



S  
A TENSIO-  
ESTRUCTURAS

## LAS TENSOESTRUCTURAS

Autor: Dr. Arq. Ramón Sastre.  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.

La palabra “tensoestructura” es una palabra inventada y quizá protegida, pero evidentemente tiene su raíz en Estructuras Tensadas, Estructuras Traccionadas, Estructuras Ligeras, Estructuras Textiles o Estructuras de Membrana, que son otras formas de denominar a una tipología arquitectónica que, si bien no se refiere siempre a exactamente lo mismo, nos lleva a un sistema constructivo cada vez más habitual.

Es muy común remontarse a siglos, o incluso milenios, para empezar a hacer un poco de historia de este sistema constructivo, pero la verdad es, lo que entendemos hoy en día por estructuras tensadas, empezó seriamente a mediados del siglo XX, tanto desde el punto de vista neumático (Walter Bird y otros) como colgante (Frei Otto y otros).

Entendemos por sistema constructivo la unión de materiales, técnicas y conocimientos necesarios para construir un cierto tipo de obras. En el caso que nos atañe, los materiales típicos son aquellos que soportan bien la tracción: cabos, cables, cintas, membranas,

films, etc. Las técnicas nos permiten la manipulación de estos elementos: terminales, tensores, patronaje, unión de patrones (cosido, soldadura...), etc. Finalmente, en cuanto al conocimiento, lo deberemos repartir entre la construcción (montajes muy rápidos comparados con la construcción tradicional) y el análisis estructural (cálculo no lineal, grandes deformaciones...).

### Los materiales

Empecemos nuestra observación por los materiales. Hemos dicho que usamos principalmente (pero no exclusivamente) elementos que soportan bien las tracciones. ¿Por qué? Sencillamente porque con las tracciones no tenemos pandeo, y si no hay pandeo, la longitud (esbeltez) no es ningún problema y por lo tanto en luces importantes vamos a conseguir utilizar elementos ligeros que no serían posibles bajo esfuerzos de compresión o flexión.

| Por qué tracción?                   |   |   |                                     |  |  |
|-------------------------------------|---|---|-------------------------------------|--|--|
|                                     |   |   |                                     |  |  |
| 1m de longitud<br>TRACCION          | 1m de longitud<br>COMPRESION            | 1m de longitud<br>FLEXION                   | 10m de longitud<br>TRACCION         | 10m de longitud<br>COMPRESION            | 10m de longitud<br>FLEXION                 |
| CABLE diám.=6mm<br>Seccion=0,21 cm2 | TUBO CIRCULAR Ø40.2<br>Seccion=2,39 cm2 | TUBO RECTANGULAR 30x60x4<br>Seccion=6,01cm2 | CABLE diám.=6mm<br>Seccion=0,21 cm2 | TUBO CIRCULAR Ø200.5<br>Seccion=30,63cm2 | TUBO RECTANGULAR 80x160x4<br>Seccion=18cm2 |

SECCIONES NECESARIAS SEGÚN EL TIPO DE ESFUERZO

Por ejemplo, podemos comparativamente apreciar que, para soportar una carga de 1000 kg, la sección de acero necesaria es mucho menor si la pieza es solicitada a tracción, frente a lo requerido por compresión o por flexión. Esa ventaja aumenta con la longitud del elemento, por lo tanto, cuando se trata de cubrir grandes luces, la tracción emerge como el tipo de esfuerzo más interesante.

Si pensamos en elementos lineales, el cable es el elemento más común. Un cable es un elemento formado por uno o más cordones. Cada cordón se constituye por un conjunto de alambres finos arrollados. Los cordones, a la vez, se enrollan alrededor de un centro, generalmente de otro material más flexible, que conforma el alma. En arquitectura, el cable más habitual es el cable de acero, con alambres de acero inoxidable, o de acero galvanizado, según la necesidad de protección de los mismos frente a las agresiones del medio ambiente. Con el uso de programas de cálculo específicos, como por ejemplo el Win Tess, estas características pueden

asignarse a los distintos elementos modelados, seleccionándolos de la base de datos del software o bien, creando nuevos materiales con propiedades específicas si fuera necesario.

Manipular cables no es sencillo y normalmente implica el uso de guantes para protegerse las manos. Por ello como alternativa existe la cinta de carga (“webbing”) que es una cinta formada por hilos, habitualmente de fibras sintéticas (nylon, poliéster...). Estas cintas (parecidas a los cinturones de seguridad de un automóvil) son más fácilmente manipulables (plegado, sin guantes...) por lo que algunas veces son una alternativa interesante a los cables de acero, que también pueden seleccionarse de las bases de datos de los diferentes softwares o, en su defecto, definir nuevas, como en el caso de los cables.

