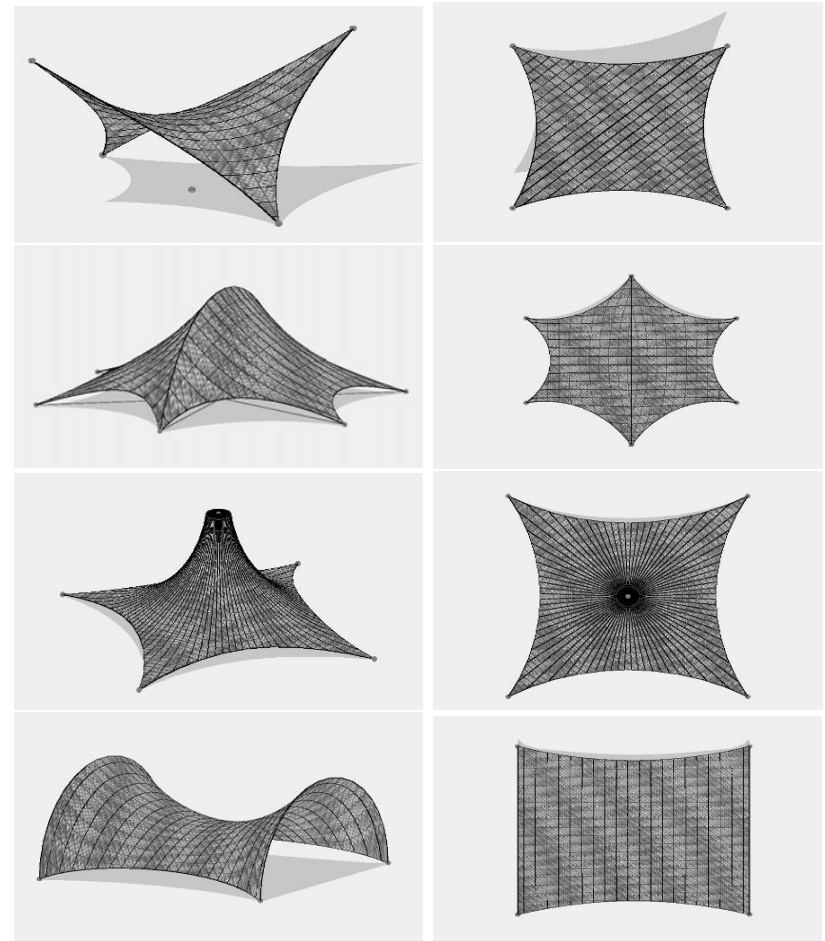


Imagen 19. Formas anticlásticas. Figuras obtenidas de la tesis de; (Bublik Abufon, 2012)

A parte de la geometría superficial de la membrana esta no es impuesta a la superficie de revolución, sino que es definido por su equilibrio de pretensión interno dentro de un sistema perimetral de soporte que podríamos llamar “condiciones de borde”, este proceso definiría la forma de la membrana, pero sin olvidarnos todo elementos que están en contacto con la membrana como los cables de cumbrera, los mástiles, los arcos, las vigas, etc.

En este caso podemos utilizar el ejemplo de la película de jabón, para entender las condiciones de estas membranas. Solo se puede formar esta película dentro del perímetro de sistema cuya geometría proporciona un equilibrio de tensiones entre las moléculas de la película.

Por tanto, podemos decir que un conjunto de elecciones de las condiciones de borde definiría la membrana. Pero para buscar ese equilibrio de tensiones debemos tener en cuenta los ajustes y cambios necesarios de los elementos de soporte, como el cable de cumbrera, la altura relativa de los mástiles, etc.

La forma superficial de la película de jabón es única para un borde dado, ya que, si cambia el borde parcial o totalmente esto haría que la superficie cambie. Por consiguiente, podemos decir que el resultado de la superficie de la película de jabón está condicionado por un borde determinado. En el caso de la maqueta de Frei Otto, (Imagen 20) observamos que las alturas de los soportes van cambiando y se intercalan unas a otras para formas específicamente esa superficie. Este sería un ejemplo de ensayo que el proyectista trabajaría con una maqueta o con un modelo por ordenador. (Forster, Mollaert, 2009)

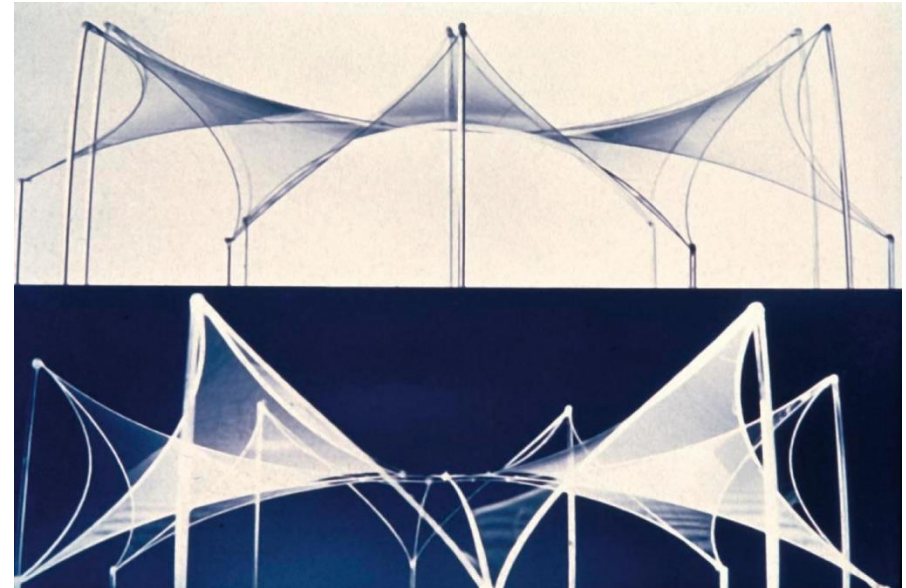


Imagen 20. Modelo con película de jabón de la cubierta Starwave. Estudio para la cubierta de la fuente, Colonia. Frei Otto.

Tenemos en cuenta que este ensayo tienes sus limitaciones ya que los bordes en los cuales se crea la película de jabón llegarían a un punto en el que si cambiamos la distancia y la altura de los soportes la superficie colapsaría, sin embargo, si introducimos sobre la superficie un subconjunto de “hilos” se podría formar una superficie con un coeficiente límite más alto.

En la realidad estos “hilos” serían un conjunto de cables pretensados que formarían la superficie con una geometría con esfuerzos de pretensión mayor en la dirección radial del tejido de la membrana, que en la dirección de la circunferencia.

Este enfoque de definir la forma superficial permite mejorar las restricciones a la que estaba la película de jabón pudiendo tener una mejor proporción de altura y tamaño. Si queremos seguir investigando sobre la forma de las membranas de la arquitectura tensada, deberíamos empezar a fijarnos en las soluciones eficaces que ya existen, siguiendo la lógica y los principios de estructuras mínimas, con sus características de esfuerzos internos mínimos, masa constructiva y energía reducida.

Por norma, hay dos tipos de formas que obtienen las membranas en la arquitectura tensada:

Una son las formas anticlásticas o de silla de montar de doble curvatura, con una pretensión mecánica que las estabiliza y las tensa, en la membrana y a lo largo de sus bordes. Otra son las formas sinclástica o esféricas de doble curvatura, que para estabilizarse y estar tensadas necesitan presión neumática o hidráulica, actuando de forma perpendicular a la superficie de la membrana. (Forster, Mollaert, 2009)

4.1.1 Membrana tensada anticlástica

Para estabilizar en el espacio una estructura de membrana tensada será necesario esfuerzos de tensión, mínimo cuatro vectores de esfuerzo de tracción que no actúen únicamente en un solo plano y que estén en equilibrio.

En este caso si estudiamos una superficie mínima anticlástica de doble curvatura ha de ser cero el resultado de la suma de todas las curvaturas positivas y negativas para encontrarse en equilibrio.

En las membranas doblemente curvadas resisten las cargas externas gracias a su forma, no por su masa, por tanto, la elección de la forma tectónica es la que nos permitirá cubrir grandes luces con una mínima cantidad de material, siendo la membrana el principal elemento estructural. La superficie se mantiene en equilibrio mediante los refuerzos de borde (cordones o cables tensados) dispuestos como elementos de soporte y suspensión.

Es utilizado dos métodos básicos de diseño para crear la forma de la membrana. Uno de ellos es la libre disposición de los soportes tanto internos como externos y de las condiciones de borde, para buscar un equilibrio de tensión continua en la estructura del edificio, permitiendo así crear efectos arquitectónicos muy especiales.

La segunda forma sería utilizar una superficie modulada doblemente curvada, que se van añadiendo unas a otras para crear una estructura más grande.

Por ejemplo, una de las estructuras anticlásticas más básicas es la velaría de cuatro esquinas con forma de silla de montar, esta estructura se puede modular de forma radial dando como resultado una forma estrellada con un punto central elevado o bajo. Pero si se modula de forma lineal crea una continuidad de alteraciones de puntos elevados y bajos.

Por otra parte, las estructuras de forma libre tienen un comportamiento más complejo y requieren de más detalles, pero serán necesarias si buscamos que se relacionen mejor desde punto de vista formal y arquitectónico en el espacio o con el edificio. (Forster, Mollaert, 2009)

Otro punto para tener en cuenta en las membranas tensadas es el espacio en altura para desarrollar su doble curvatura, entre los puntos altos del soporte elevado y los más bajos en relación con las luces de la estructura del edificio, el nivel de esfuerzo de pretensión y las cargas de reacción.

En los espacios muy grandes será necesario unos bordes internos lineales, como crestas, valles o lazos, soportados por vigas internas y mástiles que están suspendidos desde soportes externos, también pueden tener soportes redondeados en forma de arco para garantizar la forma continua y los esfuerzos de la membrana.

Expo de Montreal, Frei Otto y Rolf Gutbrod, (1967)



Imagen 21. Mark, Laura. "Six projects by Pritzker winner Frei Otto." *The Architects Journal*, 11 Mar. 2015.

El arquitecto alemán Frei Otto durante los años 1955 y 1965 investigó sobre el diseño de cubiertas, con ayuda del fabricante Peter Stromeyer desarrollaron cubiertas de forma libre y de doble curvatura, tuvieron oportunidad de ponerlo a prueba en las exposiciones nacionales y representar sus nuevas ideas, y estudio sobre el montaje y la técnica para introducir tensiones en diferentes telas y experimentar con nuevos métodos de uniones.

Frei Otto con colaboración de Rolf Gutbrod proyectaron el pabellón alemán para la Expo de Montreal de 1967. (Imagen 21) Fue una innovación arquitectónica además de estructural, formada por una planta abierta que serpenteaba en torno al borde de un lago, para obtener esta planta irregular la red se colgó de mástiles que tenían diferente longitud e inclinación, todos los esfuerzos se concentraban en lo alto de los mástiles y se trasportaban esos esfuerzos por cables que se encontraban en la superficie de la red. (Imagen 22) Estaba formada la cubierta por diez mil metros de tela de poliéster recubierto de PVC, suspendida de la red de cables y con tensión para formas así la piel de cubierta.(Saidi, 2019)

Las maquetas (Imagen 23) fue la técnica para estudiar el comportamiento de las estructuras de la cubierta que claramente estaba condicionada por su geometría, este enfoque le permitió desarrollar sus proyectos arquitectónicos con una lógica estructural y método de edificación. (Forster, Mollaert, 2009)



Imagen 22. Dentro del pabellón alemán durante la Expo '67. Imagen © Frei Otto

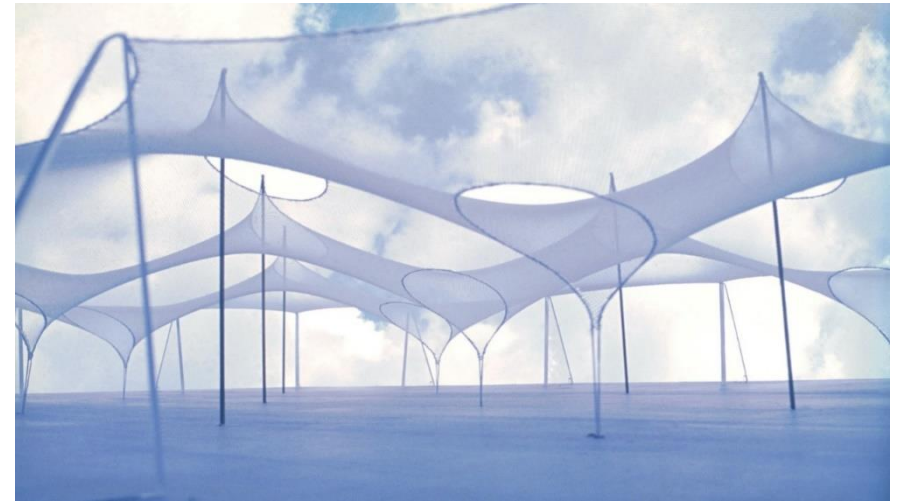


Imagen 23. Modelo de estudio, búsqueda de formas, Imagen © Frei Otto (<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/768540/clasicos-de-arquitectura-pabellon-aleman-expo-67-frei-otto-rolf-gutbrod/550743efe58eccc410006d-form-finding-study-m>)

4.1.2 Membrana tensada sinclástica

Las formas sinclástica para obtener su pretensión y su estabilidad estructural lo consiguen mediante una diferencia de presión del fluido o gas a ambos lados de la membrana, los esfuerzos de la membrana son dados por la curvatura de la membrana, con radios mayores aparecen tensiones más grandes.

