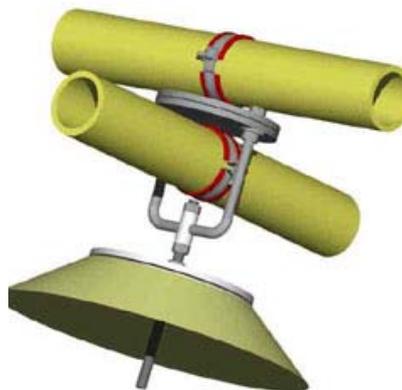


# ETSAB

# ETSAV



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA - ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA -  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DEL VALLE - DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES  
ARQUITECTÓNICAS 1

## DISEÑO DE ESTRUCTURA TRANSFORMABLE POR DEFORMACIÓN DE UNA MALLA PLANA EN SU APLICACIÓN A UN REFUGIO DE RÁPIDO MONTAJE

Tutor: Dr. José Ignacio Llorens  
Co-tutor: Dr. Ramón Sastre Sastre

Autor: Arq. Nelson Rodríguez

BCN Diciembre 2005

## Anexo N° 1: Glosario

Para facilitar la lectura y comprensión de este trabajo se ha incorporado un glosario de términos técnicos que, en muchos casos, no son de uso frecuente en la arquitectura o en construcción tradicional por lo que su empleo no está extendido. En otros casos, son acepciones de la aplicación del término en este trabajo.

Este glosario se ha organizado por temas, estos son: resistencia de materiales, sistemas funiculares y mallas estructurales.

### GLOSARIO:

#### 1.- Resistencia de materiales:

**Acción del viento:** es una carga externa que actúa perpendicular a la superficie del elemento estructural y que está en función de la presión dinámica del viento y del coeficiente eólico. Esta carga puede ser de presión o de succión

**Axial:** es una fuerza de compresión o de tensión que actúa perpendicularmente a la superficie del elemento estructural y es normal a la sección. Se consideran positivos los axiales de tensión y negativos los de compresión.

**Cálculo matricial:** es la solución de un sistema de ecuaciones simultáneas en las que las incógnitas son los movimientos en los nudos. Estas ecuaciones establecen la relación existente entre las fuerzas (momentos) que actúan en los extremos de la barra y los movimientos (desplazamientos y giros) que se producen en los mismos

**Carga:** son fuerzas externas e internas que actúan sobre la estructura. Las cargas externas son carga gravitatoria, cargas de uso, viento y nieve. Y las internas el peso propio.

**Comportamiento elástico:** Significa que la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado al material o componente estructural, y que éste volverá a su estado original una vez que la fuerza aplicada se retire.

**Comportamiento plástico:** Significa que la deformación se produce bajo un esfuerzo relativamente constante, y que el elemento no volverá a su estado original permaneciendo deformado una vez que la fuerza aplicada se retire.

**Deflexión:** es la distancia de separación de puntos de un elemento estructural al aplicarle una fuerza externa, a partir de sus posiciones originales sin cargas

**Densidad:** Es la relación entre el peso y el volumen. En este trabajo se expresa en  $\text{Kg/m}^3$ .

**Esfuerzos:** fuerza por unidad de área que origina un cambio relativo en el tamaño y la forma de un material o componente estructural. En este trabajo se utilizó con frecuencia las unidades  $\text{KN/m}^2$ ,  $\text{Kg/m}^2$  y  $\text{Mpa}$ .

Hay tres estados básicos de esfuerzos estructural: de tensión, compresión y cortante, aunque con frecuencia estos términos también son usados para describir las fuerzas aplicadas y las reacciones en función de cómo afectan al elemento estructura.

### ANEXO N° 1. GLOSARIO

**Esfuerzo de Tensión:** Es la tendencia de las partículas que conforman un material o componente estructural a separarse. En este trabajo se expresa en KN

**Esfuerzo de compresión:** Es la tendencia de las partículas que conforman un material o componente estructural a unirse. En este trabajo se expresa en KN

**Esfuerzo cortante:** es la tendencia de las partículas de un material a deslizarse uno sobre otro. En este trabajo se expresa en KN

**Esfuerzo de flexión:** es la tendencia de un elemento estructural a curvarse hacia arriba o hacia abajo, indicando que de un lado del elemento las partículas se alargan debido a la tensión, en tanto que se acortan en el lado opuesto debido a la compresión. En este trabajo se expresa en KN-m

**Límite elástico:** es la máxima tensión que se puede alcanzar sin que se produzcan deformaciones permanentes

**Límite de rotura:** Es la máxima tensión que se puede alcanzar sin que se produzca la rotura del material.

**Momento flector:** es una sollicitación de la sección cuando esta sometida a esfuerzos de flexión.

**Módulo de elasticidad:** Es la relación entre el esfuerzo de tensión y la deformación del material o componente estructural producida en la dirección del esfuerzo. Mide la rigidez del material

**Pandeo:** efecto que presentan los componentes estructurales que son muy esbeltos o poco rígidos lateralmente. En este trabajo se expresa en unidad de fuerza KN

**Peso:** Resultante de todas las acciones de la gravedad sobre las moléculas de un cuerpo, en virtud de la cual está ejerce presión sobre la superficie en que se apoya. En este trabajo se expresa con la unidad de grs o Kg.

**Reacciones:** Son un conjunto de fuerzas verticales que responden a las cargas verticales que actúan sobre la estructura. Cuando la sumatorias de las acciones verticales son iguales a las sumatorias de las reacciones verticales de los apoyos, entonces la estructura esta en equilibrio. En este trabajo se expresa en unidad de fuerza KN

**Torsión:** es el cortante de rotación que ocurre cuando un elemento se tuerce alrededor de su eje

**Túnel de viento:** ensayo experimental para determinar los coeficientes eólicos que actúan sobre una geometría estructural.