Generación de Cables

Tipo de cable

Cable  
 Cinta de carga  
 Barra circular

Ø 14  
 Sección 117.0

Material: Acero galvanizado 1x19  
 Acero inoxidable 1441.5  
 Otros Carga Rottura 15.30 t  
 Densidad 7.85

Código: Ø14GALV(1x19)  
 Al principio de la base de datos  
 Al final de la base de datos

Cancelar Guardar en la base de datos

MATERIALES PARA ELEMENTOS A TRACCIÓN: CABLES DE ACERO (BASE DE DATOS SOFTWARE WIN TESS)

Generación de Cables

Tipo de cable

Cable  
 Cinta de carga  
 Barra circular

Ancho 50  
 Grosor 5  
 Sección 250.0

Material: Poliéster  
 Nylon 29.0  
 Otros Carga Rottura 19.60 t  
 Densidad 1.3

Código: WEB50x5POLVE  
 Al principio de la base de datos  
 Al final de la base de datos

Cancelar Guardar en la base de datos

MATERIALES PARA ELEMENTOS A TRACCIÓN: CINTAS DE CARGA (BASE DE DATOS SOFTWARE WIN TESS)

Generación de Cables

Tipo de cable

Cable  
 Cinta de carga  
 Barra circular

Ø 14  
 Sección 153.9

Material: Acero galvanizado S355  
 Acero inoxidable 2100.0  
 Otros Carga Rottura 5.46 t  
 Densidad 7.85

Código: Ø14GALV(S355)  
 Al principio de la base de datos  
 Al final de la base de datos

Cancelar Guardar en la base de datos

MATERIALES PARA ELEMENTOS A TRACCIÓN: BARRAS CIRCULARES (BASE DE DATOS SOFTWARE WIN TESS)

Para elementos a tracción cortos se pueden usar barras de acero. Las propiedades a estos elementos pueden asignarse de igual manera que para el caso de cables o cintas de carga, usando bases de datos disponibles en los softwares o definiendo nuevas propiedades.

Estas barras circulares son mucho más económicas que los cables, pero será necesario el cuidado en el transporte de las piezas y en la ejecución para evitar deformaciones en las mismas y garantizar su correcto desempeño como tensor.

Para cualquiera de los materiales usados en estos elementos sometidos a tracción, hay que pensar en los terminales, es decir, en las piezas que los conectan con el resto de la estructura. Habitualmente se usan piezas que provienen de la industria y de su correcta elección dependerá la calidad final de la estructura tensada.

Si hablamos de superficies tensadas nos referiremos a aquellas fabricadas con membranas, es decir elementos de poquísimo espesor y de gran resistencia a la tracción. Estas membranas textiles, conformadas por una base de tejido, son ortótropicas (tienen dos ejes ortogonales entre sí) ya que sus propiedades mecánicas son, en general, diferentes en las direcciones de cada uno de esos ejes.

Un tejido es una superficie conseguida con la intersección de unos hilos (urdimbre y trama) entrelazados. Desde siempre se han usado tejidos de fibras naturales como lino, algodón, seda, lana, entre otros, consiguiendo la unión entre tejidos mediante el cosido con un hilo habitualmente del mismo material. Con la aparición de los plásticos y las fibras sintéticas, surgieron los tejidos sintéticos. Sin embargo, estos tejidos compuestos por un entrelazado de hilos (urdimbre y trama), al igual que los de fibras naturales, no son impermeables. Es por ello, que se empezaron a fabricar tejidos

sintéticos recubiertos, habitualmente por otra capa de material sintético que, además de dar color y textura a la membrana, garantiza la estanqueidad.

Dicho esto, podemos imaginar que existen infinidad de membranas, según el tipo de material usado para los hilos del tejido y para el recubrimiento. Sin embargo, la realidad es muy distinta, ya que la inmensa mayoría de las membranas utilizadas hoy en día en este sistema constructivo son de hilos de poliéster de alta resistencia o de hilos de fibra de vidrio (que no son un plástico), y el recubrimiento de dichos tejidos es de PVC en el primer caso y de PTFE (Teflón) en el segundo. Por supuesto que existen otras posibilidades: hilos de polietileno, hilos de teflón y recubrimientos de silicona u otros plásticos, pero, realmente tienen una incidencia mucho menor en el mercado.

### Las técnicas

Hablar de técnicas es hablar de construcción y montaje. Y automáticamente aparece en este proceso un participante al que no estábamos acostumbrados: el fabricante de estructuras tensadas. No se trata del típico fabricante de estructuras de acero (cables) o de toldos (membranas), ya que en ambos casos nos estamos refiriendo a un tipo de construcción habitual, y ahora nos enfrentamos a un tipo nuevo. Se trata de un fabricante de estructuras que va a tener que combinar las tecnologías de la construcción y de la producción industrial, aplicadas a la arquitectura.

Entre las especialidades de este nuevo tipo de fabricante estarán, la elaboración de terminales, uniones y detalles de los anclajes de las estructuras tensadas (por un lado) y la confección de membranas (toldos, carpas, velas...), que no son planas sino alabeadas, lo cual implica trabajar con un patronaje no rectangular (que incluye el diseño de estos patrones) y dominar las diferentes técnicas de

unión: cosido, soldadura o encolado.

### Los conocimientos

En la actualidad, el uso de las computadoras hace posible casi todo lo imaginado en diversos campos: fotografía, música, cine, cocina, medicina y, también en arquitectura. El software y hardware utilizado está en continua evolución, corriendo la barrera del conocimiento y ampliando las posibilidades de materialización para las tensoestructuras. Actualmente, si pensamos en el diseño y ejecución de estructuras tensadas, no referimos a algún tipo de software y quizás a algún tipo de hardware, aunque, en el principio (ya hemos comentado que nos remontamos a mediados siglo XX) no existían tales herramientas aplicadas a esta tipología estructural. Una búsqueda a través de internet, realizada en 2017, arrojó un importante número de softwares aplicados al diseño, cálculo y fabricación de las tensoestructuras. La lista a continuación nos permite tener una idea de la cantidad y tipos de programas existentes, aunque seguramente hoy existan muchos más.