Las diferencias de presión son generadas por ventiladores con inducción de aire o gas en el interior de una membrana hermética, no son necesarios elementos estructurales de soporte rígido como columnas, muros o arcos, haciendo que sean más ligeras, precisarán de una estructura como guía y de sujeción para anclar a la estructura propia del edificio, puede ser un esqueleto

metálico tubular (Imagen 24) o de nervios, que proporcionen un grado apropiado de rigidez a flexión.

Los niveles de tensión están en relación con el coeficiente de la curvatura de la superficie de la membrana, por ejemplo, una curvatura de radio “r” inflada a presión “p” la tensión de la membrana sería $M=1/2pr$. Este tipo de membranas son muy eficaces en estructuras que están expuestas a grandes cargas de viento, sin embargo, estas estructuras hinchables (Imagen 25) muestran desplazamientos bajo cargas no uniformes y antisimétricas como sería la nieve.

Generalmente estas membranas son de láminas de ETFE con lo que se crean cubiertas o fachadas con una cobertura cálida que tiene una gran transparencia, este material lo estudiaremos más adelante en el apartado “Tipos de materiales para arquitectura tensada”. (Forster, Mollaert, 2009)

Frei Otto utilizó las membranas inflables para construir espacios de manera rápida y económica, con esto se podrían generar grandes espacios; él subdividía las formas de la membrana para generar formas naturales geométricamente, (Imagen 26) en las que se apreciaba mucho el ritmo fractal que tiene la naturaleza, aunque él solo buscaba la eficiencia del material y la geometría que lo estabilizaba por la forma. (Morales Guzmán, 2013)



Imagen 24. Cúpula de la plaza del Milenio, Valladolid. España, Enric Ruiz-Geli CLOUD9, 2.200 m2 Cojines de triple capa. IASO “ETFE, La Arquitectura Transparente” (https://www.iasoglobal.com/docs/IASO_ETFE_2014_ES.pdf)



Imagen 25. Cúpula de la plaza del Milenio, Valladolid. España, Enric Ruiz-Geli CLOUD9, 2.200 m2 Cojines de triple capa. IASO “ETFE, La Arquitectura Transparente” (https://www.iasoglobal.com/docs/IASO_ETFE_2014_ES.pdf)



Imagen 26. Cúpula de la plaza del Milenio, Valladolid. España, Enric Ruiz-Geli CLOUD9, 2.200 m² Cojines de triple capa. IASO "ETFE, La Arquitectura Transparente" (https://www.iasoglobal.com/docs/IASO_ETFE_2014_ES.pdf)

4.2 Pretensión

La utilización de tela en la arquitectura tensada tiene una funcionalidad por las exigencias del proyectista y el medio. La integridad física de la tela exige una estabilidad mecánica, además, el material tiene una misión estructural. En este caso la tela o membra (un conjunto) es un material flexible gracias a la tensión. Sometiendo la tela a una tensión de tracción, por lo menos en dos direcciones cruzadas, esta obtendrá una estabilidad necesaria para cumplir sus funciones, pero sólo con estas tensiones no llegaría a tener una estabilidad necesaria para una función estructural.

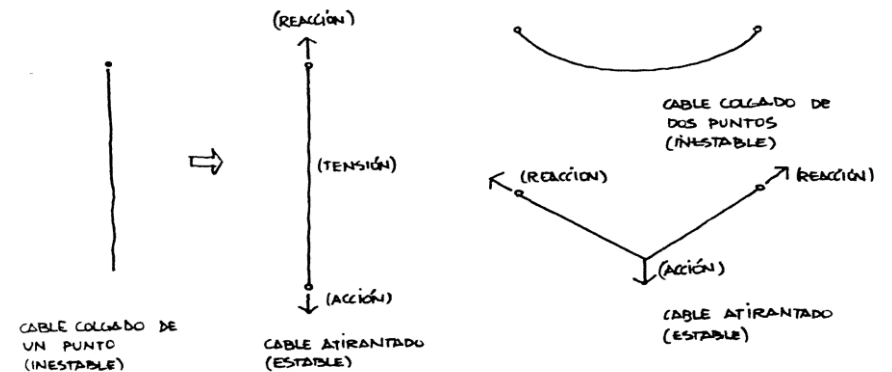


Imagen 27. Estabilidad en cables (Monjo Carrió, 1985)

Vamos a pensar en el comportamiento mecánico de un cable, (Imagen 27) si lo colgamos de un extremo obtendremos una línea recta vertical pero que es inestable para cualquier esfuerzo horizontal, ya que se desplazaría de su situación original, a menos que lo atirantemos desde el extremo inferior. Igualmente, si el cable está colgado de dos puntos, por su peso propio el cable tomaría forma de catenaria, y esta sería más plana cuanto mayor tensión sea en sus extremos y menor sea el peso propio. Aun así, el cable sigue siendo inestable ante los esfuerzos perpendiculares pudiendo desplazarse, vibrar y deformarse.

Para estabilizarlo, habrá que tensarlo según su plano perpendicular al que se encuentra en reposo. Apareciendo así un segundo orden de cables con tensión invertida. (Imagen 28) Se establecerían así dos "familias" de cables, de primer orden los que se encuentran colgados y la segunda los estabilizadores con tensión invertida.

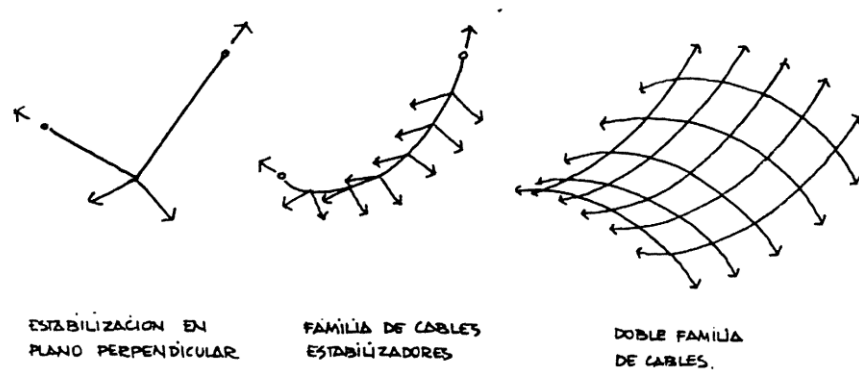


Imagen 28. Familia de cables. (Monjo Carrió, 1985)

Formaríamos en este caso una malla de cables en el que en un punto encontramos cables con tensiones contrarias. Comprendiendo así la necesidad de la doble tensión para crear un sistema de estabilización. Si nos centramos en las telas colgadas, despreciando su peso propio que es mínimo, $\leq 1 \text{ Kg/m}^2$, y con sus extremos a una tensión directa. Si la tensión se encuentra en una sola dirección, aunque este en dos sentidos, sólo tensaríamos una familia de cables, y aparecerían “arrugas” en esa dirección.

Para contrarrestarlo deberíamos introducir tensión en la otra familia de cables en la otra dirección, pero si lo realizamos esto en un plano, la membrana se encontraría de forma plana, tensada, pero inestable a cualquier esfuerzo perpendicular. Que estos esfuerzos podrían ser el viento o la nieve.

Para una estabilidad definitiva, deberíamos salirnos del plano como se ve en la familia de cables, y conseguir que la superficie obtenga una forma anticlástica, de tal modo que en cualquier punto existan dos tipos de curvaturas de sentido opuesto,

obteniendo así una tensión cruzada en estos dos mismos sentidos. (Monjo Carrió, 1985)

4.3 Deformabilidad

La deformabilidad es una característica muy importante y útil de las estructuras tensadas, contrario a las construcciones más convencionales. Debido a su baja rigidez superficial relativa los cambios de forma (geométrica/la forma superficial) es su principal respuesta a las cargas aplicadas externamente, en unión con los cambios en distribución de la tensión por toda la superficie. Ha esto hay que añadir que las deformaciones que se producen a la membrana son mayores que, por ejemplo, a las que se le producen al acero. Por consiguiente, en las estructuras tensadas se producen cambios geométricos muchos mayores, bajo cargas, que en las construcciones de pórticos.

También hay que tener en cuenta la flexibilidad de los soportes de la membrana que se unen a la deformabilidad, ya que aseguran la estabilidad general. Todo esto busca que no aumenten linealmente las tensiones debido a los cambios geométricos que se pueden producir en las superficies tensadas.

Los agentes externos a los que se enfrentan las cubiertas tensadas principalmente son el viento, acumulación de hielo/nieve o agua. Produciendo deformaciones sobre la superficie. Por ejemplo, cuando se produce viento sobre una superficie cónica, este hace que el mástil articulado se incline hacia la dirección del viento, permitiendo cambios sobre la superficie y atenuando así las tensiones en esa zona, pero también la propia membrana que se encuentra a sotavento actúa

para estabilizar el mástil. Las presiones puntuales del viento sobre los bordes y cresta de la membrana están soportadas por una superficie mayor de la membrana, que la que produce la propia presión.

El beneficio de facilitar las deformaciones sobre la superficie es tal que la respuesta de esta superficie bajo la carga mantenga inclinaciones positivas. El riesgo se produce cuando encontramos acumulaciones de nieve/agua produciendo embolsamientos que hace que la geometría de la superficie cambie de “anticlástica” a “sinclástica”, se trata de conseguir que en las deformaciones la forma de la superficie mantenga los gradientes positivos pensando en las peores condiciones que puedan producirse.

Por tanto, todas las deformaciones posibles que se puedan producir tanto en la superficie tensada como en los elementos estructurales y los elementos de soporte del sistema, se deben investigar y hacer ensayos cuidadosamente en la fase de diseño. (Forster, Mollaert, 2009).

5 Aplicaciones de la arquitectura tensada

Las construcciones tensadas se encuentran en un amplio desarrollo de edificación con diferentes usos. Es difícil clasificarlas todas las construcciones de arquitectura tensada, vamos a hacer una representación esquemática con dos puntos de estudio. Primero por la estructura de la membrana tensada (abierta, cerrado o móvil), y segundo el lugar donde dispondremos de las cualidades de esta membrana (cubierta, interiores o adosado). Los proyectos que estudiaremos nos presentan que las nuevas membranas con alta tecnología pueden utilizarse como edificios nuevos y también en la renovación o ampliación de edificios ya existentes. (Imagen 29).

La clasificación no pretende abarcar todas las morfologías posibles, sino intentar comparar y explorar las soluciones iniciales antes de cualquier fase de proyecto, ya que por lo general las estructuras tensadas pueden tener más de una función. Destacamos sus ventajas, pero hay que tener en cuenta en cada proyecto; el contexto, programa y el material para asegurarnos que la membrana ofrece una solución adecuada. (Forster, Mollaert, 2009)

	Abiertas	Cerradas	Móviles
Cubiertas			
Interiores			
Adosadas			

Imagen 29. Clasificación de las membranas. (Forster, Mollaert, 2009)

5.1 Estructura abierta

Mayormente el uso de las estructuras con membranas abiertas tiene la finalidad de proteger ante la lluvia y las radiaciones solares principalmente, además, de proteger del tiempo da la sensación de estar al aire libre.