## 2.- Sistemas Funiculares:

**Catenaria:** Es la forma funicular que adopta un cable sin carga y es determinada únicamente por su peso propio, el cual es uniformemente repartida a lo largo de su longitud. En este trabajo, también se usa el término “catenaria” para referirse a cualquier miembro

### ANEXO N° 1. GLOSARIO

suspendido o curvado y cargado a lo largo de su longitud. La catenaria es función del coseno hiperbólico

**Flecha:** es la máxima altura de una estructura catenaria determinada entre la distancia de los extremos del cable y la cresta del mismo. La flecha determina el esfuerzo horizontal que se genera en un cable, es decir, cuanto menor es la flecha mayor es el esfuerzo.

**Línea geodésica:** es la línea mas corta entre dos puntos sobre una superficie alabeada.

**Membrana:** es un término latino que significa “piel” y en este trabajo lo determinaremos como “piel tensada”. Existen membranas isótropas como las derivadas de los plásticos, chapas metálicas o madera. Y las membranas de tejido anisótropas como las derivadas de las fibras tanto naturales como sintéticas.

**Funicular:** Son formas que responden a las cargas aplicadas de modo que las fuerzas internas resultantes son de compresión o tensión pura. Las estructuras funiculares pueden dividirse en tres categorías: de curvas simples, de doble cable (cables primarios y estabilizadores) y de doble curvaturas (con cables estabilizadores en sentido perpendicular a la curvatura del cable primario).

**Parábola:** Es una forma funicular de un cable suspendido con carga uniforme en proyección horizontal, sin tomar en consideración el peso del cable. Cuyo radio viene definido por la relación entre la luz y la flecha del cable.

**Patronaje:** Es el proceso mediante el cual las formas anticlásticas y sinclásticas se despiezan en pequeños “trozos” planos, llamados patrones, para que al unirlos conformen la superficie.

**Pretensión:** es la tensión previa que hay que aplicar a un cable o a una membrana antes de entrar en carga para que al aplicarle una carga externa haya una disminución de la tensión inicial y evitar la aparición de compresión que dejan al cable o la membrana inestables

**Superficie anticlásticas:** es una forma en membrana o familias de cables de doble curvatura en sentidos opuestos, es decir curvaturas hacia abajo y hacia arriba y es el único modo de asegurar la estabilidad estructural. Existen dos formas básicas anticlásticas: el paraboloide y el conoide.

**Superficie sinclástica:** es una forma de doble curvatura en el mismo sentidos, como por ejemplo bóvedas y cúpulas.

**Tejido:** es un entramado de fibras o hilos normalmente ortogonal formado por trama y urdimbre con una separación entre los hilos que varía según las exigencias de resistencia. Existe actualmente una variedad de tejidos sintéticos tales como el nylon, poliéster, fibra de vidrio, teflón, entre otros. Así como también fibras naturales de algodón, lana, etc.

**Tienda:** Es una construcción primaria compuesta por un marco rígido y cubiertas con tela o piel originando formas curvas tridimensionales

### 3.- Mallas estructurales

**Apoyo:** es todo dispositivo destinado a unir una estructura al medio de sustentación. Los apoyos tienen una doble función que es la de impedir o limitar los movimientos de las estructuras, y el de transferir las cargas que éstas soportan al terreno de sustentación. Existen el apoyo articulado y el empotramiento.

**Barras:** son elementos ubicados entre los nudos y cumplen la función de transferir las cargas de un nudo a otro.

**Estructuras transformables:** están constituidas por un conjunto articulado de barras rígidas, capaces de plegarse hasta un apretado haz y susceptible de extenderse adoptando la forma curva deseada por la aplicación de una fuerza externa. El paquete inicial se expande, crece y se levanta soportando las tensiones internas de la propia estructura durante este proceso. Estas estructuras precisan de mecanismos para realizar el proceso de transformación.

**Mallas espaciales:** son un conjunto de barras cerradas que trabajan a compresión y a tensión que conducen las cargas hasta los anclajes y cuyo nivel de complejidad está en la resolución del nudo.

**Mallas deformadas:** Son formas cuyo proceso de montaje es a través de la deformación tridimensional de la malla siendo originalmente plana. Trabajan predominantemente a compresión y suelen ser sinclásticas, no son formas geométricas de rotación, ya que en la disposición de las barras no se presentan simetrías radiales.

**Mallas pre-flectadas:** son un conjunto de barras continuas articuladas inicialmente planas a las que se les introduce una fuerza inicial de flexión en las tres dimensiones para formar una geometría curva deseada.

**Nudos:** Es todo dispositivo destinado a unir entre sí los diferentes elementos, componentes o piezas que forman una estructura. Éstos cumplen una doble función, por una parte impedir o limitar los movimientos relativos de unas piezas con respecto a otras, y la de transferir las cargas de tracción o compresión. Estos nudos pueden ser articulados o empotrados.

## ANEXO N° 2. Plásticos reforzados con fibra de vidrio (PRFV)

Desde comienzo de la década de los noventa, la aplicación de materiales compuestos como los plásticos reforzados con fibra de vidrio (PRFV) en la construcción y en la ingeniería han experimentado un aumento importante gracias a las propiedades mecánicas que han alcanzado estos materiales, entre las que destacan:

- Elevado radio de resistencia mecánica vs. peso (25% menos con respecto al acero)
- Baja conductividad térmica.
- Resistencia a la corrosión.
- Ligereza facilitando las labores de montaje y transporte.

Estas características hacen que este material tenga un amplio margen de aplicación, donde resulte importante los requerimientos de resistencia a la corrosión como los entornos marinos, plantas químicas y su ligereza, la cual se torna idónea en situaciones de difícil accesibilidad, facilidad de transporte y maniobrabilidad en el montaje. Su transparencia electromagnética facilita su aplicación en hospitales, torres de telecomunicaciones o vías férreas. Estos materiales compuestos actualmente tienen aplicaciones en la industria aeronáutica náutica y automovilística, en la fabricación de piezas y componentes. En la industria de la construcción las fibras de vidrio son usadas en diferentes áreas, en perfiles para instalaciones, como sustituto del acero en el hormigón para elementos estructurales de puentes, en reparación de edificios, para la fabricación de cables y membranas.

