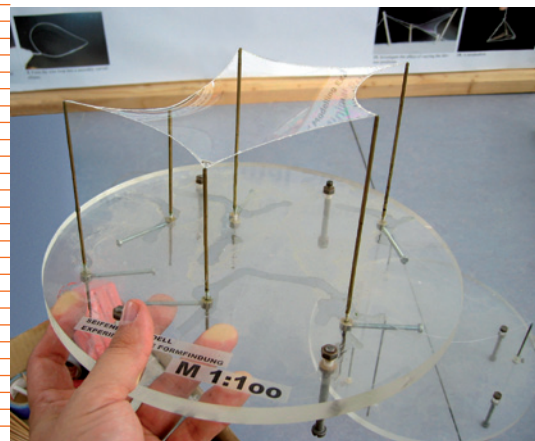


arquitectura textil

Construir con membranas

La arquitectura textil ofrece unos ratios de ligereza estructural imbatibles por los sistemas tradicionales y proporciona alternativas en eficiencia energética. El artículo de Javier Tejera, arquitecto especialista en arquitectura textil y socio fundador de BAT Spain, define los criterios de proyecto y analiza los tipos estructurales, el análisis estático y patronaje, las estructuras y anclajes, las membranas y láminas de cobertura, detallando sus características y usos, y la instalación y mantenimiento de este tipo de estructuras.



Obtención de la forma mediante modelos de lámina de jabón. La geometría resultante es siempre idéntica en cada inmersión, así como las tensiones en toda la lámina.

El término arquitectura textil es el comúnmente aceptado como adaptación del termino inglés *tensile architecture* que, traducido literalmente (arquitectura tensada), aludiría –más correctamente– a una condición de diseño estructural y estado tensional de los materiales empleados, más que al uso de textiles como parece indicar en español. Esto ha provocado a menudo el error de que obras que simplemente han sido construidas con textiles hayan sido calificadas como arquitectura textil cuando los criterios de diseño no corresponden a los de la arquitectura tensada. Y a la inversa, en ocasiones no se ha considerado arquitectura textil a la construida con los criterios básicos de la arquitectura tensada, pero con materiales no textiles. En el primer caso (atribuir la condición de arquitectura textil a toda obra que incorpora textiles) se encuentran muchas de las construcciones textiles convencionales (carpas, pérgolas, toldos), y también la mayoría de los errores habituales al proyectar arquitectura textil sin unas premisas básicas: proyectar ‘velas’ triangulares y por lo tanto planas, cubiertas con escasa curvatura, con errores de concepto en la forma, pretensado insuficiente, falta de adecuación de los materiales, y otros. Ejemplos arcaicos de construcciones consideradas indebidamente ajenas a la arquitectura textil son soluciones como las jaimas de los pueblos nómadas de África, en las que el tejido tiene doble curvatura y se pretensa desde los bordes empleando postes a compresión articulados y cabos a tracción. Dicho tejido (de pelo de cabra) tiene además la peculiaridad de comportarse como una membrana transpirable y adaptable, dado que durante el día el pelo se seca permitiendo la ventilación natural del interior de la jaima, y durante la noche o en los escasos días lluviosos absorbe la humedad, cerrándose los poros e incrementando la impermeabilidad y el aislamiento térmico del interior. Luego veremos cómo, más recientemente, las construcciones de Shukhov, Nowicki y Severud o las primeras obras de Frei Otto, se sustentaban sobre mallas de acero con



Dos ejemplos de cubierta sustentada sobre malla de acero. A la izquierda, pabellón en Nizhny Novgorod, Rusia. Vladimir Shukhov, 1896. A la derecha, Pabellón de Alemania en la Expo de Montreal 67. Frei Otto.

Al contrario de lo que suele ocurrir en la arquitectura convencional, en la arquitectura textil forma y estado tensional están íntimamente relacionados entre sí. Cubierta textil en el eje central de la Expo 2010 Shanghai. SBA Architekten. Utiliza una membrana de 1,1 mm de espesor, formada por fibra de vidrio recubierta con PTFE.



los mismos criterios de doble curvatura, pretensado y atirantado, a pesar de no estar revestidas necesariamente por materiales textiles. Se puede datar una incipiente industria de la arquitectura textil hacia la segunda mitad del siglo XIX, cuando se introduce en la construcción de carpas de circo el uso de tejidos industriales recubiertos con materiales impermeables, que luego denominaremos membranas. Las construcciones de carpas de circo consiguen unos ratios de ligereza estructural imbatibles hasta entonces –y aún hoy– con sistemas tradicionales. Grandes mástiles centrales a compresión en la pista central introduciendo en el tejido deformaciones puntuales en forma de cono desde las cuales la cubierta desciende al contorno, pretensado mediante mástiles menores atirantados hacia el exterior con anclajes por hınca, fáciles de instalar y desmontar. A finales del siglo XIX, y en el contexto de una exposición para mostrar al mundo el ingenio y arte rusos, el ingeniero Vladimir Grigorievich Shukhov proyecta, como culminación de sus magníficas obras de ingeniería anteriores, unos pabellones construidos con estructura en malla de tiras de acero pretensadas. Y aunque el cerramiento dista mucho de ser textil (se emplean láminas de acero), anticipa el uso de las mallas de cables de acero pretensados, con geometrías tipo hiperboloide y paraboloide. Así ocurre en la construcción de la cubierta del Raleigh Arena de Severud y Nowicki en 1952, una malla reticular de cables pretensados en forma de silla de montar entre dos arcos que salva

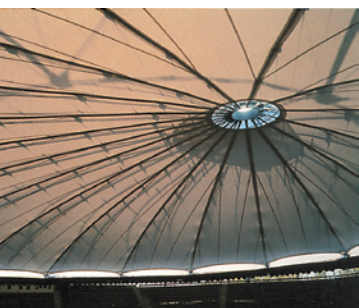
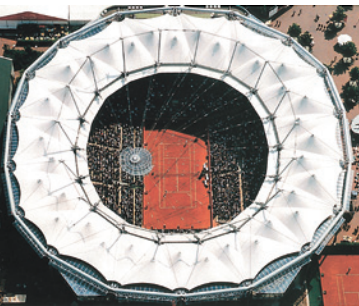
Carpas de circo tradicionales.





Pabellón Fuji en la Expo de Osaka, Murata y Kawaguchi, 1970.

Yamaguchi Dome, Yamaguchi, Japón. M. Saito, 2001.



Vista aérea y secuencia de apertura de la parte central plegable hasta unirse con la cubierta exterior fija. Estadio de tenis Rothenbaum, Hamburgo. ASP Schwenger, Sobek + Rieger, 1999.

una luz de casi cien metros, e influirá enormemente en el nacimiento y desarrollo de la arquitectura textil en Europa de la mano de Frei Otto.

Considerado el padre de la arquitectura textil europea, desde sus primeras obras en los años sesenta, como el pabellón de Alemania en la Expo de Montreal o el pabellón hoy sede del Instituto de Estructuras Ligeras (ILEK) de Stuttgart, Otto proyecta y calcula sus cubiertas tensadas mediante modelos de láminas de jabón y maquetas de tejidos flexibles, que instrumenta y usa como base de cálculo.

Usando mallas de cables pretensados y distintos materiales de cerramiento, estas obras ya establecían criterios de forma, diseño y cálculo de arquitectura textil, a pesar de la dificultad de no estar desarrollada la informática que hoy disfrutamos, y fueron el germen de cubiertas de mayor calado, como las del Estadio Olímpico de Múnich, que se construyeron a la par que se desarrollaban los primitivos programas de cálculo necesarios para la obtención de la forma y el análisis estático.

En Japón cabe destacar el trabajo de Yutaka Murata y Mamoru Kawaguchi a partir de los años setenta, con obras como el pabellón presostático Fuji de la Expo de Osaka, o el de Masao Saito, autor de numerosas cúpulas textiles tensostáticas.

En España la eclosión de la arquitectura textil se produce sobre todo a partir de la Exposición Universal de Sevilla en 1992. Entre el gran número de pabellones y obras textiles (casi todas de arquitectos y empresas extranjeros), se intercalaban algunas de los primeros técnicos españoles en este tipo de arquitectura, sobresaliendo el Palenque de Prada Poole, quien ya había proyectado cubiertas textiles desde los años sesenta, como la Instant City.