#### Dlupal

RF-FORM-FINDING for RFEM. Programa para la Búsqueda de la forma y Cálculo de cables y estructuras de membrana.

#### Easy

Diseño de estructuras ligeras.

#### Ferrari Sketch

SketchUp plugin para la búsqueda de la forma por Serge Ferrari.

#### Formfinder

Formfinder es un programa de diseño fácil de manipular.

### **Forten-ixCube**

Diseño de estructuras tensadas, cálculo y sistema de fabricación.

### **K3-Tent**

K3-Tent CAD/CAM. Diseño de estructuras para carpas.

### **Meliar MPanel**

Plugin para AutoCad, Rhinoceros o DesignCad 3D.

### **Membrane NDN**

Programa de EF diseñado específicamente para profesionales en ingeniería de membranas tensadas.

### **Membranes24**

Búsqueda de la forma de estructuras de membrana, online con solo unos clics.

### **Oasys GSA**

Búsqueda de la forma y cálculo de estructuras textiles.

### **Paterner**

Patronajes para Windows. Es una potente colección de herramientas para trabajar con superficies de malla en 3D.

### **SOFiSTiK**

Estructuras ligeras. Suite completa.

### **TensileDraw**

Paquete plugin integrado, compatible con Rhino y AutoCad, autor Mehler TensileDraw.

### **Tentnology CAE**

Ingeniería CAD. Programa de estructuras textiles para PC.

### **Tess3D**

Kurvenbau: Estructuras ligeras. Programa de diseño.

### **WinFabric**

(Ingeniería Multimedia) Diseño de membranas tensadas y Sistema de fabricación.

### **Win Tess**

Software para la búsqueda de forma, cálculo y patronaje.

En este contexto, se presenta el programa "Win Tess," de mi autoría, sobre el que se mostrarán imágenes de su aplicación para el diseño de una tensoestructura.

Vamos por partes. ¿Para qué nos sirve un software? En principio, esta herramienta puede servir para cualquier operación de diseño y ejecución de las estructuras tensadas. En este contexto, desde principios del siglo XXI, se evidencia su uso principalmente en tres etapas o fases del proceso que afectan directamente a diferentes participantes en su diseño y producción:

#### 1. Búsqueda de la forma:

Es la labor principal del diseñador, habitualmente un arquitecto. Ya comentamos que no todas las formas son posibles para una estructura tensada, y aunque sean posibles, no todas son óptimas o recomendables.

¿Qué significa buscar la forma? ¿Por qué decimos que no todas las formas son recomendables? En primer lugar, hay un tema físico. La forma debe ser estable, de manera que la membrana pueda mantener su geometría invariable para su peso propio. Si la membrana ni siquiera es capaz de soportarse a sí misma en una posición determinada, es evidente que la forma estructural no será

aceptable.

Asimismo, se pueden aplicar otras consideraciones como, por ejemplo, ausencia de arrugas en la superficie de la membrana, que no tenga deformaciones excesivas frente a cargas variables como las producidas por acción del viento, que no produzca efectos de fatiga en los elementos estructurales, etc.

Por todo ello, se necesita que la membrana esté sometida a un esfuerzo de tracción inicial en toda su superficie. De esa forma evitará arrugas, se moverá poco, será capaz de mantenerse estable aún frente a cargas que tiendan a crear compresiones, etc.

A lo largo de la historia de estas estructuras, se han utilizado diversos métodos para encontrar formas eficientes de doble curvatura. Podemos considerar los siguientes:

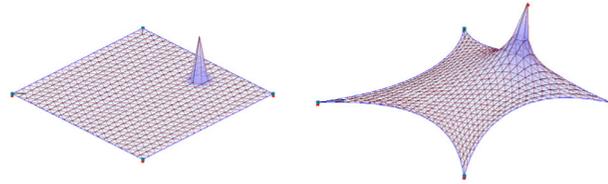
- Geometría conocida: esferas, cilindros, conos, etc. Estas formas tienen una cierta curvatura, en algunos casos doble curvatura y podemos estudiarlas y construirlas fácilmente ya que conocemos perfectamente sus características geométricas.
- Superficies regladas: superficies de doble curvatura anticlásticas, desarrollables a partir de líneas rectas. Son utilizadas en el mundo de la edificación por posibilitar la construcción de los encofrados con tablas de madera, para cáscaras delgadas de hormigón (superficies de compresión dominante, como las que construyó Félix Candela). Estas geometrías complejas pueden representarse con un software como el CAD, y de la misma manera que en el caso anterior, al conocer su geometría, son fáciles de diseñar y calcular.
- Modelos o maquetas a partir de telas elásticas (lycra): la producción de maquetas sigue siendo una de las formas más adecuadas para buscar la forma, ya que podemos intuir el comportamiento estructural del modelo. Estos modelos también permiten tener una imagen bastante precisa de las formas proyectadas, tanto para el diseñador como para el cliente.
- Pompas de jabón: método usado por el gran investigador Frei Otto. La película de agua jabonosa se adapta inmediatamente a un borde

rígido (alambre, por ejemplo) produciendo una superficie mínima de tensión uniforme. El inconveniente más claro es que se obtienen formas efímeras y difíciles de relevar y transcribir al papel para poder diseñarlas y calcularlas.