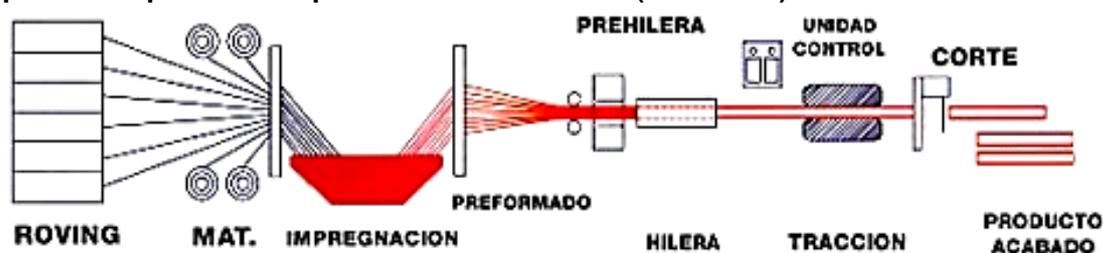
### El proceso de Pultrusión

Es un proceso automatizado que consiste en tirar de las fibras continuas almacenadas en rollos e impregnarlos de resina a través de un molde (extrusión) donde, mediante un aporte externo de calor, se produce una polimerización de la resina, obteniéndose la geometría definitiva tipo perfil, lo que indica que mediante este proceso se puede producir cualquier forma que sea extrusionable.

La técnica de pultrusión permite una producción en continuo con cadencias elevadas, para obtener perfiles macizos, huecos, rectilíneos, curvados y regularmente de sección transversal constante, no permitiendo producir secciones variables. Luego de curados los perfiles, son cortados mediante sierra a la longitud deseada.

El pultrusionado permite obtener una gran variedad de formas en los perfiles así como también en sus características mecánicas, en función del porcentaje de fibra de vidrio utilizado. De la posición exacta de las fibras, tejidos y mallas depende las propiedades y calidad de la pieza resultante, fundamentalmente en lo que a resistencia a cortante y transversal del perfil se refiere.

### Esquema del proceso de producción Pultrusión (NIOGLAS)



## ANEXO 2. MATERIALES PLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO - PRFV



El proceso de producción es totalmente automatizado donde las fibras de refuerzo llevadas en hilos continuos son impregnadas y llevadas a la hilera calefactora donde hay un molde. La impregnación de todas las fibras de vidrio tiene lugar mientras se atraviesa el baño que contiene la matriz polimérica (resina). Las fibras de vidrio impregnadas en la resina entran en la hilera calefactora y son estiradas. El calor da lugar a una reacción exotérmica que pone en marcha el proceso de polimerización (endurecimiento) de la resina obteniéndose la geometría definitiva del perfil.

Seguidamente el perfil sale a la hilera de pultrusión. El mecanismo de arrastre son dos carros alternados para garantizar el movimiento continuo. El corte se realiza mediante un sistema de corte automatizado.

Los perfiles pultrusionados incorporan fibras unidireccionales y capas de tejidos que proporcionan fibras en el sentido trasversal al pultrusionado contribuyendo a mejorar la resistencia del perfil a los esfuerzos transversales y a las uniones por tornillos.

### **Propiedades Mecánicas**

El elemento fibroso (fibra de vidrio) aporta rigidez y resistencia, con una longitud espesor dada y una matriz (resina) que configura geoméricamente el material compuesto. Normalmente la matriz es flexible y poco resistente, con la misión principal de transmitir los esfuerzos de unas fibras a otras, entre ellas, además de proteger a las fibras de posibles daños mecánicos y ambientales.

Las fibras empleadas pueden estar constituidas por:

Carbono, vidrio, boro, aramida, metal, cerámica.

Las matrices también pueden ser variadas:

Orgánicas, minerales, metálicas, cerámicas.

### **Consideraciones y especificaciones de diseño con materiales compuestos PRFV (Miravete. 1994)**

Los factores que se deben tener en cuenta al evaluar un material compuesto y que deben prepararse para la especificación para una aplicación incluyen las características químicas, térmicas, eléctricas y estéticas, en las que se puede mencionar los siguientes factores:

- Naturaleza de la carga:  
Las propiedades de resistencia y rigidez del PRFV dependen de sí la carga aplicada es intermitente, cíclica, de impacto o sostenida. El modo de rotura varía directamente con las resistencias al pandeo y está asociado con el tipo y la duración de la carga.
  
- Condiciones Ambientales:  
Los ambientes de servicios, como la radiación UV, el desgaste, los elementos químicos agresivos y la temperatura elevada tienen efectos deletéreos en el comportamiento de la estructura diseñada.

#### **ANEXO 2. MATERIALES PLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO - PRFV**

- Vida de la pieza:  
La vida del componente es un parámetro importante al determinar los valores del diseño debido a la relación entre el coeficiente de seguridad donde se incluyen factores de envejecimiento y la vida útil de la pieza.
- Factor de seguridad:  
Este factor se aplica para reducir los valores esperados de resistencia y rigidez que pueden surgir a causa de variaciones en los materiales o la fabricación. El factor parcial de seguridad para cargas (o factor de cargas) se aplica a los probables aumentos de carga, sobre los valores esperados basados en el grado de certeza en la estimación de la carga.
- Condiciones de servicios:  
Son las condiciones límites a que va a estar sometida la estructura, incluyen: máximas deformaciones, basada en la fracción de la longitud de la pieza, el pandeo global sin daños y el pandeo local de partes delgadas de la estructural resultante de tensiones temporales o prolongadas, micro fracturas y agrietamientos, que pueden indicar posibles deterioros en el comportamiento de la pieza.