Desde entonces el mercado de la arquitectura textil en España ha crecido año tras año, y ya existen un buen número de profesionales especialistas formados, y de obras de gran calidad proyectadas por ellos, hasta el punto de que en los siguientes eventos internacionales celebrados en España (Fórum Barcelona 2004 y Expo Zaragoza 2008), las construcciones textiles más relevantes son ya proyectadas y construidas por españoles.

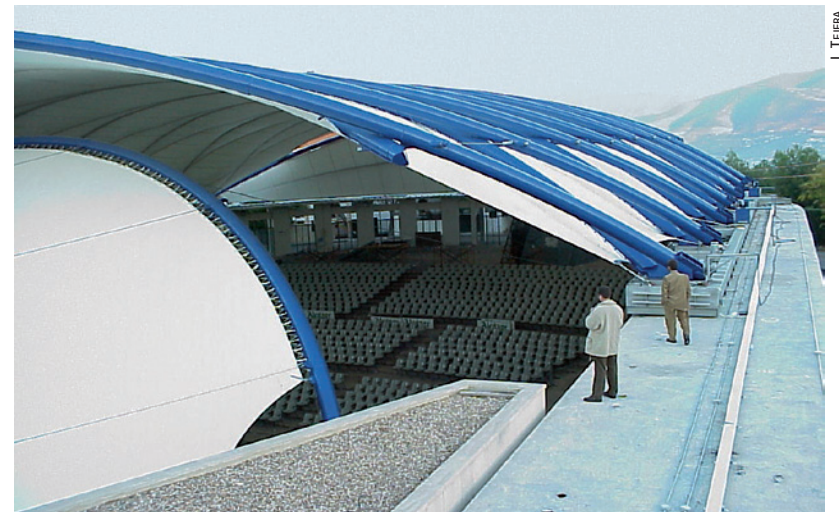
El uso del textil permite la ejecución de cubiertas plegables, una línea de investigación con ejemplos notables como el Commerzbank Arena en Frankfurt (Schlaich) o el estadio de Rothenbaum (Sobek & Rieger), y que cuenta en España con remarcables experiencias, como la cubierta de Marco de Canaveses en Oporto (Monjo y Gámez), la Plaza de Toros de Zaragoza (Schlaich / Monjo, Gámez y Tejera), o las numerosas cubiertas plegables desarrolladas por Escrig, como el Auditorio de Jaén o la piscina de San Pablo en Sevilla.

En la actualidad la arquitectura textil se ofrece como una buena alternativa por eficiencia energética (protección solar, ahorro en iluminación artificial, acabados de baja emisividad, membranas con células fotovoltaicas flexibles) y uso de materiales cada vez más sofisticados, ecológicos y reciclables: el ETFE, los revestimientos de flúor, de dióxido de titanio, las membranas reciclables, biodegradables, bactericidas para usos sanitarios, etc.



J. TEJERA

Cubierta plegable del Auditorio de Jaén, F. Escrig y J. Sánchez, 1999.



J. TEJERA

Puede considerarse sin embargo que los desarrollos más recientes y de mayor interés en arquitectura textil (desde una bien entendida sostenibilidad) buscan alcanzar la mayor eficiencia estructural mediante soluciones mixtas de estabilización de las cubiertas. Las estructuras denominadas tensegrity desarrolladas desde los años cincuenta, basadas en mástiles flotantes comprimidos y estabilizados por cables traccionados, han conseguido ya cubiertas textiles con ratios de eficiencia estructural inferiores a 5 kg de estructura por m², como en la cubierta bifidome de Llorens y Argintegral en el Fórum Barcelona 2004.

Más recientemente, cabe destacar las estructuras neumáticas mixtas con elementos que aportan resistencia a tracción y compresión, patentadas con la denominación Tensairity. Vigas construidas con una membrana presurizada son reforzadas añadiendo un 'cordón superior' más rígido que aporta resistencia a compresión, uno inferior que aporta resistencia a tracción y, eventualmente, cables pretensados que conectan ambos transmitiendo las cargas entre sí, reduciendo la flexión. Con este sistema se han construido ya cubiertas, pasarelas y puentes de luces considerables y ratios de ligereza espectaculares.

Otra línea de desarrollo, aún poco avanzada, es la estabilización de cubiertas mediante subpresión, extrayendo aire en lugar de aportarlo. La cubierta de ETFE del monumento a las víctimas del 11-M en Madrid, fue pionera en este sentido, pero el resultado a lo largo del tiempo, con numerosas reparaciones desde su fabricación, hace dudar por ahora de la idoneidad de este tipo de soluciones.

En el pabellón Plusminus, de Studio LTA, la solución es una serie de 'vigas' neumáticas dispuestas en malla que soportan un cerramiento de doble lámina con presión negativa (hasta llegar al vacío), que se contrae aprisionando dichas vigas y aportando estabilidad al conjunto. También se han desarrollado cubiertas con soluciones mixtas en las que la estructura principal está formada por una malla de cables pretensados, y el cerramiento es un conjunto de cojines de doble lámina presurizada, como en el caso de la torre Khan Shatyr de Foster + Partners.

Finalmente cabe destacar el mercado emergente de las fachadas textiles (una vez que la demanda energética de los edificios ha pasado a ser factor determinante en su diseño), donde el tejido no se emplea para la cobertura de espacios sino para la protección de fachadas convencionales creando fachadas ventiladas muy ligeras. En estas aplicaciones tienen cabida desde las soluciones de forma más libre, basadas en la adaptación de los criterios empleados para el diseño de cubiertas textiles pero aplicadas al plano vertical de la fachada, hasta las soluciones estándar de forma



G. METZGER

Pabellón Plusminus, estructura en malla de vigas neumáticas estabilizadas por doble lámina formando una cámara en subpresión. Studio LTA, 2010.

Puente de 52 m de luz en Val Cenis (Francia) estabilizado mediante dos vigas presostáticas (sistema Tensairity). P. Barbeyer, 2006.



ARLHOUT



A. CHARLTON
T. INNOVATION

Envolvente constituida por una membrana de poliéster recubierto con PVC.
Basketball Arena, Londres.
Wilkinson Eyre, 2011.



D. MALAGAMBA

Arriba, fachada textil de poliéster recubierto con PVC tensado sobre subestructura de aluminio con junta elástica. El diseño, del artista Vaquero Turcios, incluye zonas del tejido impresas en cuatricromía y placas de aluminio lacado.
Rehabilitación del Estadio de El Molinón, Gijón.
Proplan Arquitectura, 2011.

A la derecha, fachada textil de bastidores planos.
Edificio Tripark Las Rozas, Madrid. Allende Arquitectos, 2008.

Fachada textil con tejido emisor de luz. District Heating, Vallecas, Madrid.
Soriano Arquitectos, 2010.



J. TEJERA / BAT SPAIN

plana en las que el textil se pretensa desde los bordes, bien mediante bastidores ligeros prefabricados, o bien directamente a subestructura de fachada. Los sistemas de bastidores aportan las ventajas de la prefabricación, estandarización, rapidez de instalación y minimización de subestructura necesaria, a costa de un ratio por metro cuadrado más elevado. Aquéllos en que la membrana se tensa contra una subestructura de fachada, implican un sobredimensionado de ésta, menor rapidez de ejecución, pero también menor coste, y la posibilidad de crear paños de mayor tamaño al no tener la limitación del transporte de bastidores. El textil aporta innumerables ventajas a efectos de protección de la fachada, y es especialmente efectivo en el caso de muros cortina, donde consigue un considerable ahorro energético en climatización, confort visual para el trabajo con ordenadores eliminando los reflejos o deslumbramientos, además de una superficie exterior personalizable mediante el empleo de los numerosos tejidos disponibles y su posible rotulación. Se puede simular mediante software el comportamiento energético de este tipo de fachadas, habiéndose llegado, como en el caso del proyecto Tripark de Las Rozas (Madrid), de Allende Arquitectos, a eliminar la película de protección solar de los vidrios –y su coste–. Entre las fachadas textiles, los últimos desarrollos introducen nuevas formas alejadas del plano y desarrollan nuevos sistemas de anclaje y materiales textiles de cobertura, como el proyecto District Heating en Vallecas (Madrid) de Soriano Arquitectos, cuya fachada textil permite la transmisión y emisión de luz al incorporar fibra óptica en el tejido.



Cubierta tensostática realizada con estructura de red de cables y malla textil. Baluarte de ses Voltes, Palma de Mallorca.
E. Torres y J. A. Martínez Lapeña, 2000.
Vivienda en Santiago de Chile protegida con envolvente de tejido polimérico que incorpora bandas de aluminio.
Frohn Et Rojas, 2007.



