



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Tensoestructuras

Apellidos, nombre	Basset Salom, Luisa (lbasset@mes.upv.es)
Departamento	Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Centro	Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se presentan las tensoestructuras, partiendo de una breve introducción histórica y de la descripción de los tipos, características, materiales y comportamiento estructural.

2 Introducción

Las tensoestructuras son estructuras formadas por tejidos pretensados y redes de cables que se sustentan a base de elementos rígidos tipo mástiles, arcos o pórticos. Responden a la actuación de las cargas desarrollando únicamente esfuerzos de tracción, por lo que constituyen una estructura bastante ligera.

Por otra parte puede decirse que son estructuras seguras ya que, por su ligereza, si se produce el colapso no suelen ocurrir daños personales. Además no es usual que colapse toda la membrana por un fallo local en la misma.

Un buen ejemplo ingenioso de tensoestructura en la naturaleza es la tela de araña, por ser ligera aunque muy fuerte, resistente y fácil de mantener. Es redundante, es decir, posee elementos de sobra, de forma que pueden romperse muchas partes sin que se produzca el colapso del resto. Como todos sus elementos están traccionados, resulta eficiente a la hora de resistir su peso propio y el de los animales que caen en ella. Por otra parte, su flexibilidad y naturaleza elástica la hacen apropiada para soportar las cargas de impacto a las que está sometida.

3 Objetivos

EL alumno, tras la lectura de este documento, será capaz de identificar las tensoestructuras, describir su comportamiento, los materiales, los sistemas utilizados para su estabilidad y apoyo, así como proponer ejemplos reales de edificios con esta tipología estructural.

4 Tensoestructuras

4.1 Antecedentes

Aunque el desarrollo de estas membranas es relativamente reciente, el principio de utilizar telas y redes como estructuras se conoce desde hace miles de años (toldos, redes de pesca, velas de barco, paraguas, tiendas, cometas,...)

Los paraguas, por su parte, pueden considerarse como los pioneros de las tensoestructuras, ya que los egipcios y los asirios ya los conocían.

Los romanos cubrían con toldos de tela desplegable sus anfiteatros (imagen 1) para protegerlos del sol. (Coliseo 70 dC). Inicialmente las telas eran de vela y posteriormente fueron de lino. Esta cubierta apoyaba en un entramado de cuerdas y se accionaba mediante poleas. Con el mismo propósito, en el sur de España se tendían toldos en las calles (hasta el s. XVI).

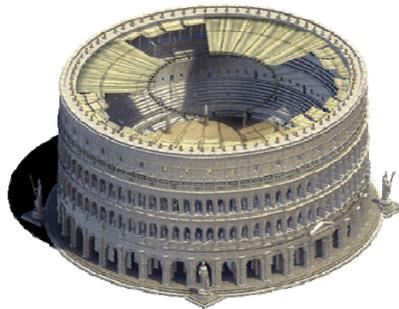


Imagen 1. Cubierta del anfiteatro romano (velario)

Las tiendas, viviendas en las primeras civilizaciones, son probablemente las más próximas a las estructuras de membrana ligeras de hoy en día. Para los nómadas la ligereza, flexibilidad y facilidad tanto de transporte como de construcción eran cualidades imprescindibles para su estilo de vida. Se empleaban en condiciones climáticas muy diversas e incluso extremas, desde los desiertos de Arabia hasta las montañas del Himalaya, desde las estepas de Mongolia hasta los bosques de la tundra ártica. Sus formas han sido siempre muy variadas (abovedadas, cúpulas, cónicas, sujetas por mástiles,...). Las tiendas de los beduinos, bereberes y kurdos, por ejemplo, apoyaban en unos pocos elementos comprimidos, mientras que los indios utilizaban postes rectos formando una estructura cónica que cubrían con las pieles.



Imagen 2. Viviendas nómadas, Marruecos

La aplicación de las tensoestructuras a la arquitectura se produjo en 1960.

Entre los que han contribuido al desarrollo de este modelo estructural puede citarse a Walter Bird, David Geiger, Fritz Leonhard, Kenzo Tange, o Frei Otto. ¿Conoces algún ejemplo de tensoestructura realizada por estos arquitectos?