### **Principales ventajas y desventajas en la industria de la construcción**

Entre las principales ventajas del uso de este material en la construcción tenemos (Miravete, 1995):

1. La ligereza, ya que sus densidades oscilan entre 0.03 y 2 Kg/dm<sup>3</sup> lo que aporta ventajas en cuanto a la facilidad de transporte, facilidad de montaje y una significativa reducción de cargas muertas cuando el material se utiliza en para la producción en serie.
1. Por su excelente comportamiento ante la corrosión supone una ventaja para su utilización en aplicaciones donde los agentes ambientales son agresivos (costas, zonas marinas, áreas contaminadas, plantas industriales).
2. Con aditivos son autolimpiantes.
3. No presentan interferencias electromagnéticas, por esto su aplicación en edificaciones para telecomunicaciones o transmisiones.
4. No produce humos tóxicos y una reducida capacidad de propagación al fuego: mediante la adición de productos retardadores al fuego a la matriz fenólica durante la fabricación.
5. Existe la posibilidad de pigmento durante el proceso de fabricación, sin representar altos costos adicionales, por lo que disminuye el costo del mantenimiento de la pieza al eliminar la pintura de acabado final, pudiéndose conseguir también diferentes tipos de texturas (liso, rugoso, brillantes, mates y satinados)
6. Son materiales inertes al agua por esta razón son ampliamente utilizados para instalaciones.
7. No es electroconductor por lo que son usados como aislamiento.
8. No necesita mantenimiento: la resistencia a los agentes atmosféricos es alta lo que garantiza una ausencia de labores de mantenimiento en un plazo no menor a 50 años.

Como inconvenientes o desventajas podemos mencionar:

1. Un diseño erróneo de la pieza puede acarrear problemas en las otras piezas, tales como: desprendimiento de las fibras, disminución de la durabilidad.
2. Comportamiento anisótropo de los perfiles pultrusionado.
3. Poca difusión del material.
4. Ausencia de normativa, códigos y guías de diseño.
5. Falta de referencia en la industria.

#### **ANEXO 2. MATERIALES PLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO - PRFV**

6. Costos de los perfiles sensiblemente más elevados que en otros materiales.
7. El reciclaje directo no es posible, por lo que debe aplicarse tratamientos mecánicos para su reducción en partículas, permitiendo su reciclaje en otros compuestos de menores exigencias estructurales.
8. Los costos al ser sensiblemente superior al acero y al hormigón imposibilitan la difusión de este material en la industria de la construcción, sin embargo hay que destacar los ahorros en el tiempo por la ausencia de labores de mantenimiento en los primeros 50 años de uso.

### **Efectos Ambientales y ciclo de vida**

Los materiales compuestos son susceptibles de presentar alteraciones en su comportamiento en presencia de agentes externos, estos son (Miravete,2003):

- Exposición permanente a la humedad o a un líquido.
- Degradación debida a las radiaciones ultravioleta.
- Envejecimiento.

El efecto de estos agentes de forma permanente hace que el material disminuya sus prestaciones mecánicas y térmicas, sin embargo, los materiales compuestos presentan valores de conductividad térmica muy por debajo a los valores presentados por los metales, estas características es una aportación que hacen las propiedades de los polímeros que al ser reforzado con fibra de vidrio resultan aislantes.

Existe una degradación por agentes químicos donde las moléculas invasoras destruyen algunas de las uniones química de la matriz dando como resultado una degradación de las propiedades mecánicas del material, por lo que se recomienda que al ser usados en plantas industriales o como instalaciones de desechos sólidos sean recubiertos con materiales termoplásticos (PVC, teflón, PTFE o polietileno).

Cuando los agentes son los climáticos el deterioro dependerá de factores como la orientación del material con respecto a los rayos solares y de las "impurezas" en el polímero como los aditivos retardadores, pero principalmente el deterioro vendrá si las fibras entran en contacto directo con la atmósfera.

La degradación por rayos ultravioletas se debe principalmente al efecto que tiene la onda corta de 330 nm en el poliéster, este deterioro se manifiesta en una decoloración del polímero, para evitar esta patología se han desarrollado estabilizadores de los rayos ultravioleta en la formulación de las resinas del poliéster

Otro aspecto a considerar es que los pigmentos tienen un efecto sobre la apariencia del material ya que absorben rayos infrarrojos, este fenómeno hace que aumente la temperatura del material y por consiguiente su degradación

Reciclaje y ciclo de vida:

Los materiales compuestos son termoestables y tienen barreras para su reutilización entre ellas se destaca que pueden ser reprocesados mediante la refundición, es por ello que la mayoría de las operaciones de reciclado de los materiales compuestos, recuperan las fibras en forma corta dado que los procesos se basan en fragmentación y reducción del tamaño.

El 70% del peso del contenido de los materiales compuestos es material inorgánico (carbonato de calcio y fibras de vidrio) y cerca de 10 a 20% del peso es resina termoestable de poliéster y un 5% del peso del contenido de un aditivo termoplástico cuya función es proporcionar una superficie suave al producto, como hemos dicho los compuestos termoestables no tiene la capacidad de ablandarse con la aplicación de calor. Por lo que se

### **ANEXO 2. MATERIALES PLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO - PRFV**

han desarrollado procesos para el reciclado de los materiales compuestos, entre los más comunes tenemos:

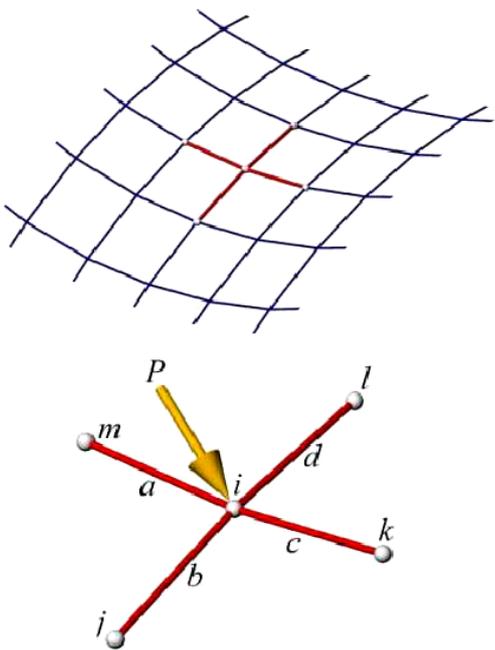
- Amolado y reutilización.
- Degradación química selectiva.