- Simulación informática: actualmente se ha generalizado el uso de herramientas computacionales, y existen diferentes métodos informatizados para generar la forma de las tensoestructuras. En general una membrana se representa como una malla. La malla está formada por barras y nudos, pero su imagen es la de una superficie. Entre estos métodos se pueden mencionar:
  - o Método de densidad de fuerza: se basa en encontrar la posición de la malla suponiendo que permanecerá en equilibrio si cada barra está sometida a una fuerza de tracción igual a su longitud. Para los bordes se supone que la fuerza se multiplica por un factor determinado (de hecho, podemos aplicar este factor a cualquier barra). De ahí el nombre de "densidad" de fuerza. Este método supone la resolución de un sistema de ecuaciones (o si se quiere de tres sistemas independientes: X, Y y Z) por lo que habitualmente se recurre a algún método matricial para resolverlo. Ello nos indica que la magnitud del problema (muy importante en cuanto al tiempo necesario como a la memoria requerida en la computadora) es proporcional al cuadrado del número de nudos.
  - o Métodos de relajación dinámica: se han popularizado mucho en este ámbito ya que, al ser iterativos, permiten análisis no lineales sin ningún esfuerzo añadido. Existen diferentes tipos de relajación, pero se utilizan tanto en la búsqueda de la forma como en el cálculo final de estas estructuras. Otra ventaja de estos métodos es que la magnitud del problema es proporcional al número de nudos, no al cuadrado como pasaba en el caso anterior, si bien en aquel caso solamente había que desarrollar el cálculo una sola vez (por no ser iterativo). El funcionamiento de estos métodos numéricos (simulación informática) suele ser muy parecido al método de creación de

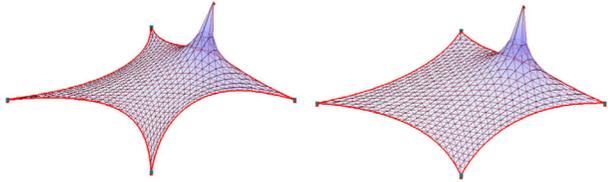
formas mediante telas deformables (tipo lycra):

- La primera acción es mover un punto y ver como la malla se mueve a causa de ese desplazamiento. Al levantar un punto, toda la membrana se adapta y los bordes libres quedan formando una concavidad debido a la tensión de la membrana perpendicular al borde.



BÚSQUEDA DE LA FORMA: ADECUACIÓN DE LA MALLA A UN DESPLAZAMIENTO INICIAL (SOFTWARE WIN TESS).

- La segunda acción típica consiste en ajustar la concavidad de los bordes. Con la densidad de fuerza, podemos modificar el factor de las barras de borde (de todos los bordes o solamente de uno) y así ajustar dicha concavidad, obteniendo diferentes formas. Hay que tener en cuenta que en cada paso no cambia solamente el borde afectado sino la totalidad de la membrana, aunque esto se note poco.



BÚSQUEDA DE LA FORMA: AJUSTES MODIFICANDO LA RIGIDEZ DE LAS BARRAS DE BORDE O RELINGAS (SOFTWARE WIN TESS)

Estas dos acciones son las más comunes y todos los softwares las contemplan. A partir de allí existen diferentes posibilidades de modificar la forma de la membrana, modificando el factor de la densidad de forma de las barras de forma particular, o modificando la posición de ciertos puntos para conseguir la forma deseada. Cada programa tendrá diferentes opciones para poder realizar estas tareas de forma automática y rápida.

## 2. Análisis estructural (cálculo)

Como cualquier estructura, las tensoestructuras deben cumplir con las normativas existentes (si las hay), o por lo menos, cumplir con los requisitos mínimos: que sea estable, que soporte los esfuerzos (es decir, que no se rompa) y que tenga deformaciones admisibles (es decir, que no se deforme demasiado, teniendo en cuenta para lo que sirve y lo que tiene alrededor). Esta es una labor que compete al analista de estructuras: un ingeniero o un arquitecto especialista en estructuras.

Al hablar de la búsqueda de la forma, ya hemos comentado la existencia de los métodos de relajación dinámica, los cuales nos permiten no solamente buscar formas, sino también calcularlas. Cualquiera sea el método usado para el cálculo de una estructura tensada, existen una serie de consideraciones comunes que vamos a analizar a continuación:

- El cálculo de una estructura tensada debe ser NO LINEAL. ¿Por qué decimos que debe ser no lineal? Porque los elementos típicos de estas estructuras (cables y membranas) no pueden soportar otros esfuerzos que no sean de tracción. Entonces, si al analizar la estructura uno de estos elementos resulta trabajando a compresión, el mismo se elimina del modelado y es necesario volver a calcular la estructura sin ese elemento. Además de esta razón, que es básica, existen otras causas que pueden demandar un análisis no lineal:

- o Grandes desplazamientos y rotaciones que pueden provocar grandes deformaciones de los elementos analizados: ya sean barras o elementos finitos. Cuando las deformaciones son importantes en función de las dimensiones de la estructura, los resultados no son proporcionales a las acciones y, por lo tanto, este es un ejemplo típico de cálculo no lineal.

- o Las acciones pueden variar si la geometría de la estructura cambia significativamente. Principalmente el viento y la nieve, pero también otros tipos de carga que pueden afectar a la estructura.
- o El comportamiento de los materiales (su módulo de elasticidad) no es constante, sino que varía en función de las tensiones, que a su vez dependen de las deformaciones antes comentadas.