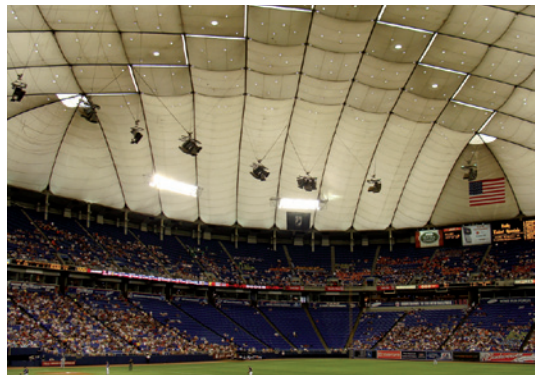
C. PALMA

Diseño: forma y pretensado

Como se ha dicho anteriormente, la forma y el pretensado de una cubierta textil están intimamente relacionados, por lo que conviene señalar los pasos a seguir a la hora de proyectar arquitectura textil, ya que existen ciertas particularidades específicas. No por ello se trata de una enumeración ordenada, ya que debe realizarse un proceso iterativo hasta lograr la solución óptima. **Viabilidad:** el diseño debe dar solución a los requisitos del sitio considerando las enormes acciones que estas cubiertas transmiten, y a los del cliente, seleccionando la solución óptima y el material textil más adecuado según criterios objetivos que se detallarán posteriormente, y no dictados por la arquitectura 'de moda'. **Obtención de la forma:** una vez establecidos los anteriores criterios, usando maquetas y software se obtiene la forma en equilibrio sólo con la carga de pretensado. **Análisis estático:** se establecen los casos de carga y se obtienen las tensiones en la membrana, estructura, anclajes, reacciones, etc. **Dimensionado:** a partir del análisis estático se dimensionan la cimentación, los cables, la estructura, los anclajes y la membrana. **Detalles constructivos:** diseño de detalle de las soluciones constructivas, que deben ser 'construibles' atendiendo a la dificultad extrema de este tipo de instalaciones. **Patronaje de la membrana:** según criterios de lógica estructural, aprovechamiento del material, facilidad de confección y estéticos. **Plan de instalación y mantenimiento:** el montaje de una cubierta textil requiere unos medios y procedimientos establecidos en coordinación con el diseño y la fabricación. Igualmente debe establecerse un plan de mantenimiento de cuyo cumplimiento dependerá la vida útil de la cubierta.

Tipos estructurales: cubiertas tensostáticas y presostáticas

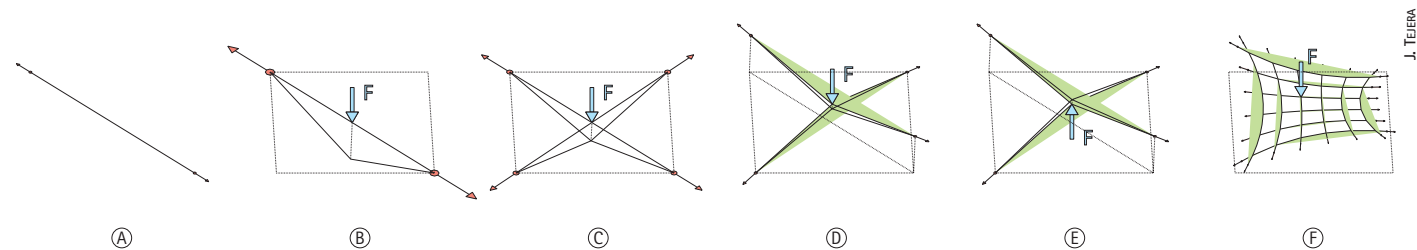
La arquitectura textil que hoy se proyecta, se basa fundamentalmente en dos tipos estructurales: las cubiertas estabilizadas por tracción (tensostáticas) y las cubiertas estabilizadas por presión de aire (presostáticas). En arquitectura textil, la arruga no es bella, denota falta de tensión. Ambos tipos estructurales basan su estabilidad en mantener una forma y un cierto nivel de pretensado en la membrana, bien tensándola desde los bordes, vértices o anclajes interiores (tensostáticas), o bien haciendo que sea la presión del aire interior la que mantenga la forma y el pretensado (presostáticas). En las cubiertas tensostáticas encontramos dos subtipos: las membranas tensadas, en las que estructura y cerramiento son la propia membrana, y las mallas de cables, que cumplen la función estructural, mientras que un material adicional (membranas, placas rígidas, etc.) cumple la función de cerramiento. Entre las presostáticas hay también dos subtipos: las cubiertas de una sola capa estabilizadas presurizando a baja presión el ambiente interior, y las construidas mediante cojines neumáticos de dos o más capas que mantienen una presión mayor en su interior, librando al espacio cubierto de dicha sobrepresión.



Arriba, cubierta presostática realizada con membrana simple reforzada con cables y estabilizada por presión.
Metrodome, Minneapolis.
SOM y Geiger, 1982.

Abajo, envolvente neumática construida con cojines de lámina doble de ETFE.
Allianz Arena, Múnich.
Herzog y De Meuron, 2005.





Eficacia de la forma y el pretensado frente a las acciones exteriores.

A. Cable pretensado.

B. El mismo cable frente a una acción exterior es muy deformable.

C. Dos cables pretensados contenidos en un plano son aún muy deformables.

D y E. Dos cables pretensados con curvatura opuesta son muy poco deformables a compresión y succión.

F. Una malla de cables pretensada y con doble curvatura opuesta (equivalente a una membrana) multiplica el efecto anterior y distribuye las reacciones.

Cubierta plana de fibra de vidrio y PTFE estructurada en elementos de doble curvatura. Estadio Olímpico de Berlín. Von Gerkan, Marg und Partner, 2004.



En todos los casos, la forma juega un papel fundamental en la estabilidad de la cubierta. Si consideramos un cable recto, pretensado por sus extremos, y aplicamos sobre cualquier punto de él una carga perpendicular, la fuerza de pretensado necesaria para contrarrestarla es enorme, ya que por su propia forma, el cable no tiene resistencia ante dicha carga.

Si ahora consideramos dos cables que se cruzan en un nudo en el espacio, pretensados y contenidos en un plano, la resistencia a la deformación ante una carga puntual en el nudo sigue siendo relativamente baja por mucho que se incremente el pretensado.

Consideremos ahora que uno de los cables está pretensado tirando hacia abajo y el otro hacia arriba. Forman un conjunto con doble curvatura de sentido opuesto tal que, al aplicar una carga puntual hacia abajo (compresión por viento, nieve, mantenimiento) en el nudo entre ambos cables, el cable pretensado hacia arriba se tensa y el pretensado hacia abajo se destensa, y a la inversa cuando la carga es hacia arriba (succión de viento).

Una cubierta textil tensostática se comporta de forma similar al conjunto de dos cables descrito: la malla poligonal con la que se modeliza se compone de familias de cables que se cruzan en nudos, y para garantizar cierta estabilidad, dichos cables deben tener curvatura de sentido opuesto en cada punto (curvatura anticlástica), y encontrarse pretensados.

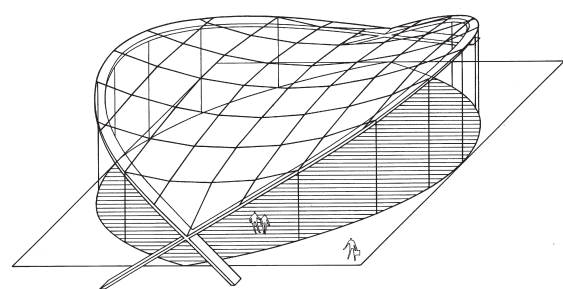
La tensión en la superficie de una membrana es proporcional a su radio de curvatura, y por lo tanto, a mayor curvatura de una cubierta, menor pretensado será necesario introducir en ella para estabilizarla.

Por el contrario, una cubierta plana o con escasa curvatura, requerirá un pretensado muy elevado para que sea estable a viento, nieve o embolsamientos de agua, lo que acarreará un sobredimensionamiento de ésta y de su estructura.

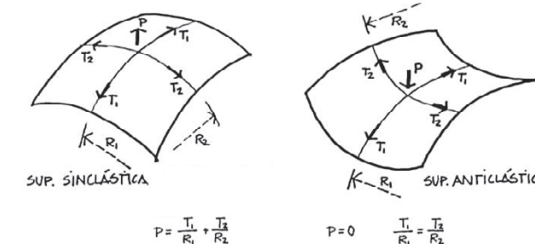
La búsqueda de la forma puede ser geométrica, mediante traslaciones o revoluciones de curvas en el espacio, o mediante la vía tensional, empleada en la construcción de maquetas con tejidos elásticos. A partir de un contorno o una forma inicial, resulta relativamente sencillo obtener soluciones y variaciones de dicha forma por simple introducción de cargas y deformaciones puntuales o lineales.