El proceso de amolado consiste en la reutilización de las fibras, el carbonato de calcio y las resinas de poliéster, sin la separación entre estos componentes, el material compuesto es triturado y tamizado a trozos pequeños y posteriormente utilizado como relleno en otros productos, de esta manera se obtienen piezas muy ligeras y resistentes, por lo que un porcentaje del producto es reciclado, el inconveniente de este proceso es que las fibras recicladas no tienen la misma capacidad resistente de las originales. Este proceso supone de la creación de un sistema de recolección de los productos y de un mercado de productos reciclados para que vuelvan a ser consumidos ahora transformado en otros productos.

El proceso de degradación química selectiva consiste en la degradación química de la red del polímero poliéster por reacción de enlaces de este con un apropiado nucleófilo, es decir que la resina de poliéster reacciona con nucleófilos como benzil, alcohol, hidracina o benzilamina, se pueden producir productos solubles copolímeros.

### Anexo N° 3. Método de la densidad de la fuerza y análisis estructural para una carga externa

Es un algoritmo usado para calcular estructuras de grandes deformaciones donde un área puede relajarse o aflojarse ante una fuerza externa y establece que la ecuación de una malla de doble curvatura es el resultado de la condición de equilibrio de cada nodo. Esta ecuación para cualquier punto "i" en cualquier lugar de la malla puede ser descrita como la siguiente estrategia global:

<p>Ecuación de equilibrio:</p> <p><math>S_a + S_b + S_c + S_d = 0</math>, donde <b>S</b> es igual a la Fuerza de la barra</p>	
<p>Sustituyendo las coordenadas x,y,z. Para el caso del nudo "i" la ecuación es:</p> <p><math>S_a \cos(a,x) + S_b \cos(b,x) + S_c \cos(c,x) + S_d \cos(d,x) = P_x</math>  <math>S_a \cos(a,y) + S_b \cos(b,y) + S_c \cos(c,y) + S_d \cos(d,y) = P_y</math>  <math>S_a \cos(a,z) + S_b \cos(b,z) + S_c \cos(c,z) + S_d \cos(d,z) = P_z</math></p> <p>Como la expresión <b>cos(a,x)</b> es una normal a la longitud del cable sobre el eje x, esta normal puede ser sustituida por la expresión</p> <p><math>\frac{(x_m - x_i)}{l_a}</math></p> <p>Resultando la ecuación.</p> <p><math>\frac{x_j - x_i}{l_a} S_a + \frac{x_j - x_k}{l_b} S_b + \frac{x_j - x_l}{l_c} S_c + \frac{x_j - x_m}{l_d} S_d + P_{ix} = 0</math></p> <p><math>\frac{y_j - y_i}{l_a} S_a + \frac{y_j - y_k}{l_b} S_b + \frac{y_j - y_l}{l_c} S_c + \frac{y_j - y_m}{l_d} S_d + P_{iy} = 0</math></p> <p><math>\frac{z_j - z_i}{l_a} S_a + \frac{z_j - z_k}{l_b} S_b + \frac{z_j - z_l}{l_c} S_c + \frac{z_j - z_m}{l_d} S_d + P_{iz} = 0</math></p> <p>Donde:  <b>x,y,z</b>= coordenadas  <b>l<sub>a,b,c,d</sub></b>= longitud de la barra  <b>P</b>= carga externa</p>	
<p>Si se asume que para todo nodo de la malla esta ecuación es valida, un sistema de tres ecuaciones es formado con "n" número de nodos en la malla. Las fuerzas de las barras y las coordenadas de los nodos de la forma son desconocidas. Para calcular la longitud de cada barra en tres dimensiones utilizamos el teorema de Pitágoras.</p>	$l_a = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2}$

Fuente: Computational Modelling of Lightweight structure. Formfinding and Load Analysis. By Drs. Dieter Ströbel and Peter Singer. Technet Gmgh. 2003

#### ANEXO 3. MÉTODO DE LA DENSIDAD DE FUERZAS

<p>Desde la ecuación de equilibrio de la malla y la ecuación de la longitud de la barra el resultado del sistema de ecuaciones es no lineal y <math>x,y,z</math> y <math>S</math> sólo pueden ser resueltos interactivamente, de acuerdo con el método matemático numérico. El valor de la coordenada puede ser producido por cálculo, en la ecuación de equilibrio la longitud y la fuerza están relacionadas y es definido como:</p>	$\frac{S_a}{l_a} = q_a, \frac{S_b}{l_b} = q_b, \text{ etc}$
<p>Donde “S” tiene un comportamiento de acuerdo a la ley lineal de esfuerzo-deformación (Ley de Hooke-1678) que establece la proporcionalidad entre las fuerzas y los desplazamientos aplicada a las relaciones entre las tensiones y las deformaciones en un punto de la barra y se puede calcular con la ecuación:</p>	$S_a = E \cdot A \cdot \frac{l_a - l_{0a}}{l_{0a}}$ <p>Donde:</p> <p><b>A:</b> Área de la sección transversal  <b>E:</b> Modulo de elasticidad  <b>l<sub>a</sub>:</b> Longitud inicial  <b>l<sub>0a</sub>:</b> Longitud final</p>
<p>Si se sustituye <math>S_a</math> por <math>q_a</math> y despejamos de la ecuación <math>l_{0a}</math> nos resulta:</p>	$l_{0a} = \frac{E \cdot A \cdot l_a}{q_a \cdot l_a + E \cdot A}$

La “densidad de la fuerza” es, entonces, una estrategia matemática para resolver la ecuación de equilibrio para cualquier malla balanceando el cociente de fuerza por la longitud formando, así, un sistema de ecuaciones compuesta por determinadas coordenadas de nodos desconocidos donde “q” es un valor constante en toda el interior malla y puede ser asumido como un calculo lineal.