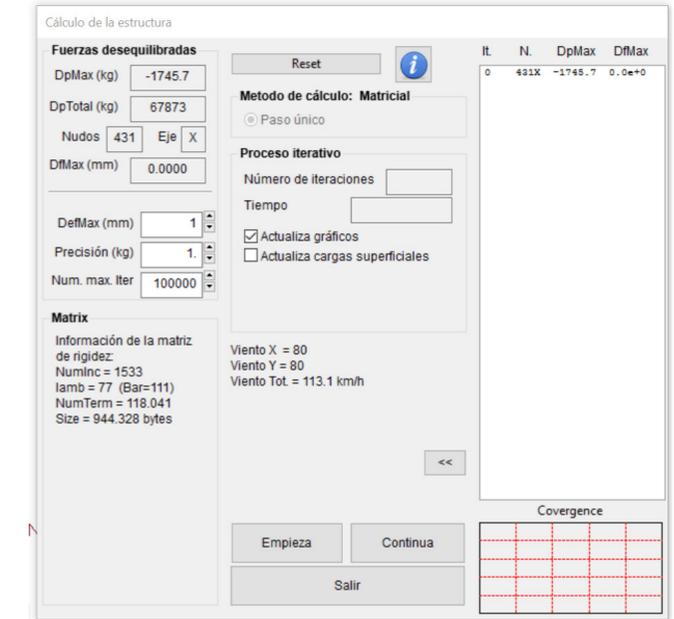
En su mayoría, los programas de cálculo no lineal son de dos tipos:

- De relajación (la más habitual es la relajación dinámica): En este método se realiza la resolución de ecuaciones no lineales por una iteración con pasos que nos van acercando al equilibrio. Si definimos una cierta precisión, cuando el error es menor que dicha precisión diremos que la estructura ha encontrado el equilibrio y está calculada.

- Método matricial: Se monta un sistema de ecuaciones de equilibrio a partir de la geometría inicial y las características mecánicas de los elementos usados (barras o EF {elementos finitos}). Conocido el sistema de ecuaciones, se resuelve por algún método matricial y se comprueba el equilibrio con la geometría hallada tras el primer cálculo. Este proceso matricial se repite tantas veces como haga falta hasta hallar el equilibrio (nuevamente, hasta que el error sea menor que la precisión que hayamos adoptado). Las diferentes técnicas para que este proceso de convergencia sea lo más breve posible, caracterizan a los diferentes programas que están actualmente en uso.

Todos estos conceptos constituyen las variables de cálculo de un

software para este tipo de estructuras, como por ejemplo el Win Tess.



RESOLUCIÓN DE LA ESTRUCTURA (SOFTWARE WIN TESS)

Finalmente, una vez hallado el equilibrio, hace falta comprobar que la estructura sea la adecuada. Para eso debe verificarse que las tensiones en la membrana no superen las admisibles (afectadas de los correspondientes coeficientes de seguridad) y que las deformaciones también sean inferiores a las admisibles.

Se podrían efectuar muchas reflexiones acerca de estos dos puntos, pero vamos a comentar solamente dos:

- Los coeficientes de seguridad se agrupan en coeficientes de mayoración, que aplicamos a las acciones, y coeficientes de minoración, que aplicamos a la resistencia de los materiales. En el cálculo de estructuras tradicionales, las acciones son proporcionales a los resultados, por lo que podemos aplicar directamente unos coeficientes que son el producto de ambos. En el cálculo no lineal, en cambio, eso no es posible, y hay que tener mucho cuidado en cómo se aplica este concepto en las combinaciones de acciones. No solamente el hecho de combinar cargas de nieve con cargas de succión de viento es desaconsejable, porque se podrían compensar mutuamente (tal como sucedería con cualquier tipo de edificio), sino que antes de realizar una combinación de hipótesis de carga, deberemos haber realizado los distintos cálculos, por separado, con las distintas cargas agrupadas o individuales. En cada uno de estos casos se aplicarán a las cargas unos coeficientes de seguridad diferentes, según las combinaciones. Win Tess da la opción al usuario de escoger qué coeficientes de seguridad se van a aplicar en cada caso.

| Coeficientes de seguridad                                  |   |
|--|---|
| CARGAS   | MATERIAL  |
| Peso propio <input type="text" value="1"/>                 | Membrana <input type="text" value="5"/>   |
| Viento <input type="text" value="1"/>                      | Cables <input type="text" value="3"/>   |
| Nieve <input type="text" value="1"/>                       | Tubos <input type="text" value="1.65"/>   |
| Presión interna <input type="text" value="1"/>             |   |
| Pretensado & Térmico <input type="text" value="1"/>        |  |
| <input type="button" value="Aplicar valores por defecto"/> |   |
| <input type="button" value="Cancelar"/>                    | <input type="button" value="Aceptar"/>  |

DEFINICIÓN DE COEFICIENTES DE SEGURIDAD SEGÚN TIPO DE CARGAS Y MATERIALES (SOFTWARE WIN TESS)

- Las estructuras de membrana se construyen dotando a la misma de una fuerza de pretensado. Teniendo en cuenta que las membranas solamente pueden soportar tracciones, si la sometemos a un estado previo de tracción, cuando aparezcan los esfuerzos producidos por las acciones exteriores (nieve, viento, etc.), si estos son de compresión, se verán compensados por la tracción del pretensado y, probablemente, la membrana seguirá sometida a tracción. Sin embargo, es posible que debido a las acciones exteriores, la membrana esté sometida a esfuerzos de tracción. En este caso la tracción previa del pretensado lo único que hará será aumentar dicho esfuerzo, y la resistencia de la membrana se verá comprometida antes de lo esperado. Ésta es la razón por la cual hay que usar esfuerzos de pretensado que provoquen tensiones de tracción que no comprometan la resistencia de la membrana.

