



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Estructuras formadas por cables

Apellidos, nombre	Basset Salom, Luisa (lbasset@mes.upv.es) Guardiola Villora, Arianna (aguardio@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 estructuras formadas por cables, partiendo de una breve introducción histórica y de la descripción de las características y comportamiento del cable, elemento estructural que trabaja a tracción

2 Introducción

El cable es un elemento flexible que, sujeto a cargas externas, adquiere una forma concreta llamada funicular, que depende de la magnitud y posición de las mismas.

Desarrolla sólo esfuerzos de tracción, por lo que, junto con la alta resistencia del material, hace que constituya una estructura bastante ligera.

Las primeras estructuras formadas por cables fueron puentes colgantes y, posteriormente, puentes atirantados. Hasta finales del siglo XIX no se utilizaron para cubiertas de edificios de grandes luces.

3 Objetivos

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

4 Estructuras formadas por cables

4.1 Antecedentes

Las estructuras funiculares se han utilizado extensamente a lo largo de la historia. Hay muchos ejemplos de puentes colgantes en China, India y Sudamérica con materiales de tipo bambú, cañas o cuerdas, aunque hay evidencias de puentes hechos con cadenas en China en el primer siglo d.C. También se utilizaban para construir tiendas e incluso en estructuras importantes como es el caso de los anfiteatros romanos. ¿Conoces algún ejemplo?

El primer puente colgante en el mundo Occidental es el Jacob's Creek Bridge en Pensylvania de James Findley, construido en 1801. La innovación de este puente fue la introducción de un tablero fijo que impedía que el cable y el propio tablero cambiaran de forma como consecuencia del tráfico de vehículos. Muchos autores consideran, sin embargo, que fueron John y Washington Roebling los precursores de los puentes colgantes modernos de grandes luces con su puente de Brooklyn (1867-1883), en el que utilizaron un segundo sistema de cables para contrarrestar la acción dinámica del viento (imagen 1).



Imagen 1. Puente de Brooklyn, Nueva York

El uso de los cables en edificios se desarrolló mucho más lentamente, debido a que había menos necesidad de cubrir grandes luces y a los problemas que creaba su aplicación. Se considera que la estructura de los pabellones de la exposición de Nijry-Novgorod diseñados por V. Shookhov, en 1896, marcan el principio de las aplicaciones modernas de las estructuras de cables a los edificios, aunque la evolución real de las mismas se inició en la segunda mitad del siglo XX.

Desde entonces se han construido un gran número de edificios representativos con estructuras de cables, siendo el acero galvanizado y el acero inoxidable los materiales más utilizados actualmente.

4.2 Tipos de cables y tirantes

Los cables pueden ser:

- **Cordones:** formados por alambres arrollados helicoidalmente, de manera que quedan colocados de forma regular. Tienen más área metálica para el mismo diámetro, por lo que son más resistentes y rígidos.
- **Cables:** formados por varios cordones arrollados helicoidalmente alrededor de un núcleo o alma, que puede ser una cuerda de fibra textil, un cordón de alambre, un cable o un muelle helicoidal. Se designan conociendo su composición (número de cordones y de alambres de cada cordón), tipo de alma y tipo de cordoneado. Son más flexibles y fáciles de manejar y, consecuentemente, más apropiados para pequeños radios de curvatura.
- **Tirantes estructurales:** formados por perfiles tubulares

La unión de los cables o tirantes con otros dispositivos se efectúa mediante terminales especiales. Pueden verse ejemplos en la imagen 2.



Imagen 2: Ejemplos de uniones

4.3 Comportamiento general de los cables

El cable adopta la forma de una poligonal (cargas concentradas) o de una curva catenaria (peso propio) o parabólica (cargas uniformes distribuidas en la proyección horizontal) en función de la carga actuante (figura 1 a, b, c). Al combinar distintos tipos de cargas se producirán formas combinadas de manera que la carga mayor definirá la forma dominante.