En general se debe cumplir:

- 1.- La condición de equilibrio donde las fuerzas en cada nudo libre es cero
- 2.- El material se comporta de acuerdo a la ley de Hooke.
- 3.- La geometría esta en estado de deformación.

### **Análisis estructural para una carga externa**

Las variables desconocidas del sistema de ecuaciones de las extensiones o alargamiento de las barras son las coordenadas  $x,y,z$  y los valores de la densidad de la fuerza. Para asimilar el comportamiento de una superficie, el método de la densidad de la fuerza ha adquirido el elemento triangulo como unidad mínima, ya que éste toma en consideración el comportamiento del material de membrana que tienen una curva tensión-deformación independiente en las dos direcciones (trama y urdimbre), la cual es causada por el modulo de elasticidad y la tensión.

La tensión de corte depende de la rigidez pudiendo ser despreciables porque su valor es muy pequeño.

### **ANEXO 3. MÉTODO DE LA DENSIDAD DE FUERZAS**

Finalmente la estructura es calculada adoptando el sistema de ecuaciones del método de los elementos finitos, que en este caso es el método de los triángulos finitos, así tenemos la matriz

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1111} & e_{1122} & 0 & \epsilon_{xx} \\ e_{2211} & e_{2222} & 0 & \epsilon_{yy} \\ 0 & 0 & e_{1212} & \epsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

La urdimbre y de la trama son independientes y las tensiones son causadas solo por los respectivos módulos de elasticidad y la fuerza en cada una de las direcciones. Sin embargo, en la actualidad estas direcciones están relacionadas y dependen una de la otra, es por ello que la matriz considera las tensiones en los dos ejes principales  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  mas una tercera que las relaciona  $\sigma_{xy}$ .

Donde:

$\sigma_x$ : Tensión en los ejes x,y (urdimbre, trama)

e: módulo de elasticidad (urdimbre y trama)

$\epsilon_{xx}$ : fuerza en cada dirección

(1) Tomado de:

Ströbel Dieter, (. 2003), Computational modelling of Lightweight Structure. Formfing, load análisis and cutting Pattern generation

Technet Gmbh.Stuttgart

Lewis, W.J. .( 2003), Tension Structure, from and behaviour. Thomas Telfdor.London

Grüding Lothar, (2001) Formfinding of Textil Structure, Technet Gmbh, Berlin.

### ANEXO 3. MÉTODO DE LA DENSIDAD DE FUERZAS

## **ANEXO N° 4. La membrana textil**

La palabra latina membrana significa piel cuya característica más importante es su poco espesor. La tela como material de construcción está hecha de hilos que conforman un tejido de entramado ortogonal compuesto de trama y urdimbre que lo convierte en un material anisótropo. Estos hilos o filamentos poseen altas resistencias la cual dependerá de la separación entre los hilos, que varía según las exigencias de la carga de trabajo, del grosor del hilo y del giro entre las fibras y una matriz termoplástica flexible que tiene la función de proteger a los filamentos contra la abrasión, intemperie y rayos ultravioletas, tiene además la función de otorgar la estanqueidad a la membrana y conferir la propiedad de la termosoldabilidad del material para unir los paños de patrones, además pueden tener funciones extras como otorgar a la membranas pigmentación u protección para el polvo.

Para alcanzar el equilibrio estructural las membranas deben trabajar solamente a tracción constituyendo una superficie de membrana tensada que debe formar curvaturas en ambos sentidos, esta condición de la forma de la membrana obtenida por el proceso de la generación de la forma conocido como "form-finding" u obtención de la forma hace que la tensión en la superficie no sea constante, estando sus fibras más tensionadas en un sentido que en el otro, aunque las membranas obtenidos con pompas de jabón si son constantes. Una membrana tensionada entre bordes adopta una forma de silla de montar también llamada forma anticlástica.

Si las fibras de la urdimbre siguen la curvatura negativa, y las fibras de la trama, las curvaturas opuestas en positivo, la estructura resistirá cargas externas, tales como nieve, por un incremento en las fuerzas de tensión en la dirección de la curva en negativo y la correspondiente reducción en la dirección de la curva en positivo. Sin embargo, las diferencias en fuerzas en tensión producidas en los dos lados de fibras por cargas externas pueden ser notoriamente grandes. Hay que destacar que las cargas impuestas son temporales y, en su ausencia, la estructura diseñada como una superficie permanece en su óptimo estado de tensión uniforme

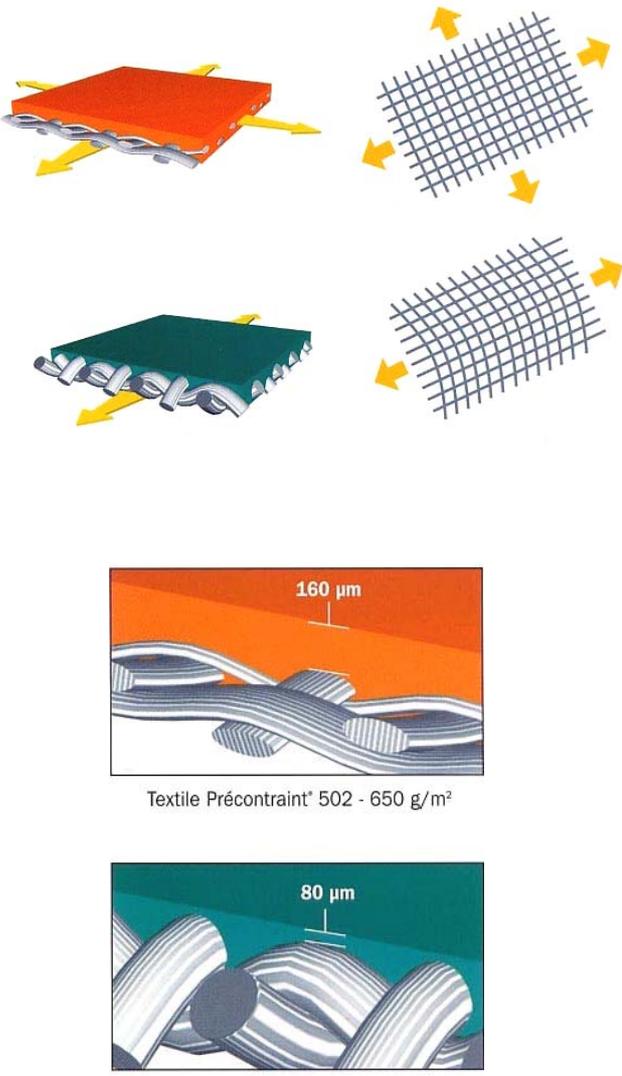
Cuando la tensión de las membranas se incrementan de manera desigual, las telas son propensas a un desgaste diferencial entre las fibras y a roturas tempranas, más que lo que podría haber ocurrido en una reducida o mas equitativa distribución de las tensiones, en general, la dirección de la trama es mas floja que la de la urdimbre.