5.1.1 Cubierta con estructura abierta

Las membranas abiertas cubren espacios libres o directamente edificios. Pueden ser utilizadas en forma de “marquesinas” con ventilación natural, carpas en pórticos, o simplemente como una referencia atractiva. (Imagen 30) En algunas funciones los elementos estructurales de soporte interno no resultan necesariamente molestos, ya que estos suelen tener secciones mínimas. El resultado sería una curvatura general de cubierta, que refuerza la impresión en el espacio interior. (Imagen 34) Se pueden crear grandes espacios libres, de ahí su utilización para cubrir espacios de grandes luces que al contrario con estructuras convencionales sería más complicado.

Además de sensación de aire libre y de ligereza que esta reforzada por la aparente sencillez de su estructura. Sin olvidarnos de la traslucidez de la membrana y sus posibles aperturas. (Imagen 35)

Se pueden cubrir un edificio con una membrana textil para reducir la penetración del agua asociado a las cubiertas planas, creando un modo de entoldado de cubierta ligera. Usados principalmente en climas templados y tropicales. (Forster, Mollaert, 2009)



Imagen 30. Pabellón de la EXPO 2012 Entrada a concurso para la exposición internacional junto al mar, Yeosu Corea, SL Rasch (https://www.sl-rasch.com/en/projects/pavilion_expo_2012/)

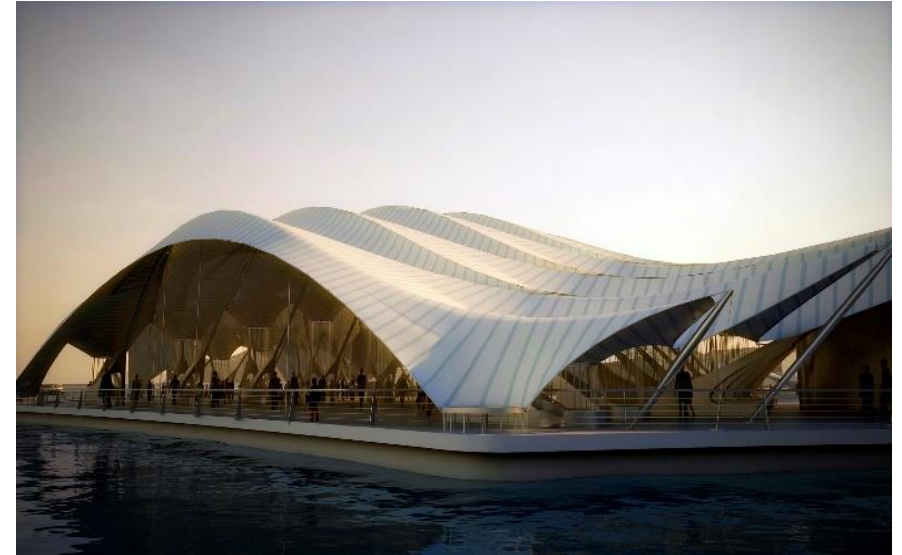


Imagen 31. Pabellón de la EXPO 2012 Entrada a concurso para la exposición internacional junto al mar, Yeosu Corea, SL Rasch (https://www.sl-rasch.com/en/projects/pavilion_expo_2012/)



Imagen 32. Pabellón de la EXPO 2012 Entrada a concurso para la exposición internacional junto al mar, Yeosu Corea, SL Rasch (https://www.sl-rasch.com/en/projects/pavilion_expo_2012/)



Imagen 33. Pabellón de la EXPO 2012 Entrada a concurso para la exposición internacional junto al mar, Yeosu Corea, SL Rasch (https://www.sl-rasch.com/en/projects/pavilion_expo_2012/)

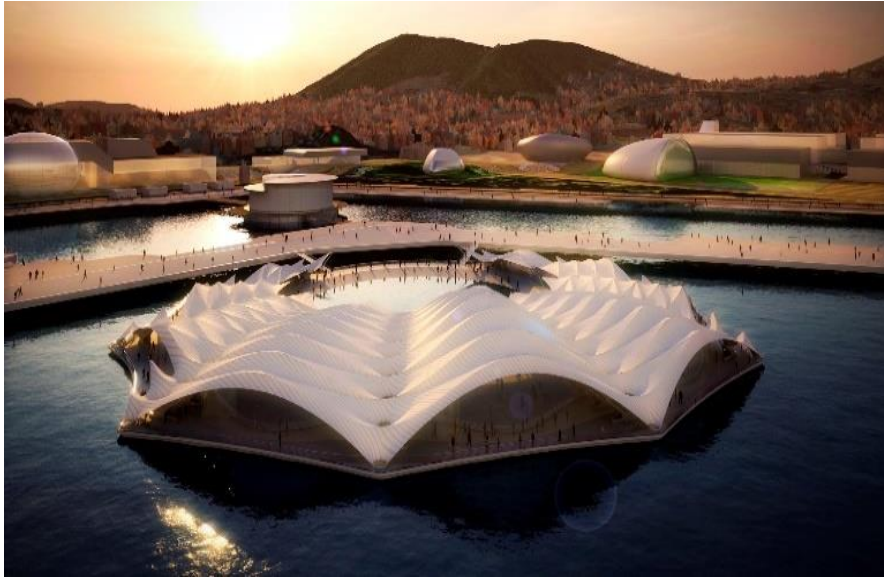


Imagen 34. Pabellón de la EXPO 2012 Entrada a concurso para la exposición internacional junto al mar, Yeosu Corea, SL Rasch (https://www.sl-rasch.com/en/projects/pavilion_expo_2012/)

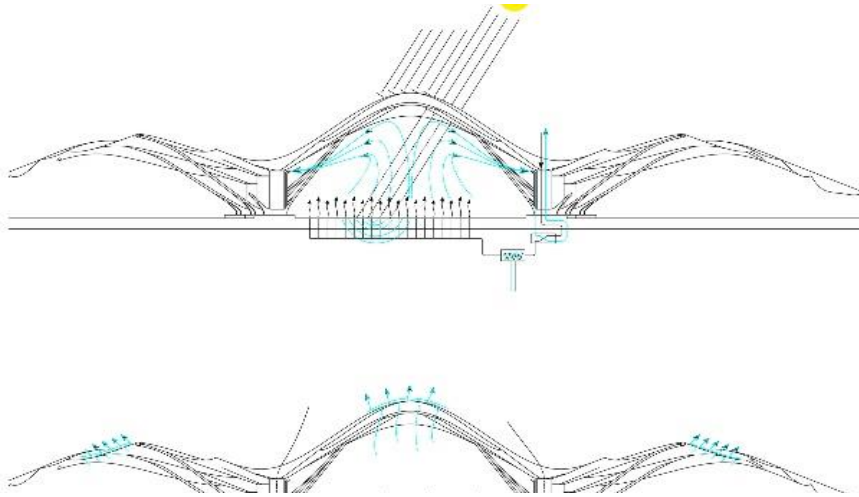


Imagen 35. Pabellón de la EXPO 2012 Entrada a concurso para la exposición internacional junto al mar, Yeosu Corea, SL Rasch (https://www.sl-rasch.com/en/projects/pavilion_expo_2012/)

El carácter del pabellón está dominado por el enorme techo de membrana que se extiende por todos los espacios. Las fuerzas de tracción le dan una forma que evoca la tensión superficial del agua; los círculos concéntricos desencadenan asociaciones con las olas del océano chocando entre sí. (Imagen 33) Inspirado en la superficie del mar, el techo de membrana tiene la misma longitud de onda que la naturaleza.

La piel del edificio consta de múltiples capas de membrana: fibra de vidrio recubierta de PTFE y láminas de ETFE. (Imagen 32) La almohada textil permite aprox. 10 a 12 por ciento de la luz del día para penetrar, suficiente para proporcionar una iluminación general agradable. Por la noche, el edificio arde de luz: un símbolo de la Expo que se puede ver a kilómetros de distancia. (SL Rasch, 2012)

5.1.2 Interior con estructura abierta

Los entoldados en cubierta o fachada transparente pueden ser utilizadas en el interior o el exterior; en el interior reduce el calor que puede ser producido por la luz directa y evita el deslumbramiento por los rayos del sol. El vidrio y el revestimiento de policarbonato proporciona una excelente transparencia y además una gran transmisión de la luz solar. Por ejemplo, en el Pabellón de la IMB, proyectado por Renzo Piano, se colocó una membrana suspendida a lo largo de la mitad de la bóveda de la cubierta. Los resultados acústicos del espacio se pueden mejorar con un revestimiento interior. (Forster, Mollaert, 2009)



Imagen 36. Pabellón ambulante IBM, Renzo Piano / Taller de Edificación /Atelier de Paris, 1983-86, (<http://arquitecturamashistoria.blogspot.com/2007/11/delicias-renzo-piano-y-el-pabelln.html>)



Imagen 37. Pabellón ambulante IBM, Renzo Piano / Taller de Edificación /Atelier de Paris, 1983-86, (<http://arquitecturamashistoria.blogspot.com/2007/11/delicias-renzo-piano-y-el-pabelln.html>)



Imagen 38. Pabellón ambulante IBM, Renzo Piano / Taller de Edificación /Atelier de Paris, 1983-86, (<http://arquitecturamashistoria.blogspot.com/2007/11/delicias-renzo-piano-y-el-pabelln.html>)

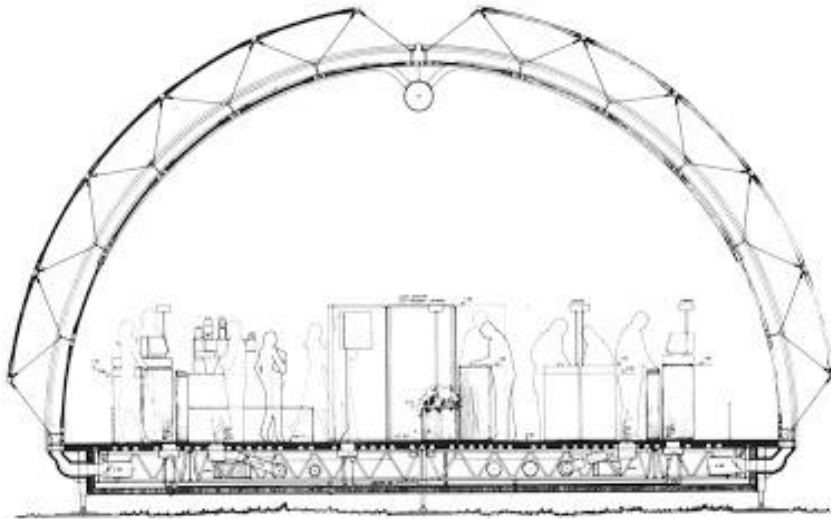


Imagen 39. Pabellón ambulante IBM, Renzo Piano / Taller de Edificación /Atelier de Paris, 1983-86, (<http://arquitecturamashistoria.blogspot.com/2007/11/delicias-renzo-piano-y-el-pabelln.html>)

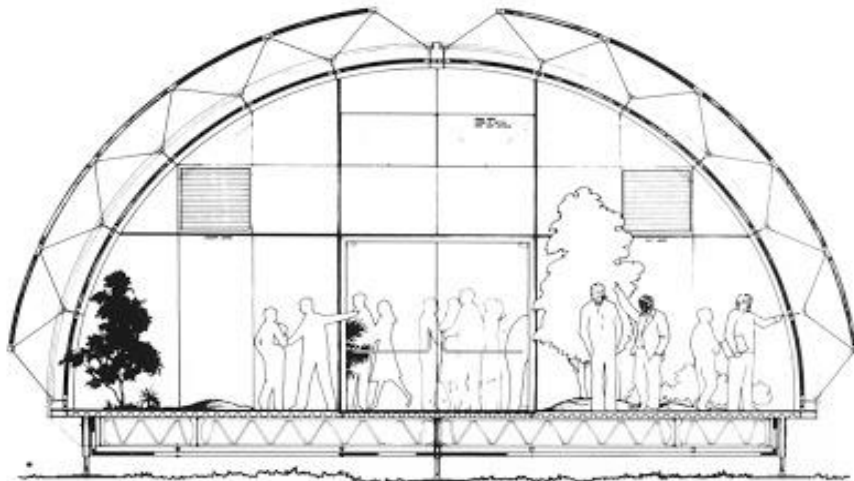


Imagen 40. Pabellón ambulante IBM, Renzo Piano / Taller de Edificación /Atelier de Paris, 1983-86, (<http://arquitecturamashistoria.blogspot.com/2007/11/delicias-renzo-piano-y-el-pabelln.html>)

5.1.3 Adosado con estructura abierta

Las cubiertas abiertas adosadas a edificios tienen como finalidad, formar espacios protegidos privados o semi públicos, son construcciones que definen en sí un espacio. Por ejemplo, el Schlumberger de Montrouge, en Paris, es un proyecto en el que en una zona industrial fue urbanizado, formado por un parque un sendero peatonal, con una membrana que ofrece protección ante la lluvia y el sol, a la vez que se integra con el entorno. Otra función es la colocación de pantallas verticales como una piel protectora mientras se producen obras o rehabilitaciones.