- Los desplazamientos y giros de las tensoestructuras pueden ser muy grandes, sin producir grandes deformaciones globales en la estructura y, consecuentemente, grandes tensiones. Por lo tanto, tendremos que aceptar desplazamientos que consideraríamos excesivos en otras circunstancias. Es importante destacar en este sentido, que las consecuencias en la propia construcción también serán mucho menores. Por ejemplo, un asentamiento de 1 cm, puede provocar enormes grietas o fisuras en un edificio convencional, mientras que en una tensoestructura puede pasar completamente desapercibido.

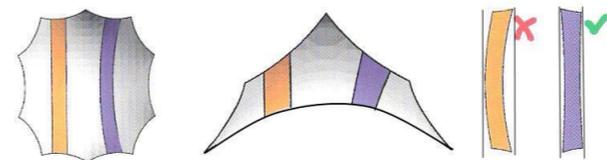
### 3. Patronaje.

Una de las tareas más importantes para los fabricantes de este tipo de estructuras es confeccionar una membrana de formas no planas (sinclásticas o anticlásticas), mediante el patronaje o desarrollo de moldes para el corte y posterior unión de las telas. Existen diferentes maneras de crear estos patrones, pero

actualmente está generalizado el uso de métodos informatizados. Cabe destacar que, en épocas previas al uso de herramientas computacionales, para la materialización de estas membranas se trabajaba con maquetas rígidas a escala reducida para definir patrones que luego se transformaban a escala real, aplicando fórmulas conocidas para formas geométricas regulares o mediante el uso de pompas de jabón y fotografías (esta última modalidad poco usada por su complejidad de realización).

Esta etapa en el proceso, afecta directamente al fabricante y al diseñador, sobre todo, cuando los patrones son visibles (por la translucidez o la diferencia de color, que pone en evidencia la unión entre las diferentes piezas y puede utilizarse como recurso de diseño para definir un ritmo o textura superficial). El diseño de los patrones no afecta en forma significativa al cálculo, aunque determinados estudios teóricos mencionan la importancia de las uniones de los patrones en el comportamiento estructural de las membranas.

En muchos textos sobre el patronaje se dice que dichos patrones deben realizarse a partir de líneas geodésicas. Creemos que esta aseveración es falsa. En realidad, un patrón puede generarse con la forma que se desee, a partir de la malla que simula la superficie. Si el patronaje va a ser muy visible, como en el caso de patrones de diferente color, la forma de los mismos es también fundamental en el diseño de la tensoestructura. Sin embargo, si los patrones son todos del mismo tipo y color de membrana textil, lo más habitual es que se usen líneas geodésicas para crear patrones entre ellas.



PATRONAJE DE UNA MEMBRANA (SOFTWARE WIN TESS)

Si analizamos dos patrones diferentes para la misma forma geométrica de doble curvatura podemos deducir lo siguiente: el patrón de color naranja fue creado entre dos líneas que en planta son paralelas y se han obtenido con la intersección de un plano vertical y la superficie de la membrana. El patrón queda muy ordenado en planta y alzado, pero, al cortar la tela, tendrá forma arqueada (de "banana") y generará mucho desperdicio de material. El patrón de color azul fue creado entre dos líneas geodésicas que parecen paralelas en planta, pero no tienen por qué serlo en absoluto. En alzado tienen un aspecto que nos recuerda a una disposición geométrica radial, pero lo más importante es que al cortar el patrón, este es recto y no se va a desperdiciar tanto material.

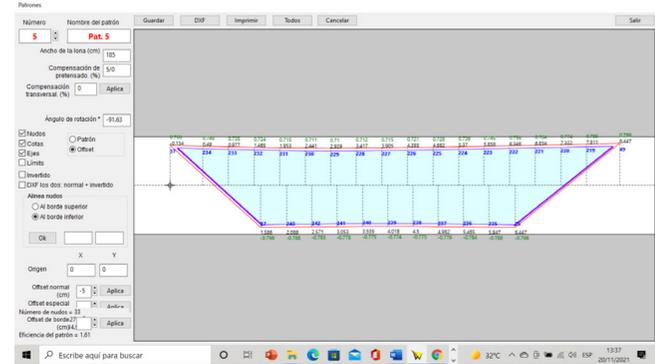
Las líneas geodésicas son líneas que unen dos puntos de una superficie alabeada por el camino más corto. En realidad, eso es una consecuencia, pero es la forma habitual de crear estas líneas geodésicas con un software, como el programa Win Tess. Matemáticamente, una línea geodésica es aquella en que la normal a la curva coincide siempre con la normal a la superficie.



PROCESO DE UNIÓN SOLDADA DE LA TELA CON CUÑA CALIENTE

Uno de los aspectos más importantes que se deben considerar en la creación de un patronaje es la creación de un "offset"; para cualquier método de unión de patrones: cosido, soldado o encolado. Un "offset" es una banda que se deja en el perímetro del patrón o molde, para poder unirlo con el siguiente sin pérdida de tamaño. En la fotografía es posible ver como dos operarios preparan la unión soldada de dos patrones, superponiendo una banda de tela que en realidad es el doble del offset, ya que el borde teórico del patrón pasa por el medio de la soldadura.