La geometría de la estructura no es afectada por el peso de la tela, a menos que la superficie de la membrana sea plana, con lo cual las tensiones tenderán a ser infinitas. O que no tenga satisfactorios niveles de pretensión, con lo que puede aparecer el fenómeno del flameo y romper la membrana por desgarro. Los típicos valores de pretensión usados son: 1.5kN/m para PVC/poliéster, Y 2.5-4.5 Kn/m para PTFE.

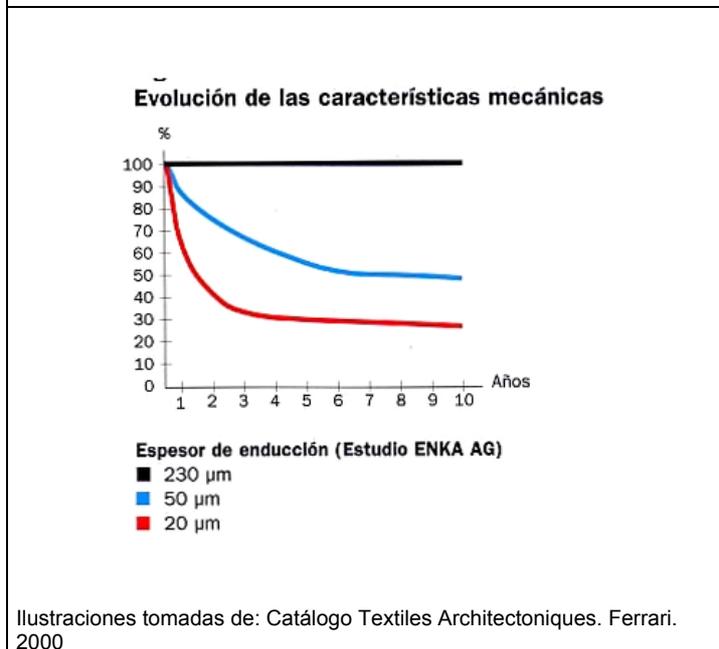
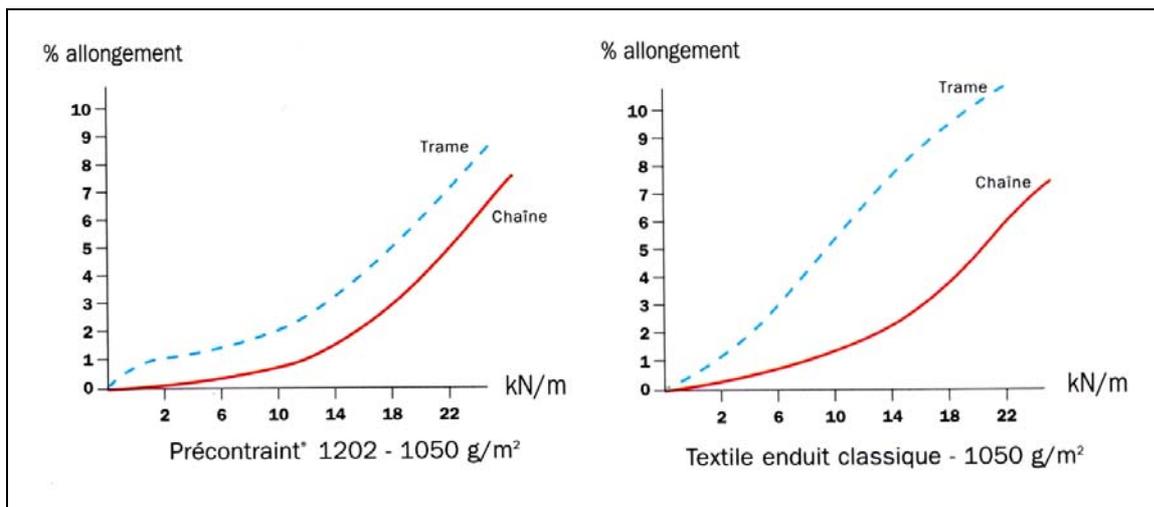
Teóricamente el peso de la tela podría ser modelado numéricamente por la asignación de propiedades elásticas, la forma encontrada (con tensiones iniciales) y cargando la estructura sólo con el peso de la tela, para predecir la forma inicial y la tensión, sin embargo, tal ejercicio podría demostrarse inútil debido a las grandes incertidumbres

### **ANEXO 4. MATERIALES TEXTILES**

en las propiedades de la tela. El peso de la tela es usualmente incluido en la fase de análisis estático, junto con otras cargas y coeficientes de seguridad.