Mediante la vía tensional se experimenta físicamente –como en el caso de usar un software de obtención de la forma– la variación de la forma con la de la fuerza de pretensado de la membrana, así como de su resistencia frente a acciones exteriores.

Los programas informáticos actuales de obtención de la forma siguen un procedimiento análogo: establecimiento de las condiciones del contorno, características del tejido (modelizado como una malla compuesta por barras), pretensado y adjudicación de una densidad de fuerzas a las barras que lo forman para permitir que un solver obtenga la forma en equilibrio.



Cubierta formada por malla de cables con curvatura opuesta. Raleigh Arena, Raleigh, EE UU. F. Severud y M. Nowicki, 1952.



A la izquierda, estructura textil de doble curvatura soportada por mástiles triangulados. Pabellón Skyline en Minehead, Reino Unido. S & P Architects, Buro Happold, 1998.

En el diseño y la obtención de la forma es fundamental considerar la relación entre curvatura, pretensado y estabilidad de la cubierta.

Así se obtienen las grandes familias de geometrías: paraboloides, conoides, hiperboloides, de las que provienen, por su combinación o variaciones, la mayoría de las formas aplicadas a la construcción de cubiertas tensadas.

A efectos de cálculo, la fuerza de pretensado de una cubierta tensostática se estima en función del tipo de material, aunque también deben ser tenidos en cuenta la forma y los distintos casos de carga en función de la ubicación de dicha cubierta, ya que el pretensado debe equilibrar las acciones exteriores. A modo orientativo, en cubiertas de tejido de poliéster recubierto con PVC se puede estimar un pretensado de cálculo mínimo de una vez y media la resistencia a tracción del tejido, y en el caso de usar membranas de fibra de vidrio con recubrimiento de PTFE, de al menos tres veces dicha resistencia.

Las cubiertas presostáticas por su parte, forman dobles curvaturas pero del mismo sentido en cada punto (curvatura sinclástica), que se estabilizan mediante aire a presión en su interior –fuerza perpendicular a la cubierta en cada punto– que pretensa la membrana y equilibra la acción exterior (viento, nieve, etc.).

Como en el caso de las cubiertas tensostáticas, la tensión T en la membrana, y el radio de curvatura R también están relacionados (además de la presión interior P_i en este caso). En una esfera, según la expresión $T = P_i \times R / 2$. Es decir, que al construir una esfera dos veces mayor, la tensión en la membrana también se duplica ($2T$, ya que la nueva $T = P_i \times 2R / 2$).

Resulta por lo tanto de vital importancia, tanto en cubiertas tensostáticas como en presostáticas, considerar en el diseño y la obtención de la forma, la dramática relación existente entre la curvatura, el pretensado y la estabilidad de la cubierta, para adentrarse en su análisis estático con cargas exteriores.

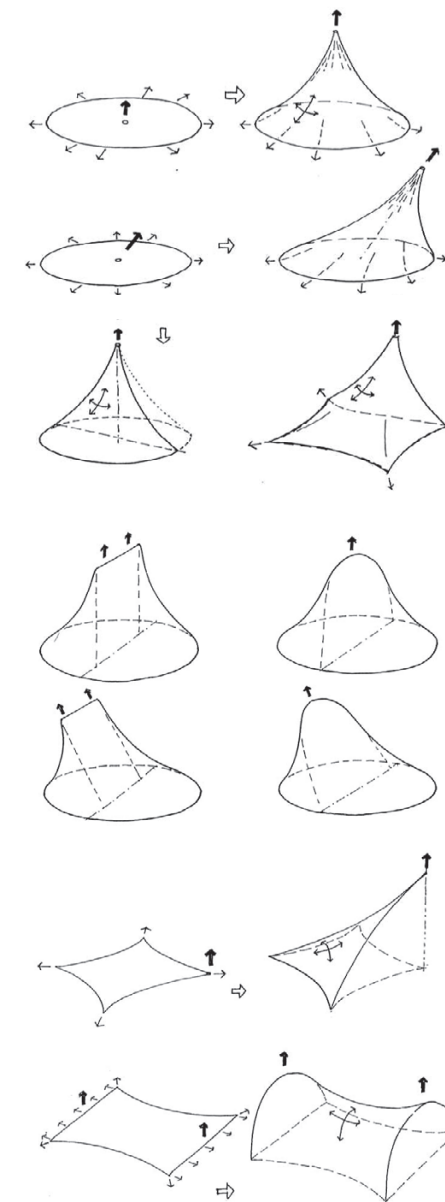
Ingeniería: análisis estático y patronaje

Una vez obtenida la forma en equilibrio, pretensada y sin cargas exteriores, se inicia el análisis estático para los distintos casos de carga.

En arquitectura textil se debe considerar el pretensado (que depende del tipo de material, de la forma y del resto de acciones), el viento (que se extrae del CTE y depende de la zona eólica, la exposición y la forma de la cubierta) y la nieve (que depende de la zona climática). Las acciones debidas al peso propio pueden llegar a ser despreciables en función de la ligereza de la cubierta, así como la de mantenimiento, ya que no es común trabajar sobre la cubierta con viento o nieve.

Las combinaciones y casos de carga habituales de entre las anteriores (en caso de peso propio despreciable) son: el pretensado, pretensado + nieve, pretensado + viento en varias direcciones, y pretensado + viento a compresión en varias direcciones + nieve.

En este punto se inician las dificultades de interpretación, ya que no existen en el CTE o en los Eurocódigos geometrías similares a las empleadas en arquitectura textil –con doble curvatura–, ni se considera el efecto dinámico del viento, que produce una disipación de las acciones-reacciones debido a la ligera deformación que se produce en la



Tipologías estructurales en arquitectura textil. Las formas más complejas surgen

de la combinación de las anteriores.



BINDAR

Cubiertas cónicas patronadas radialmente y en paralelo. En el segundo caso se consigue un mayor aprovechamiento del tejido y menor confección, pero

la forma resultante es menos cercana al conoide y más a la pirámide (por lo tanto es más plana y requerirá mayor pretensado para ser estable).

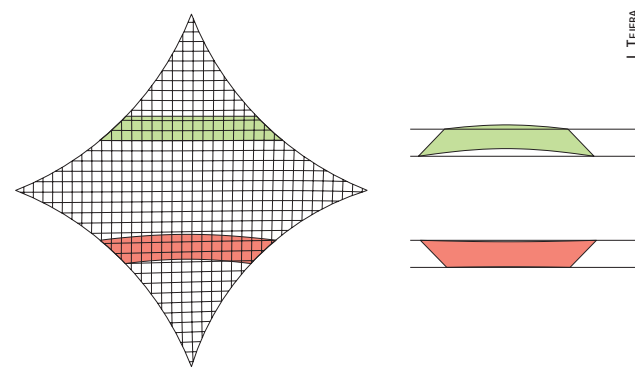


BINDAR



M. SAHAR

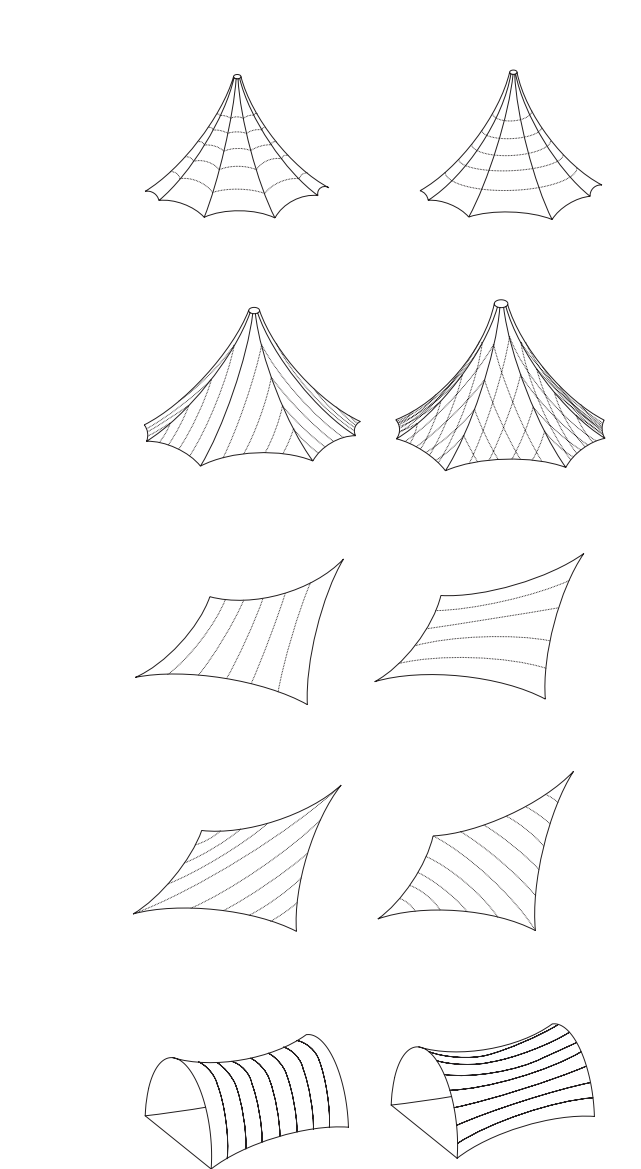
Diseño de patronaje en el que se han incorporado elementos decorativos de la cultura local. Sombrillas plegables en la Mezquita del Profeta (Medina, Arabia Saudí), SL-Rasch, 1992.