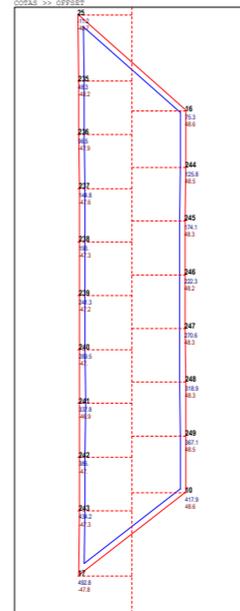
En una tensoestructura podemos tener diferentes tamaños de "offset", en función del tipo y destino de la unión: para unir patrones por soldadura, para realizar un dobladillo perimetral que contenga un cable perimetral de relinga, para realizar un "keder" o refuerzo de borde, para esconder un detalle constructivo, etc.



PATRONAJE DE UNA MEMBRANA (SOFTWARE WIN TESS)

Con el programa Win Tess se puede también obtener el "offset" de un patrón, donde, la banda perimetral puede tener una medida

constante, por ejemplo de 5 cm. De la misma manera, el programa nos permite usar valores distintos en las zonas perimetrales de la membrana donde muchas veces encontramos una relinga o valores especiales que el usuario defina según su necesidad. Otro aspecto importante es el corte de estos patrones, que puede realizarse de forma manual o mediante una máquina de corte automática (CAM) conectada a una computadora (CAD). En el primer caso será necesario tener una salida por impresora de cada patrón.



PATRONAJE: SALIDA DE IMPRESORA POR PATRÓN (SOFTWARE WIN TESS)

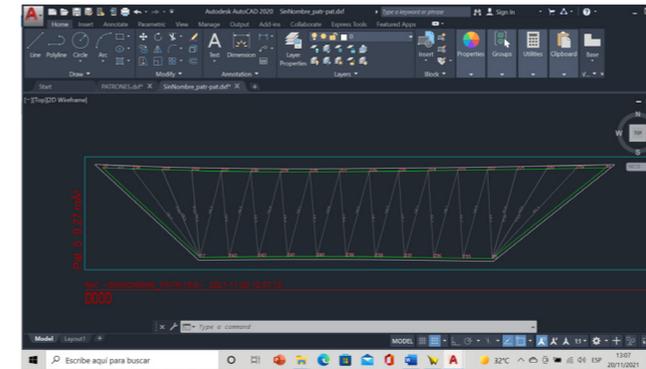
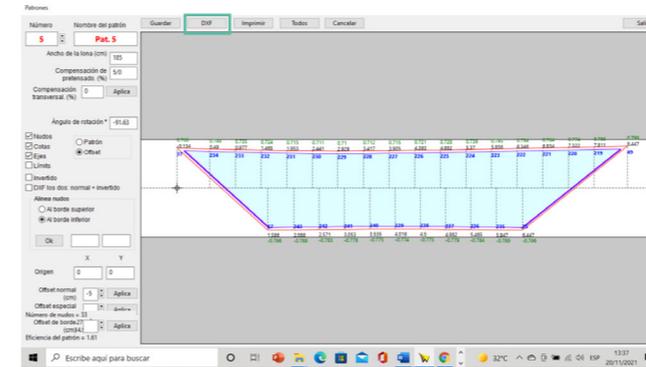
### Pat. 4

DDDD  
C:\Users\cesar\Desktop\tenso\rel\win\_tess\GrafNombre\_pat.4

| Nodos |             | Zonas  |        |        |       |
|-------|-------------|--------|--------|--------|-------|
| Id    | Coordenadas | X (m)  | Y (m)  | X (m)  | Y (m) |
| 25    | 0,000       | -0,436 | -0,112 | -0,487 |       |
| 235   | 0,483       | -0,436 | 0,483  | -0,487 |       |
| 16    | 0,773       | -0,436 | 0,773  | 0,486  |       |
| 236   | 0,965       | -0,429 | 0,965  | -0,479 |       |
| 244   | 1,258       | -0,430 | 1,258  | 0,485  |       |
| 237   | 1,448       | -0,426 | 1,448  | -0,476 |       |
| 245   | 1,741       | -0,433 | 1,741  | 0,483  |       |
| 238   | 1,930       | -0,423 | 1,930  | -0,473 |       |
| 246   | 2,223       | -0,432 | 2,223  | 0,482  |       |
| 239   | 2,413       | -0,422 | 2,413  | -0,472 |       |
| 247   | 2,706       | -0,433 | 2,706  | 0,483  |       |
| 240   | 2,895       | -0,420 | 2,895  | -0,470 |       |
| 248   | 3,189       | -0,433 | 3,189  | 0,483  |       |
| 241   | 3,378       | -0,419 | 3,378  | -0,469 |       |
| 249   | 3,672       | -0,430 | 3,672  | 0,480  |       |
| 242   | 3,862       | -0,420 | 3,862  | -0,470 |       |
| 10    | 4,154       | -0,436 | 4,154  | 0,486  |       |
| 243   | 4,343       | -0,423 | 4,343  | -0,473 |       |
| 17    | 4,825       | -0,427 | 4,825  | -0,478 |       |

WinTess ©  
Copyright R. Sastre & X. Giménez: 1993-2021  
(v. 3.16517)

En el segundo caso, la salida se realiza a través de un archivo de transferencia, entre los cuales el más habitual es el que tiene extensión DXF.