Imagen 42. Schlumberger en Montrouge, Paris, Francia, Atelien Renzo Piano, 1981-84
(<https://eumiesaward.com/work/1324>)

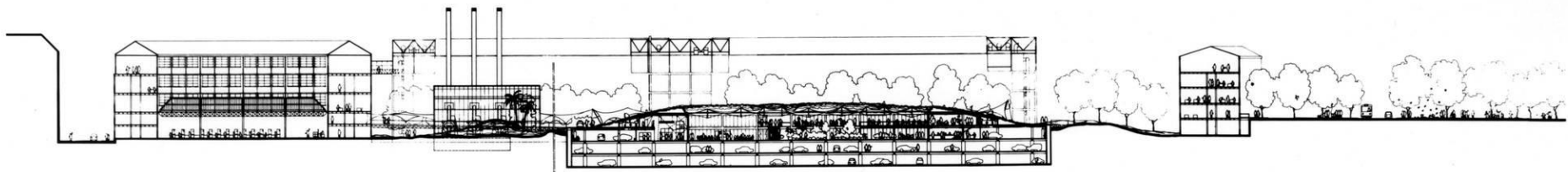


Imagen 41. Schlumberger en Montrouge, Paris, Francia, Atelien Renzo Piano, 1981-84
(<https://eumiesaward.com/work/1324>)

5.2 Estructura cerrada

La membrana exterior protege de fuerte inclemencias atmosféricas a la vez de mantener una temperatura interior más agradable. La utilización de varias capas mejora el aislamiento acústico, térmico, y controla la transmisión de luz solar.

5.2.1 Cubierta con estructura cerrada

Para conseguir un efecto invernadero es necesario una membrana de transparencia, por otro lado, si lo que deseamos es un aislamiento térmico y acústico será necesario la utilización de múltiples capas opacas. Dando importancia a los materiales que utilizamos y teniendo en cuenta la durabilidad del material, las cubiertas herméticas deben tener la capacidad de ventilación y acceso para el mantenimiento de la membrana. Estos criterios son a tener en cuenta a la hora de elegir la forma de la cubierta, el material y las uniones. (Forster, Mollaert, 2009)

Por ejemplo, la Cúpula del milenio es uniforme por toda su superficie excepto por los mástiles principales, tiene una luz de 365m. La estructura consiste en 24 puntos de anclajes en el perímetro, 12 mástiles principales de acero y un sistema de clases.



Imagen 43. Cúpula del Milenio, Londres, Reino Unido, Richard Roger, Buro Happold Ingenieros, Birdair, 1996-99 (<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/la-cupula-del-milenio-o2-arena/>)

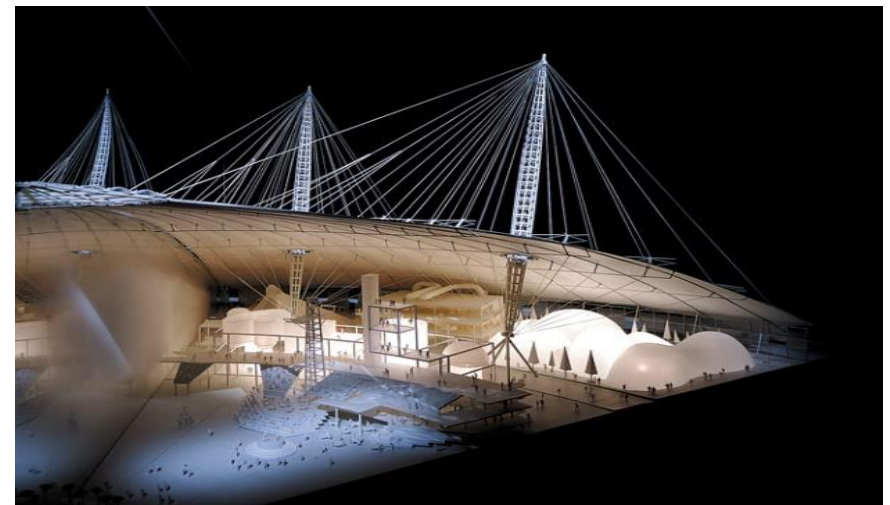


Imagen 44. Cúpula del Milenio, Londres, Reino Unido, Richard Roger, Buro Happold Ingenieros, Birdair, 1996-99 (<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/la-cupula-del-milenio-o2-arena/>)

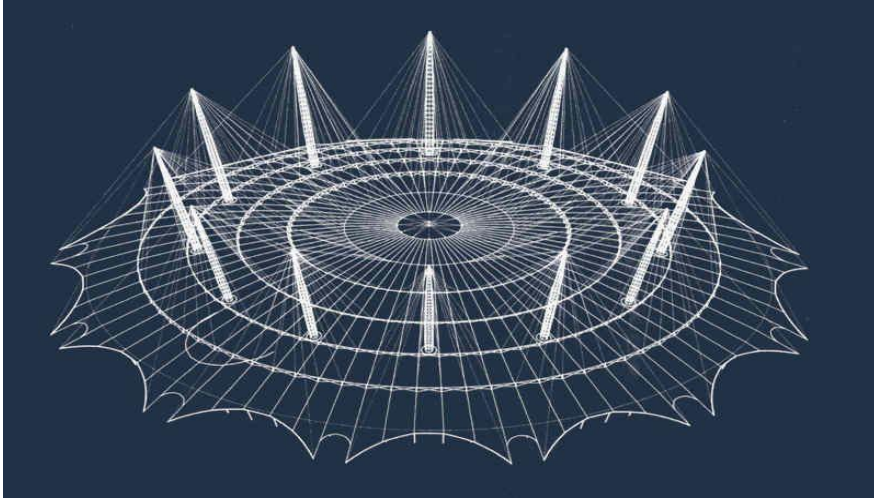


Imagen 45. Cúpula del Milenio, Londres, Reino Unido, Richard Roger, Buro Happold Ingenieros, Birdair, 1996-99 (<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/la-cupula-del-milenio-o2-arena/>)



Imagen 46. Cúpula del Milenio, Londres, Reino Unido, Richard Roger, Buro Happold Ingenieros, Birdair, 1996-99 (<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/la-cupula-del-milenio-o2-arena/>)

5.2.2 Interior con estructura cerrada

Esta puede ser una solución si en algún caso el edificio no cumple los requisitos estéticos o de aislamiento térmico, acústico, sería añadir una segunda piel en el interior, (Imagen 47) que actuaría como una segunda piel en el interior como una especie de revestimiento. Fue el caso en la rehabilitación de un edificio industrial en un bloque de oficinas, la piel interior consistía en dos membranas transparentes que mejoró el confort interior y la acústica, sin reducir la luz que entraba hacia el interior. (Hernández Rubio, 2016)



Imagen 47. Fotografía de estructura hinchable interior "Exxopolis". Obtenido de: http://elviajero.elpais.com/elviajero/2014/01/09/actualidad/1389278411_211056.html

5.2.3 Adosado con estructura cerrada

Las membranas en este caso se usan entre edificios o en su parte superior, como en los demás casos para mejorar el confort dentro del edificio, pero además la ventaja de introducir luz diurna natural.

En este ejemplo, los mástiles soportan la cubierta de membrana translúcida del Amagi Multi Sports Center,(Imagen 48) dando luz en el interior y además un carácter de ligereza al edificio. Su montaje fue previamente en obra y se acopló a un anillo temporal, hasta que se unió a la estructura del propio edificio.(Forster, Mollaert, 2009)



Imagen 48. Centro polideportivo Amagi, Amagi Yugashima Town, Japan, Fumitaka Hashimoto, Keikau, M.Saiton, Gr de proyecto Estructurales, Kajima Corp.,1991 (<https://www.tensinet.com/index.php/projectsdatabase/projects?view=project&id=4009>)



Imagen 49. Centro polideportivo Amagi, Amagi Yugashima Town, Japan, Fumitaka Hashimoto, Keikau, M.Saiton, Gr de proyecto Estructurales, Kajima Corp.,1991 (<https://www.tensinet.com/index.php/projectsdatabase/projects?view=project&id=4009>)

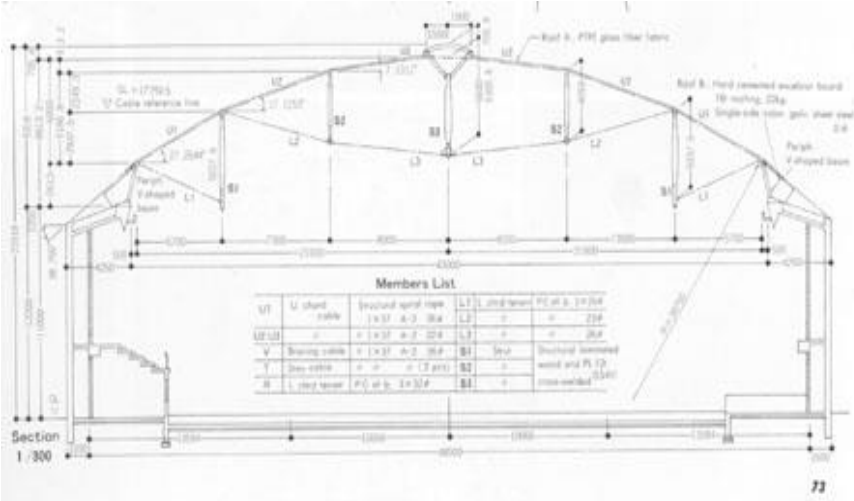


Imagen 50. Centro polideportivo Amagi, Amagi Yugashima Town, Japan, Fumitaka Hashimoto, Keikau, M.Saiton, Gr de proyecto Estructurales, Kajima Corp.,1991 (<https://www.tensinet.com/index.php/projectsdatabase/projects?view=project&id=4009>)

5.3 Estructura móvil

Las estructuras móviles tienen la característica de poder modificar su morfología tantas veces como sea necesario en un espacio relativamente corto. Debido a esta característica hay que tener en cuenta el material estructural de la membrana, indicado para ese tipo de estructura.

5.3.1 Cubierta con estructura móvil

Las estructuras móviles pueden ir cambiando según las condiciones climatológicas o según las estaciones del año, lo más habitual es una estructura móvil que vaya fluctuando según la luz diurna. (Forster, Mollaert, 2009)

En Sevilla se usó una membrana acoplada a una estructura fija, proyectada por Félix Escrig para uso estacional, se abre y se cierra plegándose las unidades de tijera. Las cubiertas de membrana móvil se pueden deslizar a lo largo de un abanico de cables o por un conjunto de arcos.

La cubierta del Pabellón de Venezuela, en la Expo de 2000 en Hanover, Alemania. Nos representa una cubierta con forma de pétalos que se abre y se cierra según las condiciones climatológicas.



Imagen 51. Piscina en Sevilla, Félix Escrig, 1996
(<https://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4000>)



Imagen 52. Piscina en Sevilla, Félix Escrig, 1996
(<https://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4000>)



Imagen 53. Piscina en Sevilla, Félix Escrig, 1996
(<https://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4000>)

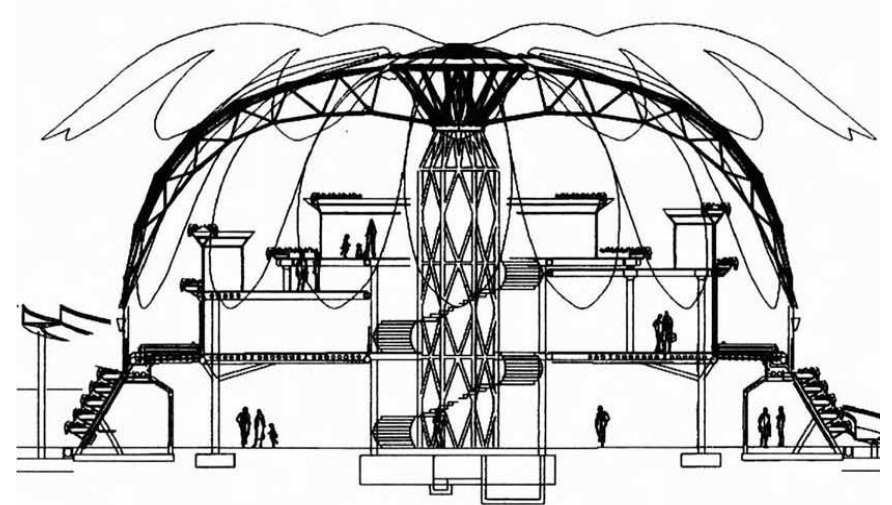


Imagen 55. García-Diego, C., Llorens, J. y Poppinghaus, H. (2001) «El pabellón de Venezuela en la Expo 2000 de Hannover», *Informes de la Construcción*, 53(473), pp. 11–26. doi: 10.3989/ic.2001.v53.i473.668.