Patronaje mediante líneas geodésicas (rojo) y mediante cortes verticales (verde). Utilizando líneas geodésicas, el aprovechamiento del material será mayor, ya que las líneas de corte geodésicas

son de gran curvatura en el espacio, pero escasa curvatura en el plano, mientras que los cortes verticales generan patrones de gran curvatura al aplanarlos.

J. TEJERA



J. TEJERA

cubierta. En este sentido, actualmente se desarrollan métodos de simulación que consideran estos efectos dinámicos aplicados sobre las geometrías anticlásticas reales, mediante ensayos con dinámica de fluidos (CFD) y túnel de viento real (a partir de la tesis de J. Tejera) que arrojan resultados prometedores por las reducciones considerables en las cargas aplicables con respecto a los códigos. De otra forma, las cubiertas textiles y sus estructuras son penalizadas y sobredimensionadas al ser consideradas desde el punto de vista normativo como cubiertas rígidas convencionales. La siguiente dificultad es el establecimiento de la rigidez de la membrana que se va emplear, ya que al tratarse de materiales plásticos, la curva de tensión-deformación no es lineal, y además, al estar formada por tejido con dos direcciones de hilo, su comportamiento es anisótropo.

En relación con la tensión-deformación del material en ambas direcciones se encuentra la compensación, reducción que habrá que aplicarle posteriormente a los patrones para que, una vez confeccionada la cubierta, su geometría en equilibrio y pretensada sea idéntica a la forma obtenida previamente mediante software. Es decir, si se estima correctamente la compensación aplicable a los patrones, cuando la cubierta se instale tendrá la geometría exacta para poder anclarse a la estructura, pretensándola con la fuerza considerada previamente para obtener la forma.

Una vez obtenido el resultado del análisis estático y evaluadas las deformaciones de la cubierta para establecer si son admisibles, puede pasarse al dimensionado de la membrana, y a partir de las reacciones que ésta introduce en la estructura, al dimensionado de la propia estructura, cables, anclajes y cimentación. Las zonas en que la membrana no cumpla con la resistencia a tracción exigible, deben reforzarse con dos o más capas de tejido, en lugar de sobredimensionar toda la cubierta por una concentración local de tensiones.

La geometría de la cubierta debe posteriormente ser patronada, cortada (preferiblemente mediante líneas geodésicas que siguen la distancia más corta sobre la superficie) en bandas o patrones de ancho inferior al del rollo de tejido comercial que se va a emplear. Los patrones son posteriormente aplanados, pasando de la forma curva en 3D al plano mediante software que emplea procedimientos similares a los utilizados en la proyección de mapas.

No debe olvidarse que las cubiertas se patronan debido a que el ancho de fabricación del tejido es limitado frente a lo prácticamente ilimitado del tamaño de la cubierta, pero sobre todo por la necesidad de adaptar de forma idónea el tejido plano a la curvatura de la cubierta.

Por ello, los patrones deben cumplir una serie de condiciones para resultar óptimos. Deben trazarse y cortarse según las direcciones principales de las tensiones en la cubierta, que son las direcciones en que se orientará la malla para modelizar la forma. Así, en un conoide, donde la forma se genera con una malla radial, los patrones deben trazarse radialmente; un paraboloide tiene las tensiones principales en la

Direcciones principales de la tensión y del patronaje en

conoide, paraboloide e hiperboloide.

dirección diagonal, y la malla para la obtención de la forma y el patronaje debería seguir esta dirección.

Los patrones deben tratar de aprovechar al máximo el ancho de rollo comercial, por ahorro de material y, sobre todo, de confección (menos metros de soldadura). Dicho aprovechamiento no debe comprometer la adaptación a la forma de la cubierta, ya que la relativa elasticidad de las membranas no será capaz de asumir grandes deformaciones por haber planteado pocos patrones.

Es importante finalmente considerar en el diseño del patronaje también aspectos estéticos: al solapar dos capas de tejido para su soldadura, la translucidez de las uniones y los refuerzos es la mitad que en el resto de la cubierta, por lo que el patronaje resulta muy visible. El ancho de dichas soldaduras se establece en función del tipo de material, desde un mínimo aconsejable de 40 mm hasta 100 mm, y serán las líneas que desde el interior expresarán la forma de la cubierta.

Una vez obtenidos los patrones, estos deben cortarse y unirse para formar la cubierta. El método más adecuado por su rapidez y minimización de errores es el plóter de corte, que interpreta los archivos de patronaje y corta la membrana directamente desde el rollo.

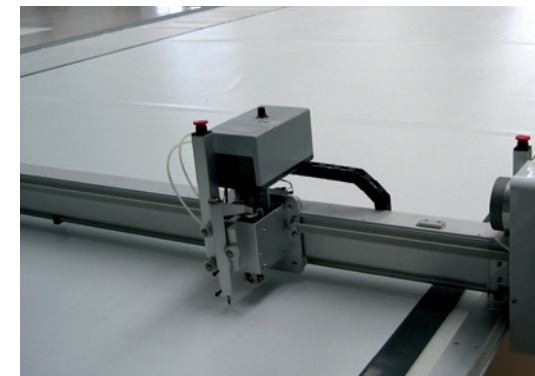
La confección de los patrones depende fundamentalmente del tipo de textil. Por regla general no debe admitirse la costura –por razones de durabilidad y resistencia– cuando sea posible la soldadura. En el caso de los tejidos de poliéster con recubrimiento de PVC, no es recomendable la soldadura por calor; debe hacerse por alta frecuencia, unión más duradera y que compromete a toda la capa de revestimiento plástico y no sólo a la superficial. En el caso del ETFE y la fibra de vidrio recubierta con PTFE o silicona, la soldadura se realiza mediante maquinaria que aporta presión y calor.

Soporte: estructuras y anclajes

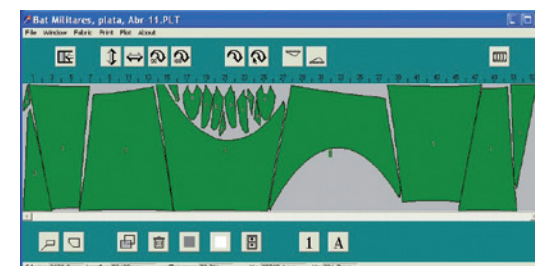
Es bien conocido que Buckminster Fuller preguntó a Norman Foster, visitando su obra del Sainsbury Centre, por el peso de su edificio. Foster, perplejo, llegó a la conclusión al día siguiente de que pesaba demasiado, y que la mayor parte del peso (el 80%) se concentraba en las cimentaciones, que permanecen ocultas. La relación entre el peso del edificio, la energía empleada para su construcción y la prestación que ofrece es fundamental bajo el prisma de la verdadera sostenibilidad, y especialmente crítica en arquitectura textil. Nada resulta tan llamativo como una cubierta textil 'ligera' que se estabiliza mediante una estructura masiva.

Dada su pretendida ligereza, las estructuras que la soportan y los anclajes de transición deben tratar de diseñarse con los mismos criterios de ligereza.

Las reacciones que genera la cubierta deben ser transferidas a la estructura portante, en la medida de lo posible, mediante nudos articulados, ya que en caso contrario el momento generado en dichos puntos penaliza enormemente la estructura, que resulta sobredimensionada.