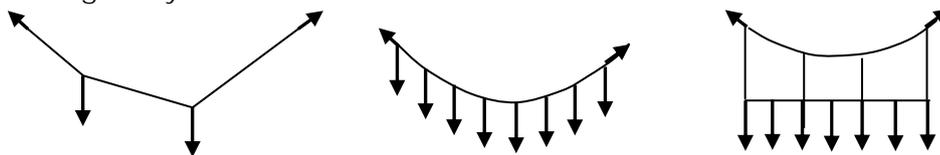


Figura 1 (a, b, c). Ejemplos de formas adoptadas por el cable

La intensidad de las tracciones desarrolladas en el cable y de los empujes en los apoyos depende de la magnitud y posición de la carga aplicada y de la flecha. Por eso, cuanto mayor sea la flecha mayor será la longitud del cable tendido entre dos puntos fijos y menores los esfuerzos y empujes y, consecuentemente, la sección del cable; y viceversa, para una flecha y longitud menores se producirán unos esfuerzos mayores y se necesitará un cable de mayor sección y por tanto más pesado.

El valor óptimo del cociente flecha/luz es el que hace mínimo el volumen del cable. En el caso de cables uniformemente cargados este cociente es $1/3$. Sin embargo, no es aconsejable adoptar este valor ya que supone unos empujes tan grandes que harían antieconómico cualquier tipo de apoyo o anclaje. Se considera óptima la relación $1/8$ a $1/10$ para puentes colgantes y $1/10$ a $1/20$ para edificios.

4.4 Estabilidad

Debido a su falta de rigidez, las estructuras formadas por cables deben estabilizarse frente a los cambios constantes de forma producidos por la variación de las cargas así como frente al efecto dinámico del viento.

Supongamos una cubierta horizontal formada por cables. Cuando sopla el viento sobre ella produce una succión que hará subir la estructura si la carga muerta es menor. A medida que va subiendo las fuerzas varían y el comportamiento de la estructura vuelve a cambiar como respuesta al nuevo sistema de cargas. El proceso es cíclico y no se detendrá mientras haya viento.

Si la acción dinámica actúa en el nivel de frecuencia propia de la estructura, ésta entrará en resonancia, produciéndose vibraciones violentas y, por tanto, grandes daños llegando incluso al colapso total, como le ocurrió al famoso puente de Tacoma en 1940 (El video sobre el colapso de este puente puede encontrarse fácilmente en internet, ¿qué opinas del suceso?)

Hay varios procedimientos para estabilizar los cables (Figura 2):

- **Incrementando la carga muerta de la estructura:** aumentan las tracciones en el cable y varía la frecuencia propia evitando, al mismo tiempo, las deformaciones asimétricas.
- **Anclando con tirantes los cables de la cubierta** en algunos puntos de la misma para sujetarla al terreno



- **Disponiendo superficies de cables cruzados** (inicialmente pretensados) con curvaturas opuestas.
- **Por medio de elementos rígidos** como vigas o arcos
- **Utilizando un sistema de doble capa:** conectando al cable principal uno secundario, mediante unos elementos interiores que pueden estar traccionados (cable secundario debajo del principal) o comprimidos (cable secundario encima del principal). Ambos cables estarán pretensados, de manera que, una vez colocados, disminuirá la tracción en el cable superior y aumentará en el inferior. Las cargas exteriores junto con las de pretensado originan grandes esfuerzos horizontales en los apoyos, que se absorben por medio de tirantes o por medio de un anillo comprimido de acero.



Figura 2. Sistemas de estabilización

4.5 Apoyos

Para transmitir adecuadamente los empujes horizontal y vertical de los extremos del cable al terreno pueden adoptarse varios sistemas:

- **Mediante pilares verticales junto con una viga de borde triangulada** apoyada en fachada o mediante anillos circulares a compresión en el caso de estructuras radiales. Con esta solución desaparece el problema de la cimentación, puesto que ya no está traccionada.
- **Mediante soportes verticales.** En este caso el empuje horizontal debe ser resistido por el soporte que actúa como una viga en voladizo. A la hora de diseñar la cimentación deberá tenerse en cuenta, necesariamente, el momento inducido en la base del soporte a causa del citado empuje. Esta solución sólo es viable para cables ligeramente cargados y con vanos relativamente cortos.
- **Mediante soportes inclinados o en V invertida.** Se disminuye las acciones sobre la cimentación
- **Mediante postes atirantados o tornapuntas.** Cuando los postes son verticales el empuje horizontal del cable pasa directamente al tirante que transfiere la fuerza al terreno. El poste sólo trabaja a compresión (suma de la componente vertical de los cables de la cubierta y de los cables de los tirantes). En este caso la cimentación de los tirantes es compleja, ya que están muy solicitados. Este sistema suele utilizarse para cables que cubren vanos relativamente grandes.
- **Mediante postes inclinados atirantados.** Parte del empuje horizontal va al poste y parte al tirante, reduciendo las fuerzas en éste último y simplificando su



cimentación, aunque se tiene que aumentar la sección del poste. Esta solución es apropiada para cables de gran luz