4.2 Tipos

Se podría establecer una clasificación de las tensoestructuras en función de la forma de la superficie o en función de las condiciones de apoyo. Las formas superficiales básicas son:

- **superficies sinclásticas tensadas y soportadas a lo largo del contorno.**

En este tipo de estructuras se suelen utilizar redes con mallas regulares (triangulares o rectangulares) o tejidos formados por bandas estrechas y largas cosidas o pegadas que actúan como pequeños cables suspendidos. Si además se apoyan en arcos o cables interiores suelen generar superficies onduladas. En la imagen 3



vemos el ejemplo de una estructura de este tipo situada en Boston, en la que la cubierta apoya en un arco en celosía.



Imagen 3. Tensioestructura, Boston



Imagen 4. Estadio olímpico de Múnich



Imagen 5. Auditorio de Tarragona

- superficies anticlásticas de forma cónica, que apoyan de forma puntual en su interior

En este caso se utilizan redes radiales de cables o patrones de tejido. Un ejemplo de este tipo es el estadio olímpico de Munich (imagen 4). Las redes de cables cruzados (cóncavos para carga gravitatoria y convexos para succión viento) están sujetos por los mástiles, los puntales flotantes y el anillo formado por un cable de acero. La cubierta está formada por placas de plexiglás con juntas de neopreno. Otro ejemplo es la cubierta del Auditorio de Tarragona, imagen 5.



4.3 Materiales utilizados en las membranas

Los tejidos que se utilizaban han evolucionado mucho. Las pieles y los tejidos naturales han dejado paso a las fibras sintéticas de alta resistencia con revestimientos que aumentan su duración. Estos tejidos son capaces, también, de resistir climas extremados. Todas estas características hacen que estas estructuras dejen de considerarse temporales, como lo demuestran algunos edificios permanentes (La Verne College en California de 1973).

Los materiales más utilizados son:

- **Lonas naturales o sintéticas pintadas o revestidas**, (algodón, tejidos sintéticos, plástico) para refugios de pequeña escala (tiendas de campaña, toldos) Para aumentar resistencia e impermeabilidad del algodón se suele revestir con vinilo.
- **Nylon reforzado con vinilo o poliéster reforzado con PVC** para estructuras comerciales, tiendas temporales y estructuras neumáticas No se estira tanto como el nylon, pero es más fuerte y duradero (puede mantener su resistencia de 10 a 15 años en vez de 5 a 7 años).
- **Fibra de vidrio revestida con teflón** para estructuras textiles permanentes de escala muy grande, como estadios. Es más fuerte, rígida e incombustible y su vida mínima es de 20 años. Es menos susceptible a las elongaciones permanentes y además es autolimpiable. El teflón refleja aproximadamente el 75% del calor del sol y, como es traslúcido, disminuye la necesidad de luz artificial. Sin embargo, en invierno, se produce una gran pérdida de calor, sin olvidar tampoco que se trata de un material frágil.

A medida que va aumentando la escala de la estructura el tejido va estando sometido a tensiones mayores llegando a un punto en que debe reforzarse con un sistema de cables al que transfiere estas fuerzas.

Los cables se cosen en los bordes de unas franjas especiales prefabricadas, afianzándose en el sitio, o bien cuando se trata de estructuras muy grandes tipo tienda o carpa se atan a la tela cubriéndolos con franjas de tejido. En la imagen 6 se aprecia ese refuerzo.



Imagen 6. Detalles del refuerzo del borde de la membrana



Puede decirse en estos casos que las redes de cables forman la superficie principal que soporta el revestimiento de la cubierta

Estas uniones entre los cables y las membranas deben ser lo suficientemente flexibles como para admitir las grandes deformaciones que se producen en las redes de cables.

En la imagen 7, correspondientes al Auditorio de Tarragona, se pueden ver algunos detalles de la unión cable membrana.



Imagen 7. Detalles de la unión cable-membrana

4.4 Comportamiento estructural

Las membranas flexibles responden a la acción de las cargas únicamente mediante esfuerzos de tracción. Para que la membrana se mantenga a tracción bajo cualquier condición de carga la fuerza de pretensado deberá ser suficiente y, además, la tensión inicial deberá proporcionarle la rigidez necesaria para que la deformación sea mínima.

Su estabilidad depende de la geometría tridimensional curva que adquiere el recubrimiento textil al pretensarse. Al actuar las cargas perpendicularmente a su superficie tienden a deformarse adoptando curvas tridimensionales y desarrollan tensiones superficiales de tracción, de forma similar a lo que ocurre en un sistema de cables cruzados. Aparecen también esfuerzos tangenciales cortantes, asociados con el giro (normalmente presente en todas las superficies curvas que colaboran a soportar cargas). Se trata por tanto de superficies que se comportan como funiculares excepto en aquellos casos en que aparecen compresiones, que se traducen en arrugas en la membrana.