J. TEJERA / BAT SPAIN



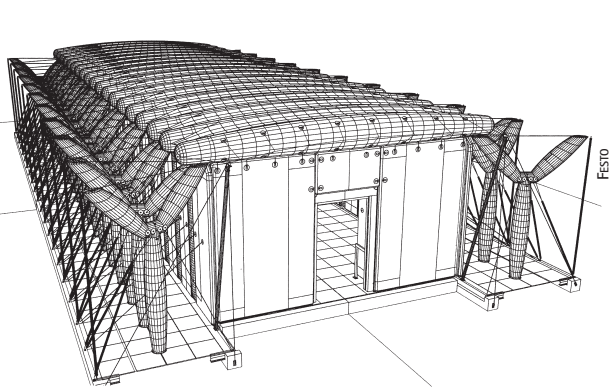
J. TEJERA / BAT SPAIN



J. TEJERA / BAT SPAIN

El plóter de corte (arriba) interpreta los archivos de corte de patrones (en el centro) y realiza un replanteo previo sobre el ancho de rollo para el

máximo aprovechamiento del tejido. Abajo, maquinaria de soldadura por alta frecuencia para membranas de poliéster y PVC.



Pabellón Festo, primer edificio construido íntegramente por elementos neumáticos y con un interior de geometría adintelada.

Detalle del anillo en el punto alto de una cubierta cónica.



J. TEJERA / BAT SPAIN



ANLIGHT



ANLIGHT

Cubierta textil Tensairity formada por vigas neumáticas y membrana tensada entre ellas.

Aparcamiento en la estación ferroviaria de Montreux, Suiza. Luscher Architectes, 2004.

Los perfiles empleados para mástiles, vigas o arcos, deben diseñarse con la sección óptima en cada caso, siendo la circular la más eficaz para el tipo de cargas que generan este tipo de cubiertas, por tener la masa del perfil más alejada del centro y comportarse de forma idéntica en todas las posibles direcciones de carga. En caso de acumulación de tensiones, exceso de flecha en grandes luces, o de pandeo en mástiles de gran longitud, crear estructuras espaciales o adaptar la sección de los soportes a las exigencias locales en cada punto, puede ayudar a la optimización de la estructura, cuidando el balance entre peso y apariencia para no incrementar su masividad.

Las estructuras de malla de cable, aun teniendo una apariencia ciertamente ligera, transmiten cargas superiores –y puntuales– en los bordes por la necesidad de un pretensado mayor, lo que penaliza la estructura principal, y representan ratios de peso por m² cubierto elevados, ya que la malla de cables de acero es más pesada que una simple membrana plástica pretensada.

Existen ya algunos ejemplos en los que la estructura metálica se ha sustituido por soportes, vigas o arcos contruidos con membranas neumáticas, dotándolas de gran ligereza. La asignatura pendiente de este tipo de soluciones es su menor durabilidad y mayor necesidad de mantenimiento en relación con las estructuras convencionales.

El diseño de los detalles constructivos, tanto de la propia estructura como de los anclajes entre ésta y la membrana, debe cumplir una serie de condiciones que los hagan óptimos. Deben ser resistentes, compatibles geométricamente con el proceso de montaje y el estado final, acordes visualmente con la ligereza del conjunto, sencillos en su diseño e instalación y deben permitir el retensado futuro así como una suave transición de cargas desde los elementos más rígidos (estructura y anclajes) a los más flexibles y frágiles (membrana). Prácticamente se puede decir que hay un detalle para cada tipo de cubierta, pero sin ánimo de hacer un repaso exhaustivo, pueden considerarse una serie de detalles tipo para anclajes interiores, de esquina y de borde, adaptables a cada caso.

La transición entre la estructura y la membrana se realiza, en el caso de anclajes interiores (como en los vértices de conos), mediante anillos que refuerzan la cubierta en el punto de máxima acumulación de tensiones, mientras que los anclajes exteriores en los vértices (también denominados 'puños' en referencia a la terminología náutica que designa las esquinas de las velas) se resuelven mediante refuerzos y placas que deben tratar de resolver la puesta en tensión independiente de la esquina de la membrana y de su borde.

Los bordes de una cubierta textil pueden ser libres (con todos los grados de libertad) o fijos (con algún o ningún grado de libertad). Al primer tipo pertenecen los detalles de borde tipo relinga flexible: el borde de la cubierta lleva confeccionado un bolsillo para introducir en él un cable que, mediante tesado, incrementa la carga de pretensado de la membrana. En caso de cargas muy elevadas, y por tanto de cables de borde de un diámetro elevado, es preferible sacar dicho cable al exterior y conectarlo con la membrana cuyo borde se refuerza mediante pletinas lineales.



J. TEJERA / BAT SPAIN

A la izquierda, detalle de la placa y refuerzo en el vértice de una cubierta textil con cable de borde interior.

A la derecha, detalle de cable de borde exterior, conectado a pletina de borde de la cubierta mediante grapas en U. En las proximidades de los vértices de la cubierta se instalan unas bridas que bloquean el deslizamiento a lo largo del cable, absorbiendo la tensión tangencial.



J. TEJERA / BAT SPAIN

En los bordes fijos se puede confeccionar un bolsillo en el que se introduce una varilla o tubo con resistencia a flexión, que se ancla a la estructura mediante diversos mecanismos (tensores, cintas, muelles) que permiten el pretensado, o un cordón semirrígido que se encarrila en perfiles de aluminio extruido. Ambos sistemas permiten un pretensado uniforme y un grado de libertad, ya que la membrana puede deslizarse en la directriz del borde. No son recomendables los anclajes que unen rigidamente la membrana (atornillada, clipada, etc.) a la estructura, o aquellos que, a pesar de su 'aspecto náutico', transfieren cargas puntuales a la membrana pudiendo generar arrugas, concentración de tensiones y roturas (ollaos, acordonados, etc.).

Materiales de cobertura: membranas y láminas

En arquitectura textil se emplean dos tipos de materiales para la cobertura:

Membranas, compuestas por una base de tejido, un recubrimiento plástico y un acabado. **Láminas**, de un solo material plástico en masa.

Antes de hacer un repaso de los materiales más empleados, conviene establecer unos criterios de selección aunque se mencionen materiales y características que se desarrollarán posteriormente con más extensión.

Entre los factores más determinantes en la selección del material de cobertura, asociados a su composición, se encuentran:

Coste del material: los materiales más económicos pueden ser en ocasiones adecuados para construcciones efímeras, pero inadecuados para cubiertas permanentes. Por ser las más económicas, en España se han empleado sobre todo las membranas de tejido de poliéster recubierto con PVC, aunque existen algunos ejemplos recientes de cubiertas de tejido de fibra de vidrio con recubrimiento de PTFE o de silicona, así como cubiertas de láminas de ETFE.

Conviene aclarar que el coste de la cubierta no sólo es el del material, sino también el de su confección y puesta en obra. Materiales como el PTFE (teflón) o la silicona no se funden en el proceso de soldadura, por lo que es necesaria una cinta intermedia termofusible que encarece su confección, además del sobrecoste del material en sí.

'Fragilidad' del material: en el proceso de corte, confección y montaje, es también un aspecto crítico que debe considerarse al seleccionarlo. Mientras que el poliéster-PVC se puede doblar, enrollar y plegar sin dañar el tejido, las membranas de fibra de vidrio-PTFE, fibra de vidrio-silicona y las láminas de ETFE se deben tratar con extremo cuidado desde que se desenrollan para cortar, hasta que se confeccionan e instalan, debiendo ser protegidas de elementos punzantes, plegadas o enrolladas con amplios radios de curvatura, sin acumular peso sobre ellas y sin arrugas, e igualmente deben ser desplegadas y montadas con todas las precauciones. Los daños que se produzcan en ellas no son recuperables en obra, a diferencia del poliéster-PVC, y no sólo representan un problema estético (aparición de marcas blancas o ligeras arrugas sobre su



J. TEJERA

Imágenes de la fijación de la membrana en el Ecobulevar de Vallecas, Madrid (D. García-Setién, B. Tato, J.L. Vallejo, 2005). Arriba, solución inicial, con borde acordonado que producía cargas puntuales y falta de pretensado con riesgo de

colapso en caso de rotura del cordón. Abajo, solución definitiva, de borde con bolsillo, varilla y cintas, con transmisión de carga uniforme, pretensado suficiente, y a la que no afectaría la rotura puntual de una cinta.