Imagen 54. García-Diego, C., Llorens, J. y Poppinghaus, H. (2001) «El pabellón de Venezuela en la Expo 2000 de Hannover», *Informes de la Construcción*, 53(473), pp. 11–26. doi: 10.3989/ic.2001.v53.i473.668.



Imagen 56. García-Diego, C., Llorens, J. y Poppinghaus, H. (2001) «El pabellón de Venezuela en la Expo 2000 de Hannover», *Informes de la Construcción*, 53(473), pp. 11–26. doi: 10.3989/ic.2001.v53.i473.668.

5.3.2 Interior con estructura móvil

Las membranas adaptables para interiores pueden tener diferentes funciones. Pueden regular la luz que queremos que entre y para proteger de la excesiva luz solar y también como **persiana translúcida** con un mecanismo para dar sombra, para una mayor privacidad y evitar al mismo tiempo el resplandor.

5.3.3 Adosado con estructura móvil

Este tipo de membrana busca adaptarse de forma que este adosada a un edificio o entre edificios, tiene las mismas funciones que las membranas anteriores ante la meteorología. Uno de los ejemplos de cubierta retráctil es la que cubre el teatro al aire libre de la iglesia colegiata de Bad Hersfeld, diseñada en 1968 por Frei Otto. (Imagen 57) En verano, cuando hace buen tiempo la membrana se recoge alrededor de un mástil exterior y cuando llueve o hay excesiva luz solar se extiende. Fue reformada posteriormente por Stromeier Ing, en 1992. (Forster, Mollaert, 2009).



Imagen 57. Cubierta textil en las ruinas de la iglesia de Bad Hersfeld, Alemania, Frei Otto en 1968, renovada en 1992 por Stromeier Ing.(https://www.heimatverein-waltrop.de/galerie_20160801-badhersfeld.php)

6 Estudio de los materiales

6.1 Tipos de materiales

En este punto estudiaremos que tipos de materiales son utilizados para la arquitectura tensada y como está constituida la membrana para este tipo de arquitectura. La membrana generalmente es un tejido con revestimiento de resina polimérica. La resistencia de los materiales con revestimiento viene dada por la resistencia de sus hilos con los que este compuesto. Aunque el estudio se centrará en las membranas, podemos encontrar arquitectura tensada formada por placas, laminas o tejidos laminados.

Cuando este material se encuentra en el exterior y precisa de un revestimiento conseguimos las siguientes cualidades:

- I. Proteger los hilos de daños UV, abrasión, cambios atmosféricos.
- II. Impermeabilizar la membrana contra la lluvia y la humedad.
- III. Estabilizar la membrana por su geometría inestable.
- IV. Sellar las uniones mediante calor.

Para entender cómo trabajan las membranas, tenemos que saber que están formadas por varias capas que combinan entre ellas con el tejido. Como se enseña en la próxima imagen 58.

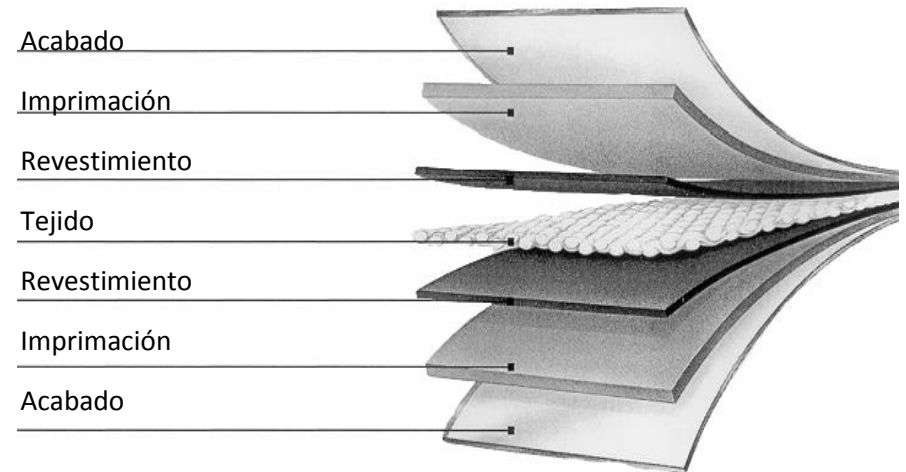


Imagen 58. Membrana para arquitectura textil. (Forster, Mollaert, 2009)

Las principales membranas (Imagen 59) y láminas más habituales que podemos encontrar en la arquitectura textil son:

- I. Tejidos de poliéster (PES) con revestimiento de cloruro de polivinilo (PVC) y acabado acrílico. Este material es el más usado ya que es el mejor en comparación de precio, resultados y durabilidad.
- II. Tejidos de poliéster (PES) con PVC y acabado de fluoruro de polivinilideno (PVDF).
- III. Tejidos de fibra de vidrio con revestimiento de silicona.
- IV. Tejidos de fibra de vidrio con revestimiento de politetrafluoretileno (PTFE).
- V. Láminas de copolímero de etileno-tetrafluoretileno (ETFE).

(Cerdá Talón, María de, las Mercedes, 2019)

En la siguiente tabla vamos a comparar estas cinco membranas según sus propiedades técnicas (resistencia a tracción, resistencia a desgarro, masa, transmitancia de luz, comportamiento frente al fuego, autolimpieza, durabilidad, precio).

	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

Imagen 59. materiales habituales para arquitectura tensada.(Cerdá Talón, María de, las Mercedes, 2019)

Aunque en el mercado podemos encontrar variedad de materiales y acabados para las membranas, en este punto estudiaremos más a fondo los materiales que son más utilizados, que son: **PES-PVC, fibra de vidrio y láminas de ETFE.**

Pero también tendremos en cuenta los diferentes materiales de acabado que se pueden utilizar como recubrimiento; las placas de PMMA (metacrilato), las láminas de PVC, los tejidos de aramidas, etc.

6.2 Propiedades de las membranas de tejidos

A diferencia de las propiedades de los materiales de las estructuras convencionales en comparación con las membranas, tienen peor comportamiento y durabilidad. El cambio de sus propiedades debido a las acciones de estar en la intemperie se les exige un coeficiente mayor de seguridad.

En las membranas la resistencia a tracción se mide por estiramientos desde extremos opuestos, y el desgarro es un fallo local, cuando se producen fuerzas en un punto y en sentidos contrarios. Estas dos propiedades están relacionadas, una membrana con mucha resistencia a tracción puede producir con mayor facilidad un desgarro.

La resistencia de un tejido está determinada por una unidad de anchura, pero cuando nos referimos a un hilo es mucho menor su resistencia, por tanto, nos referiremos al número de hilos multiplicado por la unidad de anchura. Esto se tendrá en cuenta en cada cruce de hilos, ya que aparte de la fuerza axial que se somete un tejido tenemos un momento flector, reduciendo la resistencia del tejido. Las fibras tienen un comportamiento no elástico, es decir, una relación no lineal entre tensión y deformación.

Los tejidos tienen un comportamiento anisótropo, varían considerablemente el valor de la resistencia a tracción y desgarro entre la dirección de urdido y de relleno, siendo mayor en la de urdido. Como se expresa en las gráficas, tanto para las membranas de poliéster como para las de fibra de vidrio. (Cerdá Talón, María de, las Mercedes, 2019)

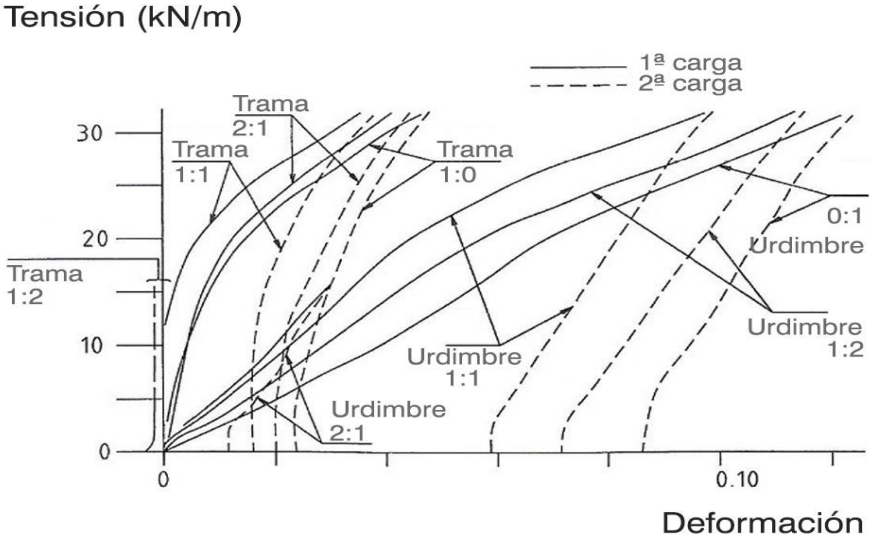


Imagen 60. Diagrama tensión-deformación biaxial de las membranas de fibra de poliéster. Imagen de Shaeffer

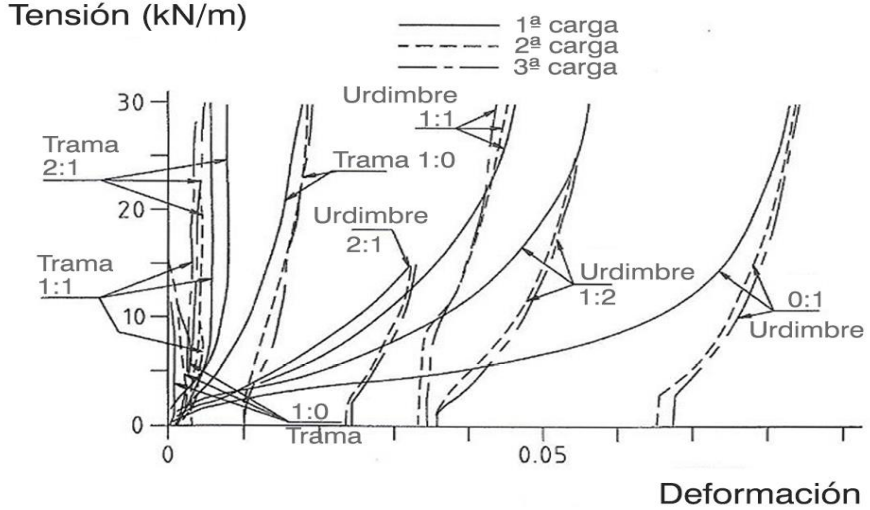


Imagen 61. Diagrama tensión-deformación biaxial de las membranas de fibra de vidrio. Imagen de Shaeffer.

Es importante tener en cuenta del tipo de cargas que puede tener la membrana como cargas iniciales o cargar a largo plazo, ya que las fibras se deformarán más con cargas que se encuentran durante un largo periodo de tiempo. Las fibras de vidrio tienen mayor resistencia al desgarre debido a su alta resistencia al corte.