Los cables y los tejidos no se comportan de forma lineal, sino que resisten las cargas a través de grandes deformaciones, consiguiendo de este modo que las tensiones en la membrana dependan de su posición final en el espacio. Otros aspectos de la no linealidad son la fluencia, y la retracción de la superficie (son muy sensibles a los cambios de temperatura y humedad) y el deslizamiento entre las abrazaderas y el tejido, que permiten el cambio de geometría. Las membranas son también muy vulnerables a las cargas dinámicas que les producen fatiga, reduciendo paulatinamente la resistencia con el tiempo. Este comportamiento no lineal hace que el diseño de estas membranas sea muy complejo.



4.5 Cimentaciones y apoyos

Las tensoestructuras se sustentan a base de elementos rígidos tipo mástiles, arcos o pórticos. Los apoyos podrán ser rígidos o flexibles, puntuales o lineales, y situarse en el interior o en los bordes exteriores. En la imagen 8 pueden verse los mástiles que soportan el Millenium Dome de Greenwich (Richard Rogers). Con un diámetro de 365 m y una altura en el centro de 52 m, este edificio se sustenta mediante 12 mástiles inclinados de 100 m de altura y un sistema de cables y tirantes. El material de la membrana es fibra de vidrio recubierta de PTFE.



Imagen 8. Millenium Dome, Greenwich

La cimentación Debe resistir las tracciones debidas a las cargas externas y al pretensado.



Imagen 9. Detalle del anclaje de la cubierta

Las reacciones verticales pueden absorberse por gravedad o por rozamiento del anclaje a lo largo de la superficie de contacto con el terreno.

Los empujes horizontales, por el contrario, se compensarán con puntales o forjados que actúan de riostras de un lado a otro, o con anillos a compresión. También pueden resistirse por rozamiento o con el empuje pasivo del terreno.

En la imagen 9 pueden verse algunos ejemplos del anclaje de la cubierta en elementos de hormigón.



5 Cierre

A lo largo de este tema hemos visto ejemplos de los distintos tipos de tensoestructura, los materiales que se utilizan para sus membranas y su comportamiento estructural frente a la actuación de las diferentes.

Se proponen las siguientes cuestiones:

1. Buscar ejemplos de edificios correspondientes a los diferentes tipos descritos en el texto.
2. Identificar en ellos el sistema de transmisión de cargas a los apoyos.

Solución: Ejemplos de tensoestructuras: King Fahd Station en Riyad (sup. anticlástica con mástiles rígidos en el interior y puntales inclinados para la transmisión de las cargas al terreno y garantizar la estabilidad), State Fair Arena en Raleigh (malla de cables rectangulares que apoyan sobre dos arcos. Las compresiones se transmiten mediante elementos verticales del perímetro, desde los arcos al suelo)

6 Bibliografía

6.1 Libros:

[1] Basset, L.; Abdilla E. "Modelos estructurales y diseño estructural", Servicio de Publicaciones SPUPV-98.268, 1998.

[2] Basset, L.; Guardiola, A. "Estructuras formadas por cables" en la colección: Artículos docentes ETSA.
Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/13615>

6.2 Referencias de fuentes electrónicas:

[3] <http://www.wikipedia.org>

6.3 Figuras e imágenes:

Imagen 1. Cubierta del anfiteatro romano (velario). Disponible en <http://www.taringa.net/posts/imagenes/13814940/El-Coliseo-fotos-y-mucha-info.html>

Imagen 2. Viviendas nómadas, Marruecos. Autora de las fotografías Luisa Basset

Imagen 3. Tensoestructura, Boston. Autora: Luisa Basset

Imagen 4. Estadio olímpico de Munich. Depositada en Wikimedia commons para uso de dominio público. Disponible en http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Olympiastadion_1.jpg

Imagen 5. Auditorio de Tarragona. Autora: Luisa Basset.

Imagen 6. Detalles del refuerzo del borde de la membrana. Autora: Luisa Basset.

Imagen 7 Detalles de la unión cable-membrana. Autora: Luisa Basset.

Imagen 8 Millenium Dome, Greenwich. Autora: Arianna Guardiola

Imagen 9. Detalle del anclaje de la cubierta Autora: Luisa Basset