J. TEJERA / BAT SPAIN

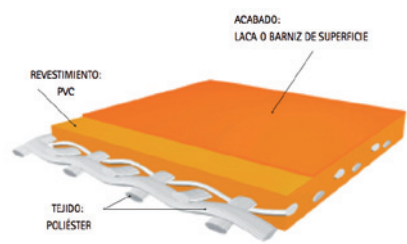
El auditorio Zénith en Estrasburgo se envuelve con una piel de fibra de vidrio y silicona elegida por su comportamiento con la luz. M. y D. Fuksas, 2007.



Paramentos de lámina de PVC tensada con calor y retroiluminada. Aquarium Finisterrae. J. M. López Mihura, 2010. Por su elevada elasticidad, las láminas de PVC no son apropiadas para aplicaciones exteriores.



FERRARI



Sección de un tejido de poliéster con recubrimiento de PVC.

Fachada textil realizada con malla microperforada de poliéster y PVC. Sede de las oficinas de Eneres en Madrid. Luis de Pereda, 2010.



superficie), sino que además comprometen la seguridad estructural de éstas al afectar a fibras que se parten o dañan.

Cantidad de estructura: en estrecha relación con el coste de la cubierta, la cantidad de estructura necesaria (mástiles, arcos, cables, cimentación) depende a su vez, entre otros factores, del material de cobertura empleado y su resistencia a tracción. Las cubiertas construidas con membranas de fibra de vidrio con recubrimiento de PTFE o silicona requieren un pretensado elevado, que implica un sobredimensionamiento de la estructura en relación a la solución en poliéster-PVC. Las cubiertas de cojines de lámina de ETFE pueden implicar aún mayor cantidad de estructura por la baja resistencia a tracción del material, que obliga a la modulación de los cojines en tamaños moderados. En caso de diseñar cojines de gran tamaño, es necesario reforzarlos con una malla de cables que reduce localmente el radio de curvatura y por lo tanto la tensión en la membrana. Esto puede no representar un gran ahorro estructural, por la necesidad de la malla, y porque el borde tendrá menos metros de contorno al hacer cojines mayores, pero aumentará de sección al soportar mayores cargas (por el tamaño del propio cojín y por las cargas puntuales que introduce la malla de cable).

Comportamiento acústico: las membranas ofrecen bajos niveles de aislamiento acústico (en torno a 15 dBA para una membrana media de poliéster-PVC de 1000 gr/m²), y el efecto de reverberación interno debe paliarse aplicando membranas microperforadas en cubiertas de doble capa.

Comportamiento térmico: el aislamiento térmico que aportan es igualmente bajo (en torno a 6,4 W/m²°C para la misma membrana anterior), y debe considerarse sobre todo el paso de energía a través del textil.

Transmisión luminosa: determinados proyectos (invernaderos y microclimas, piscinas, balnearios, centros comerciales o campos de fútbol, siempre en lugares con escaso

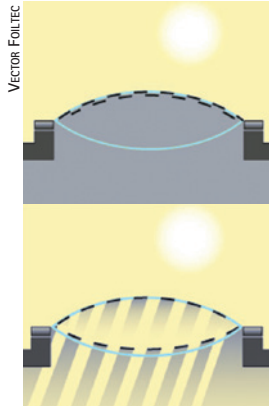
	tejido	recubrimiento	características
membranas	HDPE (polietileno de alta densidad)"	LDPE (polietileno de baja densidad)	Baja resistencia a tracción -uso general en bastidores prefabricados- y a rayos UV. Bajo coste de material y de fabricación de membranas. Buena resistencia al ensuciamiento. Durabilidad 7-10 años. Reciclable.
	poliéster	PVC	Material estándar en arquitectura textil. Resiste el doblado en instalaciones temporales. Estabilidad media a rayos UV. Fácil de confeccionar e instalar. Su elasticidad permite absorber ligeros desajustes de fabricación. Translucidez hasta 40%. Requiere acabado protector del PVC y antiadherente (PVDF o acrílico; los acabados de PTFE y silicona no son aplicables por bajo punto de fusión del poliéster). Uniones por alta frecuencia. Coste moderado. Durabilidad hasta 20 años. Reciclable.
	fibra de vidrio	PTFE	Alta resistencia al fuego, al ensuciamiento y a los rayos UV. Translucidez hasta 20%. Su baja elasticidad requiere precisión en cálculo y patronaje, y evitar daños por doblado. Uniones térmicas. Coste elevado. Alta durabilidad (>25 años). No reciclable.
		silicona	Menor resistencia al ensuciamiento que con recubrimiento de PTFE y mayor flexibilidad y resistencia a daños por doblado. Bloquea los rayos UV-B y UV-C dañinos y deja pasar los UV-A esenciales para las plantas. Translucidez hasta 40%. Uniones por vulcanización. Su combustión no produce gases tóxicos. Durabilidad >20 años. Coste moderado. No reciclable.
	PVDF	PVDF (impermeabilización) o sin recubrimiento.	Alta durabilidad, resistencia al fuego, a los rayos UV y antiadherencia. Translucidez hasta 90%. Su gran elasticidad limita el uso a aplicaciones interiores. Coste elevado. Alta durabilidad (>25 años). Reciclable.
	PTFE (teflón)	PTFE (impermeabilización) o sin recubrimiento.	Alta resistencia al fuego y a rayos UV. Resiste el doblado en cubiertas plegables. Uniones por puntadas. Translucidez hasta 40%. Coste elevado. Reciclable.
láminas	polímero		características
	ETFE		Transparencia y antiadherencia. Resistencia y translucidez a rayos UV e IR (calentamiento por efecto invernadero). Baja resistencia a tracción. Uso general en cubiertas de cojines neumáticos de tamaño moderado, con maquinaria de presurización continua. Uniones por puntadas. Coste muy elevado. Alta durabilidad (>25 años). Reciclable.
	PVC		Baja resistencia a tracción. Muy alta elasticidad, adaptable a geometrías complejas, aunque inapropiado para instalaciones permanentes al exterior. Translucidez hasta 90%. Coste bajo. Baja reciclabilidad.

Características fundamentales de las membranas y láminas utilizadas en arquitectura textil.

soleamiento) pueden requerir imperativamente una alta translucidez, en cuyo caso la selección apuntaría al ETFE, que proporciona un mayor paso de luz (90%) y también un sobrecalentamiento del interior por efecto invernadero, ya que el ETFE permite el paso del mismo porcentaje de radiación infrarroja y ultravioleta. Otros espacios pueden requerir un compromiso entre una elevada iluminación natural (hasta un 40%), protección solar efectiva, y relativa economía, por lo que el poliéster-PVC sería una elección razonable. En proyectos donde el criterio imperante debe ser la durabilidad o buen mantenimiento del material, por encima de su coste o su escasa translucidez (hasta un máximo de un 15%), puede tener sentido seleccionar la membrana de fibra de vidrio-PTFE, o la de fibra de vidrio-silicona si se pretende una mayor transmisión luminosa (hasta un 40%) a costa de una superficie menos resistente a la suciedad.

Para casos en que la impermeabilidad no sea una condición de proyecto, pero sea necesario un control solar medio permitiendo cierta visibilidad, es posible emplear mallas microperforadas de cualquiera de los anteriores materiales, o combinaciones de malla y lona, respetando la compatibilidad de soldadura entre materiales de la misma composición.

Color: las membranas de poliéster-PVC disponen de una amplia gama de colores (sobre todo en gramajes ligeros, por debajo de 700 gr/m²). En gramajes mayores suelen encontrarse disponibles sólo en blanco o algún metalizado. Las membranas de fibra de vidrio-PTFE sólo están disponibles en color blanco, pudiendo encontrarse algunas mallas microperforadas del mismo material en colores plateados o negros. En el caso de las de fibra de vidrio-silicona, es igualmente el color blanco el estándar, aunque algunos fabricantes cuentan con una limitada gama de colores básicos. Las láminas de ETFE pueden ir desde la transparencia hasta una amplia gama de colores, tanto en masa como impresos, pudiendo igualmente imprimirse patrones de sombreado estándar o diseños específicos para cada obra.

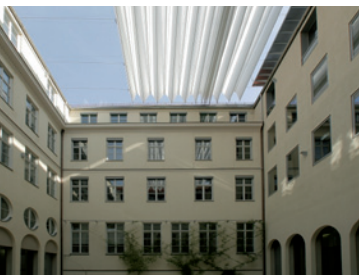


A la izquierda, sistema de sombreado variable en cojines de ETFE. Abajo, patio cubierto con cojines formados por tres láminas de ETFE con sistema de sombreado variable. Ampliación de edificio administrativo en Ludwigsburg, Alemania. Kubeneck Architekten, 2007.