Las propiedades de aislamiento térmico para las membranas tienen un rango del 1 al 95%, los más comunes son de un 25%. Todo depende de la aplicación que tenga la membrana y el nivel de protección UV que deseamos. La transmitancia varía según las capas que este compuesta la membrana ayudando en la reflexión o absorción de radiación solar, teniendo en cuenta que esto afectará al espacio interior reduciendo o ampliando la transmitancia óptica. (Forster, Mollaert, 2009)

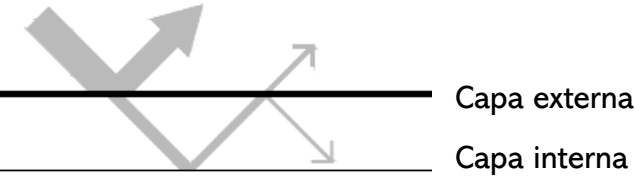


Imagen 62. Transmitancia de membrana de doble capa. (Forster, Mollaert, 2009)

Por ejemplo, una capa de la membrana VALMEX FR 1000 (PES-PVC) de 1050 g/m² tiene una transmitancia de U=5,7W/m², siendo muy similar al de un vidrio doble con cámara de aire de 200mm y con un valor de U=2,7W/m².

En el comportamiento frente al fuego las membranas de PES-PVC alcanzan la termofluencia a los 70°C, a partir de los 100°C empieza a derretirse las uniones y a expulsar gases. Un foco puntual de fuego sobre la membrana produciría un agujero. Por otra parte, el recubrimiento del PVC se funde a partir de los 150°C, ya que el comportamiento del PVC contiene aditivos para prevenir el desprendimiento de gotas inflamadas. Por tanto, las membranas de PES-PVC son combustibles, pero no inflamables, en caso de incendio la distensión de la membrana no provocará el colapso del soporte estructural.

El PTFE no se derrite hasta alcanzar la temperatura de 300°C, por lo que la acumulación de gases puede provocar una explosión de la membrana. Las uniones con recubrimiento de este material resistirían has los 250°C. Los tejidos de fibra de vidrio no son combustibles, y soportan una temperatura hasta los 1000°C.

Las membranas deben tener la capacidad de soldabilidad a la vez que mantienen la flexibilidad y transmitancia óptica. Intentando un recubrimiento de alta calidad con la menor cantidad, por motivos económicos y ecológicos. (Cerdá Talón, María de, las Mercedes, 2019)

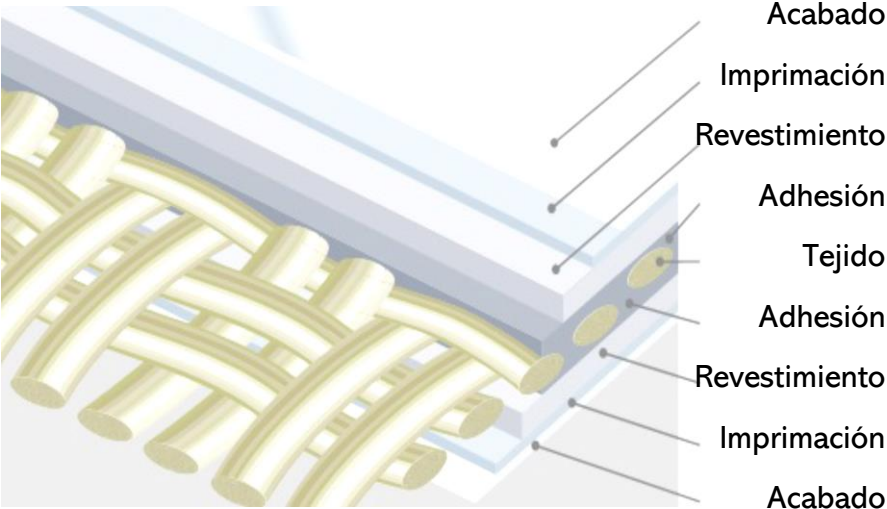


Imagen 63. Sección de la membrana de PES-PVC de Mehler, imagen de Giugliano.

6.3 Membranas de PES-PVC

Las fibras de este material son muy cortas y finas, por tanto, deben unirse entre ellas para formar hilos. Se pueden agrupar de forma paralela, la rigidez del hilo será la suma de las rigideces de las fibras, cuando se forman retorciendo las fibras la rigidez del hilo es menor que la primera forma, ya que las fibras se alargan mediante cargas en los axiles.

Un hilo se compone de unas 200 fibras, siendo esta cifra la que define los hilos, en la densidad lineal en g/km, el diámetro de la fibra, el número de giros por metro y del tratamiento final.

EL tejido base de las membranas está compuesto de dos grupos de hilos, los hilos de urdimbre, que se disponen a lo largo de la membrana, y los hilos de trama que la recorren de forma paralela a la misma. Los hilos de trama se entrelazan entre dos capas de hilos de urdimbre a 90°. (Cerdá Talón, María de, las Mercedes, 2019)

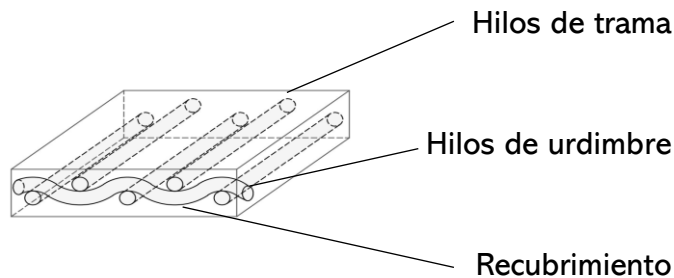


Imagen 64. Esquema de las direcciones de los tejidos. Saheffer.

La definición de los tejidos depende de la densidad de los hilos (n° de hilos por cm²), por su gramaje (g/m²), por el patrón utilizado, por la ondulación de los hilos en ambas direcciones, la porosidad y sus propiedades físicas/mecánicas.

Los patrones más utilizados son los tejidos lisos, o los tejidos Panamá, la ondulación es menos en los estos últimos como se enseña en la siguiente imagen.

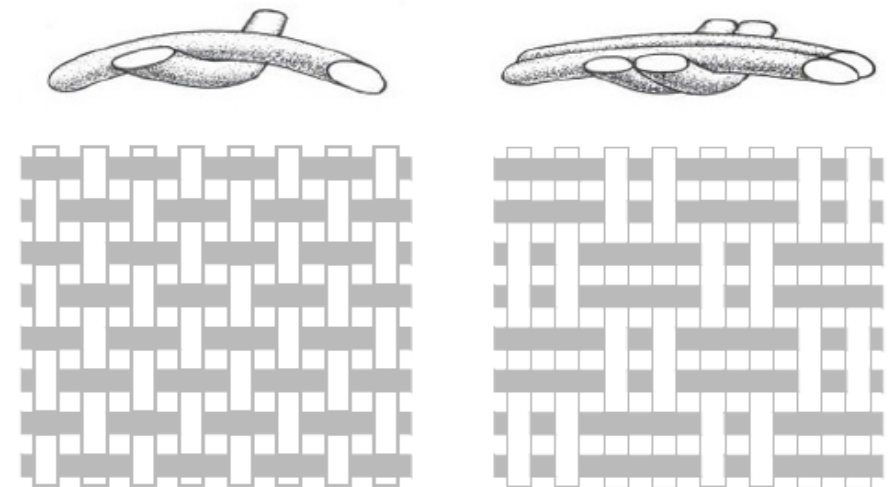


Imagen 65. Hilos y tejidos entrelazados normal Hilos y tejido entrelazado Panamá o 2-2, imagen de (Forster, Mollaert, 2009)

El gramaje del tejido depende de la densidad de los hilos, y la ondulación según las condiciones del pretensado. Con una ondulación mayor los tejidos son de un mayor grosor y alargamiento. En los tejidos lisos, el pretensado en ambas direcciones ayuda en la rigidez.

Los hilos del tejido tienen propiedades distintas, debido a su hilado y revestimiento. Durante el revestimiento cuando rebasan la temperatura de transición a vidrio, los hilos de trama se contraen, ya que están menos sujetos. Pero en los hilos de urdimbre no sucede ya que siguen bajo tensión. Este efecto produce una reducción en el módulo elástico y alargamiento de rotura en dirección de la trama. Por tanto, será necesario pretensar la trama durante el tejido.

El acabado final de tejido viene dado por el recubrimiento, este aporta uniformidad y facilita el comportamiento solidario de los hilos y asegura las uniones mediante sellado por calor. El recubrimiento es de carácter mecánico y químico que humidifica las fibras con la resina líquida para aumentar la compatibilidad entre el tejido y el recubrimiento.

El compuesto líquido utilizado se consigue mezclando, resina de PVC con compuesto emulsionantes, estos compuestos son importantes porque de ellos depende, las propiedades térmicas, la capacidad de auto limpieza y el aspecto final de la superficie más externa de la membrana. Uno de los componentes utilizados son los plastificantes (ftalatos, fosfatos, parafinas, cloradas u otros ésteres), los fosfatos son los más utilizados ya que mejoran el comportamiento frente al fuego, pero por lo contrario son

susceptibles a ataques biológicos y depósito alimenticio de bacterias. Pero su compatibilidad con la resina de PVC los hace necesarios en el proceso de recubrimiento de la membrana. (Sastre Sastre,)

Los aditivos colorantes ayudan a modificar el cromatismo y la estética del tejido, y son importantes en la transmitancia óptica y en la estabilidad de los rayos UV. El poliéster es un material de la categoría de éster, que también ayuda a proteger frente a los agentes atmosféricos y la acumulación de suciedad y se emplea como un estabilizador.

Uno de los aditivos retardadores que aumentan la inflamabilidad son, los fosfatos, óxido de antimonio, hidratos de aluminio, etc. Aun así, el propio PVC tiene características de resistencia frente al fuego, además contiene aditivos colorantes, fungicidas o estabilizadores de UV, protege el color y la base de la membrana.

Finalmente, las membranas de poliéster recubiertas de PVC precisarán de un acabado lacado a base de acrílicos en las dos caras de la membrana, también se suele aplicar PVDF en la cara exterior ya que será la más expuesta, en el caso que se utilice en ambas caras se precisara de capa separadora ya que dos capas de este mismo material se repelan. Estos acabados serán la primera barrera que protegerá a la membrana de los efectos atmosféricos, permitiendo un buen deslizamiento y facilitando la autolimpieza. (Cerdá Talón, María de, las Mercedes, 2019)

6.4 Membranas de fibra de vidrio

El tejido base de fibra de vidrio también está compuesto por hilos y por fibras microscópicas, el tipo de fibra que se utiliza habitualmente en la arquitectura tensada es con fibras de vidrio del tipo E;

53-54 % SiO₂

14-15 % Al₂O₃

20-24 % CaO, MgO

6,5-9 % B₂O₃

La forma en la que la membrana se compone es parecida al poliéster, con hilos de trama y de urdimbre, consiguiendo un material anisótropo. El patrón de sarga, con urdido a 45°, siendo esta forma del tejido muy idónea para membranas de superficies curvas. Los diámetros de las fibras de vidrio pueden ser de 3, 6, 9 y 11 micras, siendo el diámetro de las fibras las encargas de dar la resistencia. (Ferrari, 2012)

Las fibras se obtienen mediante fundición, por tanto, las capas externas se enfrían antes que el núcleo y esto provoca una pretensión: se producen tensiones de compresión en la superficie en la dirección axial y tensiones a tracción en el núcleo. Las cargas externas a tracción se sumarán a las de esta pretensión. Esto produce que estas fibras tengan una alta resistencia a tracción, pero una baja resistencia al doblado.

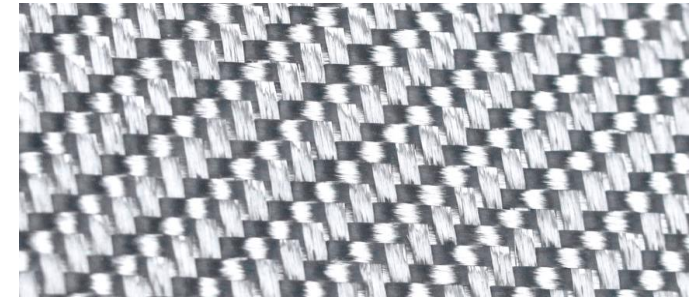


Imagen 66. Patrón de sarga en tejido de fibra de vidrio. Imagen de Rock West Composites (<https://www.rockwestcomposites.com/303tex-410-group>)

Los recubrimientos de los tejidos de fibra de vidrio suelen ser PTFE y silicona, gracias a que la fibra de vidrio resiste altas temperaturas puede soportar la aplicación del PTFE, este material tiene una gran durabilidad sin necesidad de aditivos por su alta resistencia a la radiación UV, para mejorar su impermeabilización y resistencia a los hongos necesitará una capa de acabado de FEP (fluoroetileno-propileno) que también, favorece la soldabilidad ya que su punto de fusión es inferior al del PTFE.