PATRONAJE: SALIDA A ARCHIVO DXF (SOFTWARE WIN TESS)

### Conclusiones

De todo lo expuesto en este texto se pueden sacar diferentes conclusiones, pero pensamos que lo más interesante es comentar aquellas que son exclusivas de las estructuras tensadas.

En primer lugar, y no podía ser de otra forma, hay que hablar de la búsqueda de la forma. A diferencia del resto de las estructuras (y por lo tanto del resto de las edificaciones), una tensoestructura está formada por elementos incapaces de soportar otra sollicitación que no sea tracción. Por lo tanto, la posición de cada elemento debe propiciar el equilibrio con las fuerzas existentes en el momento de ejecución, que serán el peso propio y el pretensado que pueda haberse aplicado. Si no es así, o habrá arrugas en la membrana, o simplemente la estructura no estará en equilibrio y los elementos no se mantendrán en la posición diseñada.

Es tan sencillo como aseverar que un cable no podrá mantenerse nunca completamente horizontal. Al tener peso propio, el cable adoptará la forma de la catenaria. Para que permanezca completamente horizontal, sería necesario imprimir un pretensado de magnitud infinita, y esto obviamente es imposible. Lo que sí podemos decir es que, para conseguir un cable de geometría recta, debemos aplicar una tensión significativa, que en los extremos se traducirá en una fuerza de enorme magnitud. A partir de este concepto, se puede entender la importancia en la búsqueda de la forma inicial, las complicaciones que pueden surgir de un diseño inadecuado, y por qué es tan habitual disponer de geometrías con grandes curvaturas.

La ejecución o montaje de estas estructuras tiene también su importancia. Normalmente, las estructuras tensadas son vulnerables al viento en la fase de montaje, cuando aún no se ha aplicado ningún pretensado. Es por ello que, habitualmente el periodo de montaje de cada elemento principal de una estructura deberá ser muy corto y resulta necesaria una adecuada programación de esta

etapa, para evitar demoras.

Las tensoestructuras suelen tener grandes desplazamientos y giros (no siempre grandes deformaciones), por lo que un análisis no lineal es imprescindible. Ello afecta al valor que se da a los coeficientes de seguridad y al método de cálculo. Los desplazamientos de anclajes y cimentaciones, que en una estructura convencional estarían limitados a pocos milímetros, en las tensoestructuras pueden alcanzar valores muchísimo mayores sin consecuencia significativas. En el caso del movimiento de una membrana, se pueden permitir que sean extremos con la única limitación de que no toque o afecte a otros elementos del edificio.

Una vez realizado el cálculo y la fabricación de la tensoestructura, se debe ejecutar el montaje en obra por constructores expertos. Los fabricantes de tensoestructuras requieren de experiencia y capacidades particulares. El tema de los detalles constructivos es un ejemplo de la interacción entre el diseñador y el constructor, ya que, para materializar la forma generada en el modelo virtual, es necesario resolver las uniones físicas entre los elementos. Estas uniones son en su mayoría fijaciones entre elementos que están trabajando a tracción. Por lo tanto, hay que pensar en los terminales de los cables, sus dimensiones y los accesorios imprescindibles. Y en la membrana, la unión de los patrones, los bordes, las esquinas, las uniones con los cables, etc. Las cimentaciones son otro aspecto particular de las estructuras tensadas, que se diferencian de las fundaciones para otras construcciones, ya que es necesario considerar estructuras para resistir el arrancamiento. En relación a la vida útil de las estructuras tensadas, es muy importante no descuidar ciertas recomendaciones para su mantenimiento que, por la naturaleza de los materiales con que están construidas, difieren de las correspondientes a las construcciones tradicionales:

1. El vandalismo. Las estructuras de tracción, sobre todo

las de membrana, son muy susceptibles al rasgado. Una navaja, unas tijeras, etc. pueden cortar fácilmente una membrana. También el calor o el fuego (un encendedor) la pueden quemar o perforar. Y aunque no sea vandalismo propiamente, un objeto volador en un día de fuerte viento puede golpear una membrana y romperla. Todos estos aspectos afectan al diseño de la estructura, pero también al mantenimiento, la vigilancia, el uso, etc.

2. El mantenimiento. Ya se ha comentado de la importancia del pretensado en este tipo de estructuras. Pero el pretensado tiende a desaparecer con el tiempo. Por eso se suele aconsejar un retensado después de la primera gran carga de la estructura (gran viento o gran nevada) y/o un retensado periódico cada cierto número de años. Otro aspecto del mantenimiento es la limpieza. En función de su situación, una tensoestructura puede verse afectada por el polvo, humo, o cenizas volcánicas, que deterioran la imagen y estética del conjunto. Hay que saber qué productos se pueden y deben usar en cada caso para limpiar las membranas.

3. La durabilidad. Cada vez, los materiales usados en las tensoestructuras son de mejor calidad (aceros inoxidables, pinturas epoxídicas, recubrimientos de telas más duraderos como PTFE por ejemplo, etc.), pero a pesar de ello podemos considerar la necesidad de reponer algún elemento (toda la lona, por ejemplo) a lo largo de la vida útil de la estructura. Ello implica un diseño especial que permita de forma fácil el montaje del material a reponer.