SEFAR



Patio provisto de membrana plegable realizada con tejido de PTFE con recubrimiento de fluoropolímero. Banco HVB, Múnich. Canali y Botti, 2006.



J. TEJERA / BAT SPAIN

A la izquierda, membrana extendida sobre superficie protegida, previa a su izado. En el centro, izado de la cubierta. Debajo, retensado de la cubierta durante una operación de mantenimiento. C. C. Parque Almenara, Lorca (Murcia). Imaginespacios, 2008.



J. TEJERA / BAT SPAIN



J. TEJERA / BAT SPAIN

Durabilidad, mantenimiento y garantía: la durabilidad que declaran los productores de textiles (más de 25 años para ETFE, más de 20 para fibra de vidrio-PTFE y algún tipo de poliéster-PVC) es muy distinta de la garantía por escrito que ofrecen, que sólo cubre –y en disminución progresiva año a año– la reposición del material sin montaje (10 años en láminas de ETFE o membranas de fibra de vidrio-PTFE, y hasta 15 años para algún modelo de poliéster-PVC). Pero la garantía de la cubierta que ofrezca el fabricante-instalador debe estudiarse caso por caso y basarse en un mantenimiento que debe ser obligatorio y contratado en paralelo a la fabricación de ésta, conservando su garantía inicial si se cumple con un manual de mantenimiento incluidas las limpiezas periódicas.

Las membranas de fibra de vidrio-PTFE, por su propia composición (fibra de vidrio muy rígida e indeformable y PTFE antiadherente) y las láminas de ETFE, facilitan su mantenimiento y alargan la vida útil de la cubierta por encima de los veinte años, lo que puede decidir su elección por encima de razones económicas a corto plazo. No obstante, conviene considerar que dentro del mantenimiento de las cubiertas de cojines de ETFE se debe tener en cuenta el consumo energético constante de los equipos que mantienen la presión interior en los cojines, y sus eventuales reparaciones. Las membranas de poliéster-PVC disponibles que se acercan por durabilidad y facilidad de mantenimiento a las de fibra de vidrio-PTFE, deben tener un tratamiento superficial muy resistente al ensuciamiento (barnices de flúor, teflón o dióxido de titanio), y un tejido de poliéster de alta tenacidad, pretensado en la fase de fabricación antes de recubrirlo con PVC.

En cuanto a las membranas de fibra de vidrio-silicona, su baja resistencia al ensuciamiento y su dificultad de limpieza, son características que deben ser evaluadas frente a sus ventajas.

Reacción al fuego: es importante señalar que no es correcto aplicar a las cubiertas textiles unas características de resistencia al fuego o estabilidad al fuego que pueden hacer inviable un proyecto al aplicar al textil las exigencias de un elemento de compartimentación o estructural. La falta de relación entre las clasificaciones de los distintos países hizo que se armonizaran todas ellas en un solo código (Euroclases) con tres dígitos: el primero especifica la combustibilidad del material, el segundo el grado de opacidad del humo, y el tercero el goteo del material en caso de incendio.

El Código Técnico de la Edificación por el momento especifica, en función del uso del elemento textil, si se debe aplicar la Euroclase (para revestimientos interiores), la Clase 1 (para textiles suspendidos como cortinas o telones interiores) o la M2 (para cubiertas textiles), siempre que se aporte certificado de perforación de la membrana en caso de incendio. La tendencia normativa será a unificar aún más los criterios del CTE hacia las Euroclases.

Ejecución: instalación y mantenimiento

La puesta en obra de la arquitectura textil poco tiene que ver con la ejecución de la arquitectura convencional. Requiere unos medios auxiliares, de elevación y herramientas especializados, por lo que debe establecerse un plan de instalación previo a la llegada a obra, e incluso a la fabricación, ya que puede determinar modificaciones para hacer viable dicha instalación.

La estructura, cubierta, cables y anclajes vienen prefabricados de taller con unas tolerancias y ajustes de montaje, pero pueden no ser suficientes en caso de algún error geométrico de consideración. Y en arquitectura textil, los errores no se pueden ocultar ni, generalmente, corregir en obra.

Por ello, para la fase de instalación, la ingeniería, la logística de taller y la de obra deben coordinarse a efectos de la viabilidad del proceso.

A partir de la ingeniería de detalle y los planos de taller, se generan unos planos de montaje que deben contener toda la información necesaria para una puesta en obra correcta y segura: desde la información gráfica descriptiva de la cubierta y su estructura referenciada a unos ejes, sus cotas principales, el patronaje, los refuerzos, las piezas de anclaje, los cables de borde, tirantes y cables de seguridad con sus longitudes, los tensores, etc. Así mismo, deben figurar las cargas de pretensado, los pesos de todas las piezas para dimensionar los medios de elevación y las medidas terminadas de todos los elementos móviles, como tensores, inclinación de mástiles, etc., para la comprobación geométrica del estado final. La membrana debe llegar a la obra perfectamente protegida y plegada de forma específica para cada tipo de material, para que los pliegues no la dañen; y debe ser colocada y abierta desde la posición más similar al estado final, sobre una superficie protegida



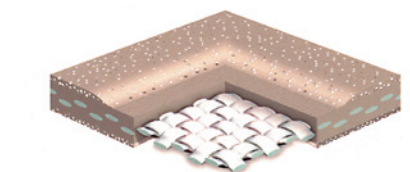
Cerramiento ligero y transparente de ETFE. Centro de entrenamiento forestal, Bad Tölz, Alemania. Herzog + Partner, 2008.

y evitando en la medida de lo posible su movimiento por la obra para no causarle daños ni ensuciarla. Así mismo la estructura debe protegerse convenientemente en el transporte y montaje para no dañar su acabado, eliminando en la medida de lo posible los repasos en obra que no ofrecerán una protección tan segura como la de taller.

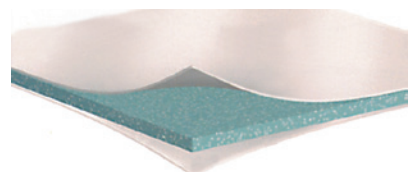
El día del izado debe ser seleccionado en función de las condiciones climáticas, ya que (dependiendo del tamaño y complejidad de la cubierta) éste no debe realizarse con nieve, lluvia intensa o vientos superiores a 15 km/h o ráfagas superiores a 30 km/h, y la cubierta debe quedar izada y asegurada en el mismo día por motivos de seguridad, aunque se continúe el proceso de pretensado en los días posteriores.

No debe instalarse la cubierta al 100% de su carga de pretensado en la primera instalación para evitar daños en la membrana, y porque debido a la fluencia de los plásticos, tenderá a una ligera relajación. Deberá repasarse el pretensado en los días posteriores, y así mismo (dentro de un programa de mantenimiento) revisarse en el futuro, así como el estado de los anclajes, la estructura, y realizar ciertas limpiezas periódicas de la membrana para evitar que la suciedad penetre en ella dificultando posteriores limpiezas.

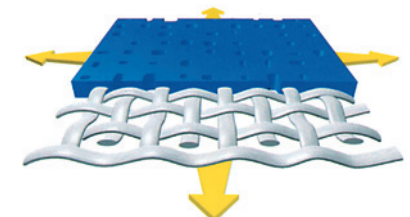
La vida de la cubierta dependerá fundamentalmente del mantenimiento que sobre ella se realice. No es posible asignar un periodo de garantía a la cubierta sin establecer previamente un plan de mantenimiento, que debería ser consensuado y contratado al finalizar la obra para asegurar una vida larga y en perfectas condiciones de conservación. **[T]**



TAYO



TAYO



FERRARI

Arriba, tejido de fibra de vidrio con recubrimiento de PTFE que incorpora una capa exterior fotocatalítica a base de dióxido de titanio que descompone la suciedad y la polución. A continuación, membrana aislante traslúcida

con núcleo de aerogel de sílice entre dos capas de fibra de vidrio-PTFE. Debajo, membrana de tejido de poliéster, de gran estabilidad dimensional conseguida mediante un proceso de fabricación que mantiene tensa la membrana.



R. MOREWITT

Izquierda, cubierta plegable sobre la pista central de Wimbledon (Reino Unido) realizada con tejido de PTFE con recubrimiento de

fluoropolímero, un material que combina buena transmisión luminosa y facilidad de doblado. Populous, 2009.