El recubrimiento mediante silicona tiene mejor facilidad de manejo y precisará aditivos para obtener un buen tratamiento superficial ya que presenta peor carácter ante la soldabilidad y la autolimpieza, son los mismos aditivos utilizados para el PVC. La goma de silicona combina elasticidad y resistencia mecánica en unas condiciones atmosféricas muy agresivas de altas temperaturas. (Cerdá Talón, María de, las Mercedes, 2019)

6.5 Laminado de ETFE

El ETFE tiene muy buenas características como ligereza, resistencia y durabilidad, siendo una buena alternativa a las membranas de fibra de vidrio. Al principio del desarrollo del ETFE, se planteaba el uso de otros materiales como el FEP (fluoroetileno-propileno), pero este tiene una baja resistencia a esfuerzos estructurales y el PVF (fluoruro de polivinilo. Tedlar) pero este material tiene una baja resistencia al fuego. (Cerdá Talón, María de, las Mercedes, 2019)



Imagen 67. Cubierta de los Malls y Plaza Caraba del C.C. Isla azul. Madrid. España, L35 Arquitectos. Cojines de doble lámina de ETFE de 250 μm impresa / 250 μm transparente (https://www.iasoglobal.com/docs/IASO_ETFE_2014_ES.pdf)



Imagen 68. Cubierta de los Malls y Plaza Caraba del C.C. Isla azul. Madrid. España, L35 Arquitectos. Cojines de doble lámina de ETFE de 250 μm impresa / 250 μm transparente (https://www.iasoglobal.com/docs/IASO_ETFE_2014_ES.pdf)



Imagen 69. Cubierta de los Malls y Plaza Caraba del C.C. Isla azul. Madrid. España, L35 Arquitectos. Cojines de doble lámina de ETFE de 250 μm impresa / 250 μm transparente (https://www.iasoglobal.com/docs/IASO_ETFE_2014_ES.pdf)

Propiedades

En este ejemplo de láminas de ETFE es un sistema presostático de cojines, los esfuerzos los absorbe su estructura primaria y su perímetro es lo suficientemente resistente para transmitir sus esfuerzos a la estructura.

La flexibilidad de las láminas depende de su grosor, no se recomiendan espesores superiores de 2,5mm, ya que a partir de esa medida la lámina se vuelve frágil, el tamaño de los cojines depende, del espesor de la lámina y de su capacidad para transmitir las fuerzas a la estructura. Una vez que las láminas se hinchan, el ETFE obtiene resistencia a la tensión y a los impactos. Aunque, las láminas pueden ser fácilmente perforadas, cuando presentan tensión o curvas de carga con rango elástico y una tensión de 400% hasta el fallo, lo que explica su resistencia al desgarre.

Las láminas de ETFE tienen un comportamiento isótropo, presentan la misma resistencia en todas las direcciones, al contrario que las membranas de tejidos.

El ETFE es un material combustible pero no inflamable, debido a la composición de flúor y un bajo nivel de oxígeno en su estructura molecular, a diferencia del PVC que desprende dioxinas en combustión, esto ocurre con el ETFE cuando llega a una temperatura de 800°C, pero las láminas pierden tensión a partir de los 200°C y se contrae por la columna de gases calientes.

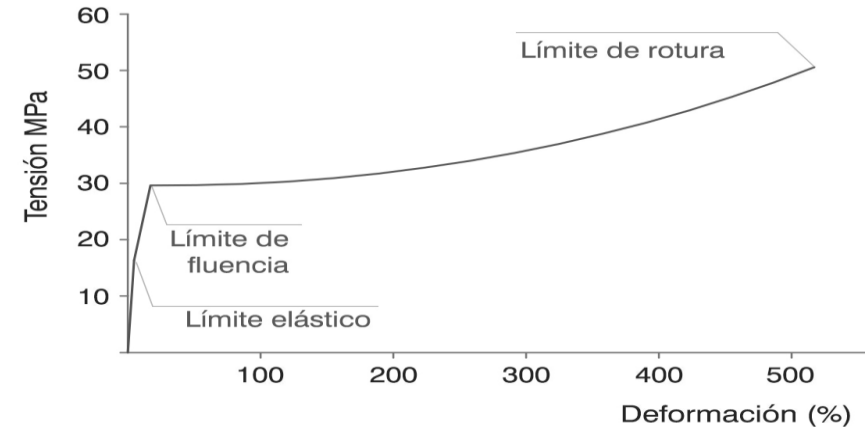


Imagen 70. Grafica tensión-deformación de láminas de ETFE, imagen de López, Oliván y Maldonado.

La unión entre láminas comprende entre 2 a 5 capas, la unión se realiza mediante soldadura de 5mm de ancho al unir las piezas sobrepuestas. Con una soldadura de 1mm se asegura ya el funcionamiento correcto, por tanto, hay un margen considerable de seguridad. (Forster, Mollaert, 2009)

Desde el punto de vista de la sostenibilidad es un material 100% reciclable, y contribuye en el edificio en el comportamiento ambiental. su materia prima no deriva del petróleo y la producción de resina de ETFE, necesita menos energía que en la producción de membranas de PVC, ya que es de base acuosa y no precisa de disolventes. También presenta bajo coste en su mantenimiento, ya que tiene autolimpieza, esto puede ser menos visible en superficies irregulares llegando a almacenar suciedad y moho.

El ETFE tiene como característica una gran transmitancia óptica con niveles desde el 85% hasta el 90%, haciendo competencia al vidrio, el 15% restante ayuda en la protección a las radiaciones solares y a la protección frente a deslumbramientos. Esta propiedad es importante si queremos incluir iluminación al edificio y crear un entorno en su diseño arquitectónico.

Este material tiene una alta resistencia a la degradación y a la decoloración, también ante la polución, la humedad y el agua salada. Esta cualidad es propia del ETFE sin necesidad de aplicar aditivos. Los fabricantes ofrecen una garantía de hasta 25 años.

Hay que tener en cuenta el seguimiento del desinflado de los cojines, mediante un sistema de monitoreo de información sobre la presión en el interior de los cojines, permitiendo ajustar la presión y el rendimiento. Para que no se produzca una transmisión de cargas a la estructura principal y asegurar el

funcionamiento de las láminas de ETFE. Uno de los daños más comunes es el picoteo de las aves, llegando a perforar la lámina, por lo que es importante tener información de la presión de los cojines, o instalar un sistema disuasorio para las aves. (Cerdá Talón, María de, las Mercedes, 2019)



Imagen 71. Mark, Laura. "Six projects by Pritzker winner Frei Otto." *The Architects Journal*, 11 Mar. 2015.

7. Modelado de la cubierta de una cubierta del Parque Olímpico de Múnich, de Frei Otto y Günter Behnisch (1972)

Posteriormente y después de mucho trabajo con la ayuda del estudio de ingeniería de Leonhardt y Andra, que continuaron con Günter Behnisch y Frei Otto proyectaron la asombrosa cubierta del parque Olímpico de Múnich en 1972, la cubierta está formada por una gran malla de cables. Este proyecto marco un punto y aparte por la importancia de este y su gran escala. También fue importante el paso del ensayo con maqueta física a los métodos por ordenador para justificar el comportamiento y las capacidades estructurales.

Los materiales utilizados para estas grandes cubiertas de estructura tensada tienen una protección de una capa polimérica,

por ejemplo, hay varias formas de elaborar estos tejidos, que incorpora un control sobre la rectitud del hilo y de la tensión, y que afecta al comportamiento del tejido final, hay que tener en cuenta estos factores para cada tipo de proyecto específicamente, como hemos estudiado anteriormente.



Imagen 72. Mark, Laura. "Six projects by Pritzker winner Frei Otto." *The Architects Journal*, 11 Mar. 2015

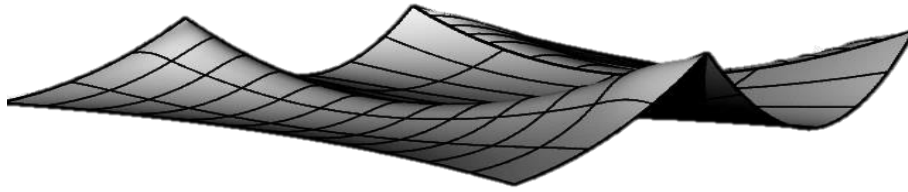


Imagen 73. Creación propia.

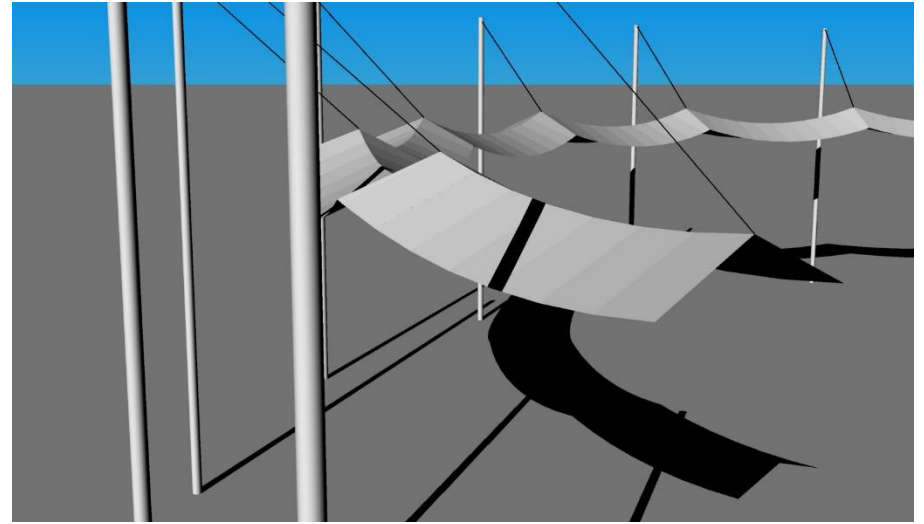


Imagen 75. Creación propia.

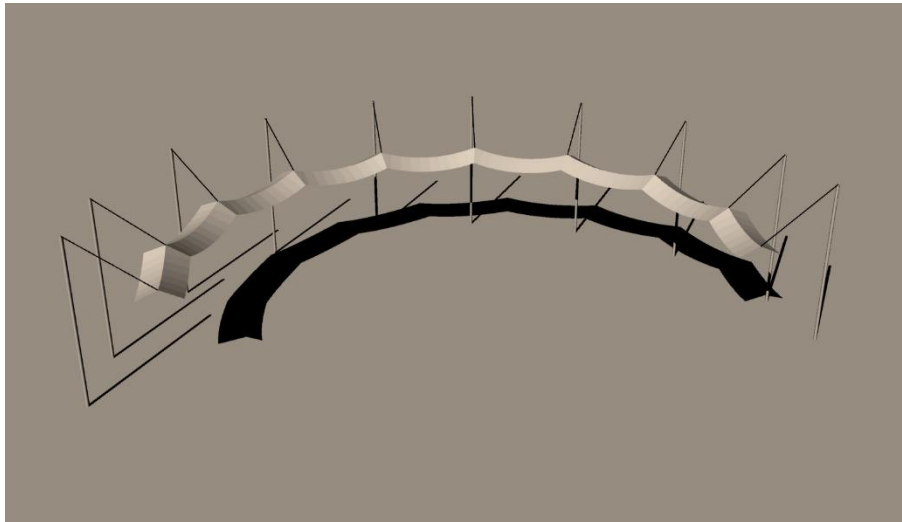


Imagen 74. Creación propia.

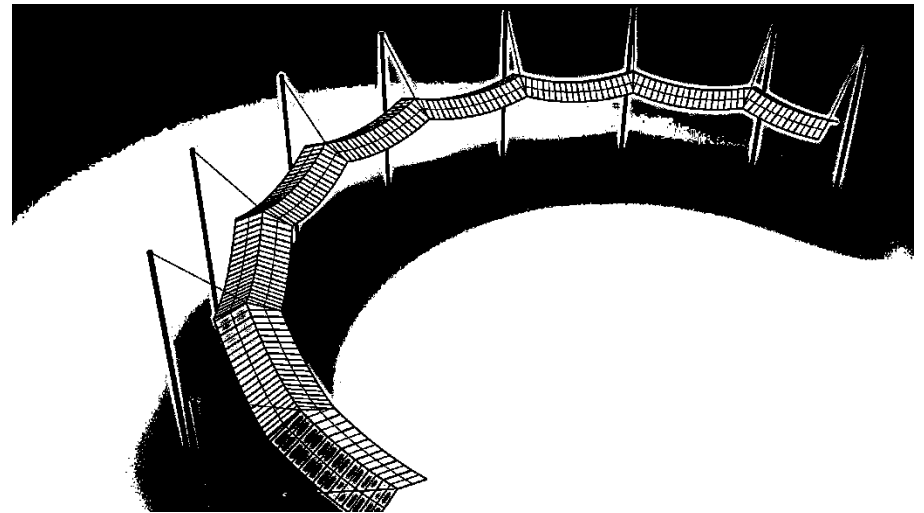


Imagen 76. Creación propia.