Características de la tecnología Précontraint	
 <p data-bbox="359 1003 730 1211">160 µm Textile Précontraint* 502 - 650 g/m<sup>2</sup></p> <p data-bbox="359 1301 730 1512">80 µm Textile enduit classique - 650 g/m<sup>2</sup></p>	<p data-bbox="906 331 1327 1037">El pretensado en ambos sentidos de las fibras en el mismo nivel significa que las tensiones en la dirección de la trama están en mayor proporción de aquellas fibras de la urdimbre. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta el pretensado en un apropiado nivel. Pruebas biaxiales realizados en ejemplos de material anisótropo muestran que por el mismo valor de pretensado aplicado en las direcciones de la trama y la urdimbre, se obtienen diferentes niveles de estiramiento en sus respectivas direcciones y como consecuencia aparecen arrugas.</p> <p data-bbox="906 1070 1327 1373">La tecnología Précontraint de la empresa Ferrari consiste en pre-estirar los hilos correspondientes a la trama de tal manera que las curvas de tensión-deformación en ambos sentidos sean aproximadamente igual o semejantes.</p> <p data-bbox="906 1406 1327 1836">Para la protección de las fibras le es aplicado un revestimiento de plástico termoformado de PVC en ambas superficies de la tela, sobre este plástico se adiciona aditivos para retardar la llama de fuego, para evitar que el polvo polimerice con el plástico y envejezca la membrana o estabilizadores a los rayos UV. Los fabricantes aseguran una vida útil de 20 años.</p>

#### ANEXO 4. MATERIALES TEXTILES



Como resultado de este tratamiento se obtienen membranas con rigideces cercanas en ambas fibras de trama y urdimbre, la cual ayuda a mantener una distribución uniforme de la tensión durante el lapso de vida de la estructura

Otro factor a tener en cuenta es que las membranas sufren de distensión con el paso del tiempo, por lo que precisan de mecanismos para ir ajustando y recuperar la pretensión inicial

Ilustraciones tomadas de: Catálogo Textiles Architectoniques. Ferrari. 2000

Fuente: Catálogo de Ferrari

### Datos de resistencia:

Peso:	750 a 1500 grs.
Peso por m <sup>2</sup>	560 a 1500
Espeesor	Alrededor de 1mm
Resistencia a tracción	250 a 1000 daN/5 cm para la urdimbre 260 a 800 daN/5 cm para la trama
Resistencia al desgarro	25 a 160 daN para la urdimbre 20 a 140 daN para la trama
Adherencia	10 a 15 daN/5
Reacción al fuego	no propaga la llama
Temperatura máximas y mínimas	-30°C a +70°C

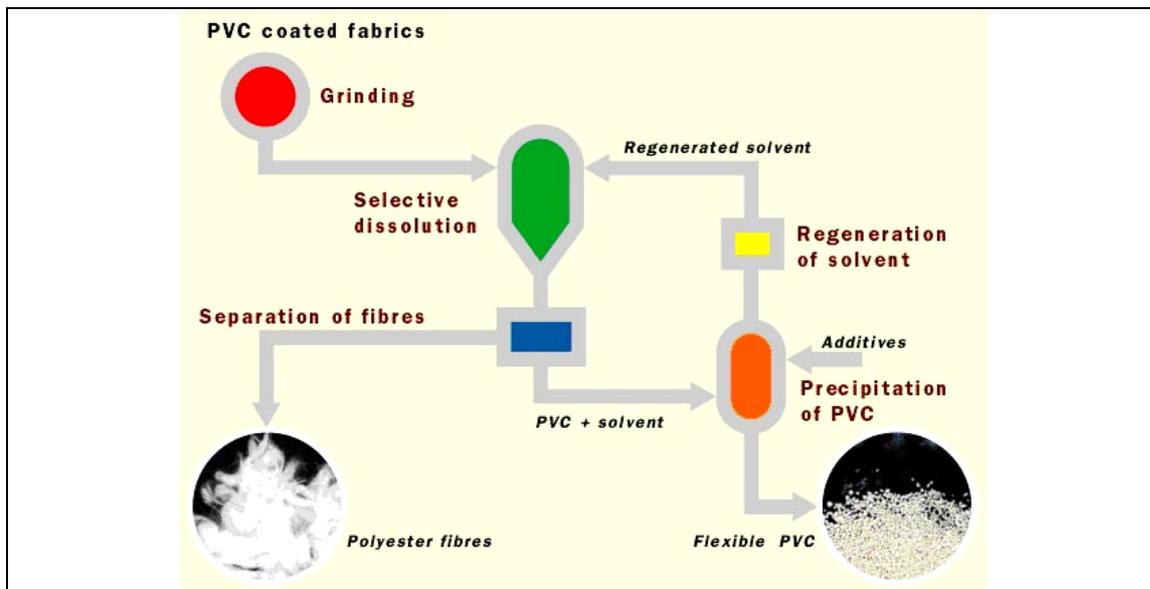
### ANEXO 4. MATERIALES TEXTILES

Desde el punto de vista constructivo la ventaja de las membranas radica en la translucidez o transparencia y en su coeficiente de transmisión de rayos UV que es mayor a la del vidrio. También se puede señalar la rapidez del montaje que las hace idóneas para su aplicación en edificaciones temporales o móviles.

Desde el punto de vista de su proceso constructivo las membranas tienen gran facilidad para su puesta en obra o su montaje debido a su bajo peso (aproximadamente entre 5 a 10 Kg/m<sup>2</sup>), las membranas son definidas como un producto industrial desde su fabricación como material hasta la confección y soldadura como cubierta, es decir, es una construcción totalmente pre-fabricada en taller. Entre sus desventajas podemos señalar que no proporcionan aislamiento térmico y acústico adecuados debido a su poco espesor.

### Reciclaje y ciclo de vida:

Al igual que los materiales plásticos las membranas textiles requieren de procesos de separación entre las fibras y el plástico protector para reciclarlas, tal y como se ve en el siguiente gráfico, donde se observa que se requiere de un solvente para este proceso de separación, primero se separan las fibras y quedan el solvente + el plástico PVC, éstos también tienen que separarse a través de un proceso de precipitación del plástico y el solvente es vuelto a utilizar para la misma función.



Fuente: Catálogo de Ferrari

## ANEXO 4. MATERIALES TEXTILES