■ **Mediante pilares verticales junto con una viga de borde triangulada** apoyada en fachada o mediante anillos circulares a compresión en el caso de estructuras radiales. Con esta solución desaparece el problema de la cimentación, puesto que ya no está traccionada

¿Qué sistema se ha utilizado en la fábrica de papel Burgo de Mantua de Pier Luigi Nervi? Se propone al alumno la búsqueda de ejemplos en los que se utilice alguno de los sistemas indicados

4.6 Estructuras soportadas por cables y estructuras atirantadas

Se caracterizan porque los cables trabajan individualmente, como elementos suspendidos o como columnas a tracción, para soportar elementos estructurales como vigas, superficies o edificios.

Las primeras estructuras de este tipo fueron los puentes colgantes, como se ha comentado en el apartado 4.1. La imagen 3 es de uno de los pocos puentes colgantes con transbordador que quedan en el mundo. Se trata del Puente de Vizcaya (1893) del Ingeniero M. Alberto de Palacio y del constructor Ferdinand Arnodin. Tiene 160 m de longitud y una altura máxima de 63.5 m.



Imagen 3. Puente de Vizcaya

La imagen 4 pertenece al Millenium Bridge de Londres (1998-2000) de Arup, Foster y Caro. El día de su inauguración entró en resonancia debido al balanceo de las personas que transitaban por él, lo que obligó a que se cerrara. Se reabrió en 2002 tras la instalación de unos sistemas de amortiguación de las vibraciones.



Imagen 4. Millenium Bridge, Londres

El proceso constructivo de estos puentes empieza por el levantamiento de las torres, el tendido de los cables y, posteriormente el tablero que cuelga de éstos.



Un ejemplo de edificio soportado por cables es el Banco de la Reserva Federal de Mineápolis, de Gunnar Birkerts (1973) en el que de dos cables anclados a unos núcleos de hormigón separados 100 m. cuelgan 11 plantas (Imagen 5).



Imagen 5. Banco de la Reserva Federal, Mineápolis

Los puentes atirantados son un ejemplo claro de viga sujeta con elementos inclinados a tracción, admitiendo una gran variedad en la disposición de los cables. En la imagen 6 vemos una fotografía del Sutong bridge (2003-2008) que tiene una longitud del vano de 1088 m. Las torres miden 306 m y el tablero está formado por un cajón de paneles de acero.



Imagen 6. Sutong Bridge, China

La tipología de estructura atirantada se utiliza asimismo para cubiertas. En el caso de cubiertas en voladizo el requisito de peso mínimo debe compensarse con la capacidad de resistir la succión del viento impidiendo las oscilaciones. La componente horizontal del empuje se soporta por medio de una viga de cubierta que trabaja a compresión. Esta viga estará sometida a flexiones debido a las cargas gravitatorias. Cuando los vientos sean fuertes siempre puede conseguirse que la viga resista parte de las succiones por flexión del voladizo, en cuyo caso transmitirá también este momento a los soportes.

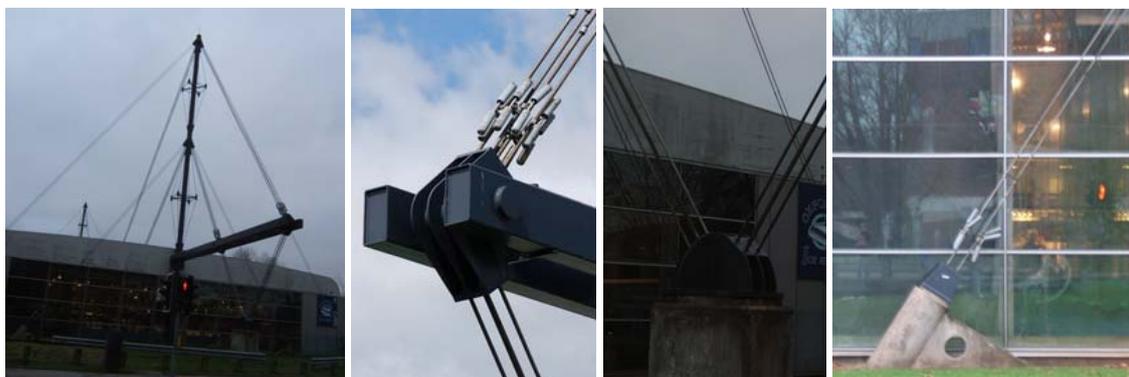


Imagen 7. Detalles del Oxford Ice Rink.