8. CONCLUSIÓN

La Arquitectura es una disciplina que se ha apoyado en otras materias para conseguir evolucionar. La innovación de los materiales y métodos de trabajo proporcionan un avance en la arquitectura.

Observamos como desde los orígenes del ser humano, utilizamos la arquitectura como un recurso de protección frente los agentes externos, para darnos cobijo y confort. En la arquitectura tensada se observa una gran evolución, gracias a los nuevos materiales que el ser humano ha producido de forma artificial para mejorar las cualidades que tienen en si mismo lo materiales naturales como es la producción de PES-PVC o el ETFE.

La arquitectura tensada tiene un gran valor de carácter flexible, tanto en el montaje y en su prefabricación, teniendo como principal estructura su propia membrana, sin olvidarnos de la forma, gracias a ella obtiene su estabilidad mediante el pretensado y la deformabilidad.

Tiene la capacidad de crear o cambiar espacios, dándoles un nuevo valor o funcionalidad. Esto es muy importante, ya que refleja el ritmo de vida cambiante que el ser humano tiene en esta época.

No podemos olvidarnos el carácter escultural que puede llegar a proporcionar la arquitectura tensada siendo reflejado en todos los ejemplos que hemos estudiado.

Por último, me gustaría reclamar el valor y complejidad de diseño que tiene la arquitectura tensada, llegando a ser comparable con un trabajo artesano que necesita una gran precisión.

Bibliografía

- Bahamón, A. & Minguet, F. 2004, *Arquitectura textil: transformar el espacio*, Instituto Monsa de Ediciones, Barcelona.
- Bublik Abufon, N. 2012, *"Fachadas activas": estudio de la fachada con membrana textil tensada como segunda piel*, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Cerdá Talón, María de, las Mercedes 2019, *Membranas para estructuras superficiales tensadas*, Universitat Politècnica de València.
- Daniel García-Escudero & Berta Bardí i Milà 2015, "ANTONIO ARMESTO AIRA (ED. y PRÓL.): ESCRITOS FUNDAMENTALES DE GOTTFRIED SEMPER. EL FUEGO Y SU PROTECCIÓN", *Revista proyecto, progreso, arquitectura*, , no. 13, pp. 122.
- Ferrari, S.D. 2012, *Ferrari-Architecture composite textiles & membranes*, La Tour du Pin Serge Ferrari, La Tour du Pin.
- Forster, B. & Mollaert, M. 2009, *Arquitectura textil guía europea de diseño de las estructuras superficiales tensadas*, Madrid Munilla-Lería, Madrid.
- Gallardo, H., Costilla, M., Salvatierra, A. & Leguizamón, J. 2020, "La enseñanza del diseño constructivo estructural de cubiertas textiles para espacios públicos", *Arquitecno*, , no. 10, pp. 31-38.
- Hernández Rubio, D.C. 2016, *Modelo de análisis de estudio de viento para estructuras tensadas*, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Monjo Carrió, J. 1985, "La arquitectura textil", *Informes de la Construcción*, vol. 36, no. 367, pp. 5-30.
- Morales Guzmán, C.C. 2013, "Prototipo de diseño de una cubierta retráctil tensada", *Revista de arquitectura*, , no. 15, pp. 102-110.
- Morales-Guzmán, C. 2018, "Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tenso-estructura", *Revista de Arquitectura*, vol. 20, no. 1, pp. 71-87.
- Navarro Carreto, M.I. 2019, *Estructuras ligeras. Principios básicos en la obra de Jörg Schlaich*, Universitat Politècnica de València.
- Peraldi-Mittelette, P. 2018, "Touaregs 2.0", *NETCOM (Issy-les-Moulineaux)*, , pp. 331-346.
- Saidi, S. 2019, *Frei Otto: restitución virtual del Pabellón alemán en la Exposición Universal de Montreal '67*, Universitat Politècnica de València.
- Sastre Sastre, R. "El PVC en la arquitectura textil", .
- Sendai, S. 2005, "Idea of Environment and Architectural Form in India by Le Corbusier: On the Creation of Villa Shodhan at Ahmedabad", *Journal of Asian architecture and building engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 37-42.

Imágenes y tablas

Portada. Modelo de estudio, búsqueda de formas, Imagen © Frei Otto (<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/768540/clasicos-de-arquitectura-pabellon-aleman-expo-67-frei-otto-rolf-gutbrod/550743efe58eccc4100006d-form-finding-study-m>)

Imagen 1. South-west Elevation of the Project for Mr. Hutheesing. (Sendai, 2005)

Imagen 2. Tienda vernácula (Bahamón, Minguet, 2004)

Imagen 3,4 Tienda Beduina (Bahamón, Minguet, 2004)

Imagen 5. Tienda Yurt (Bahamón, Minguet, 2004)

Imagen 6. Tienda Tipi de Norteamérica (Bahamón, Minguet, 2004)

Imagen 7. Charpateau, Arquitectónicos tensos, Imagen obtenida de: <http://www.arcade-reception.fr/project/chapiteaux/>

Imagen 8. Tensed structures, Parque Olímpico de Múnich, de Frei Otto y Günter Behnisch (1972) (imagen obtenida de: <https://revistalibero.com/blogs/contenidos/la-piel-de-serpiente-del-olimpico-de-munich>)

Imagen 9. Cubierta Starwave para la “la Biennale di Venezia 1996”, Frei Otto, SL Rasch. Estructura móvil para exposición con cimentación temporal mediante contrapesos. (Rasch Archivos)

Imagen 10,11. Efecto invernadero, LA ARQUITECTURA TEXTIL (TEXTILE ARCHITECTURE) Juan Monjo Garrió, Doctor Arquitecto Catedrático de Construcción de la E.T.S. de Arquitectura de Valladolid.

Imagen 12,13. King Abdulaziz International Airport Hajj Terminal, Jeddah, Saudi Arabia – Fazlur Rahman Khan for Skidmore, Owings &

Merrill (1981) (imagen obtenida de: <https://document.onl/documents/carpas-o-velarias.html>)

Imagen 14. Cubierta modular para asambleas, SL Rasch y Jürgen Bradatsh con Frei Otto, Malasia 1997 (Forster, Mollaert, 2009)

Imagen 15. Cubierta modular para asambleas, SL Rasch y Jürgen Bradatsch con Frei Otto, Malasia, 1997. (Forster, Mollaert, 2009) Pag 80.

Imagen 16,17,18. Convertible shading roof for the Prophet's Mosque in Medina, Saudi Arabia, SL Rasch. (<https://www.sl-rasch.com/en/projects/courtyard/>)

Imagen 19. Formas anticlásticas. Figuras obtenidas de la tesis de; (Bublik Abufon, 2012)

Imagen 20. Modelo con película de jabón de la cubierta Starwave. Estudio para la cubierta de la fuente, Colonia. Frei Otto.

Imagen 21. Mark, Laura. "Six projects by Pritzker winner Frei Otto." *The Architects Journal*, 11 Mar. 2015.

Imagen 22. Dentro del pabellón alemán durante la Expo '67. Imagen © Frei Otto

Imagen 23. Modelo de estudio, búsqueda de formas, Imagen © Frei Otto (<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/768540/clasicos-de-arquitectura-pabellon-aleman-expo-67-frei-otto-rolf-gutbrod/550743efe58eccc4100006d-form-finding-study-m>)

Imagen 24,25,26. Cúpula de la plaza del Milenio, Valladolid. España, Enric Ruiz-Geli CLOUD9, 2.200 m2 Cojines de triple capa. IASO “ETFE, La Arquitectura Transparente” (www.iasoglobal.com/docs/IASO_ETFE_2014_ES.pdf)

Imagen 27. Estabilidad en cables (Monjo Carrió, 1985)

Imagen 28. Familia de cables. (Monjo Carrió, 1985)

Imagen 29. Clasificación de las membranas. (Forster, Mollaert, 2009)

Imagen 30 a 35 Pabellón de la EXPO 2012 Entrada a concurso para la exposición internacional junto al mar, Yeosu Corea, SL Rasch (https://www.sl-rasch.com/en/projects/pavilion_expo_2012/)

Imagen 36 a 40. Pabellón ambulante IBM, Renzo Piano / Taller de Edificación /Atelier de Paris, 1983-86, (<http://arquitecturamashistoria.blogspot.com/2007/11/delicias-renzo-piano-y-el-pabelln.html>)

Imagen 41,42. Schlumberger en Montrouge, Paris, Francia, Atelien Renzo Piano, 1981-84 (<https://eumiesaward.com/work/1324>)

Imagen 43 a 46 Imagen 43. Cúpula del Milenio, Londres, Reino Unido, Richard Roger, Buro Happold Ingenieros, Birdair, 1996-99 (<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/la-cupula-del-milenio-o2-arena/>)

Imagen 47. Fotografía de estructura hinchable interior “Exxopolis”. Obtenido de: http://elviajero.elpais.com/elviajero/2014/01/09/actualidad/1389278411_211056.html

Imagen 48, a 50. Centro polideportivo Amagi, Amagi Yugashima Town, Japan, Fumitaka Hashimoto, Keikau, M.Saiton, Gr de proyecto Estructurales, Kajima Corp.,1991 (<https://www.tensinet.com/index.php/projectsdatabase/projects?view=project&id=4009>)

Imagen 51 a 53. Piscina en Sevilla, Félix Escrig, 1996 (<https://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4000>)

Imagen 54 a 56. García-Diego, C., Llorens, J. y Poppinghaus, H. (2001) «El pabellón de Venezuela en la Expo 2000 de Hannover», Informes de la Construcción, 53(473), pp. 11–26.doi: 10.3989/ic.2001.v53.i473.668

Imagen 57. Cubierta textil en las ruinas de la iglesia de Bad Hersfeld, Alemania, Frei Otto en 1968, renovada en 1992 por Stromeyer Ing.(https://www.heimatverein-waltrop.de/galerie_20160801-badhersfeld.php)

Imagen 58. Membrana para arquitectura textil. (Forster, Mollaert, 2009)

Imagen 59. materiales habituales para arquitectura tensada.(Cerdá Talón, María de,las Mercedes, 2019)

Imagen 60. Diagrama tensión-deformación biaxial de las membranas de fibra de poliéster. Imagen de Shaeffer

Imagen 61. Diagrama tensión-deformación biaxial de las membranas de fibra de vidrio. Imagen de Shaeffer.

Imagen 62. Transmitancia de membrana de doble capa. (Forster, Mollaert, 2009)

Imagen 63. Sección de la membrana de PES-PVC de Mehler, imagen de Giugliano.

Imagen 64. Esquema de las direcciones de los tejidos.Saheffer.

Imagen 65. Hilos y tejidos entrelazados normal Hilos y tejido entrelazado Panamá o 2-2, imagen de (Forster, Mollaert, 2009)

Imagen 66. Patrón de sarga en tejido de fibra de vidrio. Imagen de Rock West Composites (<https://www.rockwestcomposites.com/303tex-410-group>)

Imagen 67 a 69. Cubierta de los Malls y Plaza Caraba del C.C. Isla azul. Madrid. España, L35 Arquitectos. Cojines de doble lámina de ETFE de 250 μm impresa / 250 μm transparente (https://www.iasoglobal.com/docs/IASO ETFE_2014_ES.pdf)

Imagen 70. Grafica tensión-deformación de láminas de ETFE, imagen de López, Oliván y Maldonado.

Imagen 71. Mark, Laura. "Six projects by Pritzker winner Frei Otto." *The Architects Journal*, 11 Mar. 2015.

Imagen 72. Mark, Laura. "Six projects by Pritzker winner Frei Otto." *The Architects Journal*, 11 Mar. 2015

Imagen 73. Creación propia.

Imagen 74. Creación propia.

Imagen 75. Creación propia.

Imagen 76. Creación propia.