En la Imagen 7 se presentan varios detalles de uniones y anclajes del Oxford Ice Rink, de Nicholas Grimshaw, (1984), en el que la cubierta cuelga de dos grandes mástiles, situados a ambos lados del edificio.

4.7 Estructuras superficiales formadas por cables

Se caracterizan porque los cables trabajan conjuntamente formando estructuras superficiales o incluso bidimensionales

Se utilizan fundamentalmente para cubiertas y, en ellas, los cables se disponen paralelamente o de forma radial, llegando a cubrir luces entre 45 y 135 m.

Las grandes deformaciones producidas por las cargas y los cambios de temperatura, pueden provocar problemas de estanqueidad. En las cubiertas cilíndricas la evacuación de aguas es sencilla, en las cóncavas el agua debe recogerse en el centro o bien bombearse hacia las paredes exteriores.

Pueden ser:

- estructuras de curvatura simple formadas por una única familia de cables, como por ejemplo, la terminal del Aeropuerto de Dulles (1962) de Eero Saarinen (imagen 8) en el que las vigas de borde y los pilares inclinados ayudan a transmitir adecuadamente los empujes.



Imagen 8. Terminal del aeropuerto de Dulles

- estructuras de doble curvatura formadas por dos familias de cables que se cruzan con distinta curvatura o incluso opuesta
- estructuras de doble capa en las que dos familias de cables de distintas curvaturas se sitúan en un mismo plano vertical y se conectan entre sí. Con esta última tipología se consigue amortiguar satisfactoriamente las vibraciones producidas por el viento, tal y como se mencionó antes, como por ejemplo el National Stadium Bukit Jalil Malaysia (1998), en Kuala Lumpur (imagen 9)



Imagen 9. Estadio Nacional Bukit Jalil, Kuala Lumpur



5 Resumen

A lo largo de este tema hemos visto los tipos de cables, su comportamiento frente a la actuación de las diferentes cargas y soluciones para conseguir que sean estables y que la transmisión de los empujes se efectúe convenientemente. Asimismo se han establecido los dos tipos de estructuras formadas por cables aportando diferentes ejemplos construidos.

Se proponen las siguientes cuestiones:

1. Buscar ejemplos de edificios y puentes correspondientes a los diferentes tipos descritos en el texto.
2. Identificar la solución adoptada para conferir estabilidad al sistema.
3. Identificar el sistema de transmisión de cargas a los apoyos.

6 Bibliografía

6.1 Libros:

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

[2] Schueller W. "Horizontal Span Building Structures" Ed J. Wiley and Sons, 1983

6.2 Referencias de fuentes electrónicas:

[3] http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty_projects/terri/index.html

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

6.3 Figuras e imágenes:

Imagen 1. Puente de Brooklin, Nueva York. Autora de las fotografías Luisa Basset

Imagen 2: Ejemplos de uniones. Autora de las fotografías Luisa Basset

Imagen 3. Puente de Vizcaya. Autora de las fotografías Luisa Basset

Imagen 4. Millenium Bridge, Londres. Autora de las fotografías Arianna Guardiola

Imagen 5. Banco de la Reserva Federal, Mineápolis. Autor de la fotografía empleado del National Park Service. Depositada en Wikimedia commons para uso de dominio público

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Marquette_Plaza.jpg

Imagen 6. Sutong Bridge, Jiangsu, China. Autor de la fotografía ANR2008. Depositada en Wikimedia commons para uso de dominio público

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sutong_Bridge.jpg

Imagen 7. Detalles del Oxford Ice Rink. Autora de las fotografías Arianna Guardiola

Imagen 8. Terminal del aeropuerto de Dulles. Autor de la fotografía jetblastBWI Depositada en Wikimedia commons para uso de dominio público

http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Dulles_Airport_Terminal.jpg



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Imagen 9. Estadio Nacional Bukit Jalil, Kuala Lumpur. Autor de las fotografías Alfianamy depositadas en Wikimedia commons para uso de dominio público. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Stadium_nasional_bukit_jalil.JPG

Figura 1 (a, b, c). Ejemplos de formas adoptadas por el cable. Autora: Luisa Basset

Figura 2. Sistemas de estabilización. Autora: Luisa Basset