

Estructuras tensegríticas: nueva tipología estructural para el siglo XXI

Mamerto Gamboa Cerezo

Tensegrity structures: new structural typology for the 21st century

RESUMEN

En el campo de las estructuras no es habitual convivir en el tiempo con una nueva tipología estructural que esté en fase de investigación y desarrollo con altas posibilidades de éxito de implantación en el mercado. Si bien las estructuras tensegríticas nacieron en la década de 1960, es en los últimos 20 años cuando se están realizando grandes avances en el estudio del comportamiento y metodologías de diseño que permitan la introducción de este novedoso concepto estructural en un mercado tradicionalmente conservador como es el sector de la edificación. Las estructuras de bóveda, los arcos, los dinteles y las estructuras tensadas son tipologías muy conocidas y de gran aplicación durante la historia. La tensegridad es la tipología llamada a establecerse en los próximos años, siempre y cuando sea capaz de solventar las barreras técnicas y constructivas que hacen a día de hoy que su introducción en el mercado sea lenta y sin una aplicación definida.

Recibido: 8 de septiembre de 2010
Aceptado: 2 de noviembre de 2010

Palabras clave

Tensegridad, estructuras, construcción, estructuras articuladas, diseño estructural

ABSTRACT

In the field of structures is not usual for a new structural typology still in a research and development phase to enjoy strong possibilities of a successful implantation in the marketplace. Tensegrity structures were born in the 60's, however great advances in the study of behaviour and design methods have been carried out in the last twenty years which have led to the introduction of this brand new structural concept in a traditionally conservative market such as the building industry. Vault structures, arches, lintels or tent structures are typologies well known and have been applied extensively throughout history. Tensegrity is the new typology set to establish itself over the coming years, provided that it can overcome the technical and building barriers that have hitherto made its introduction into the market slow and its application ill-defined.

Received: September 8, 2010
Accepted: November 2, 2010

Keywords

Tensegrity, structures, construction, pin jointed structures, structural design

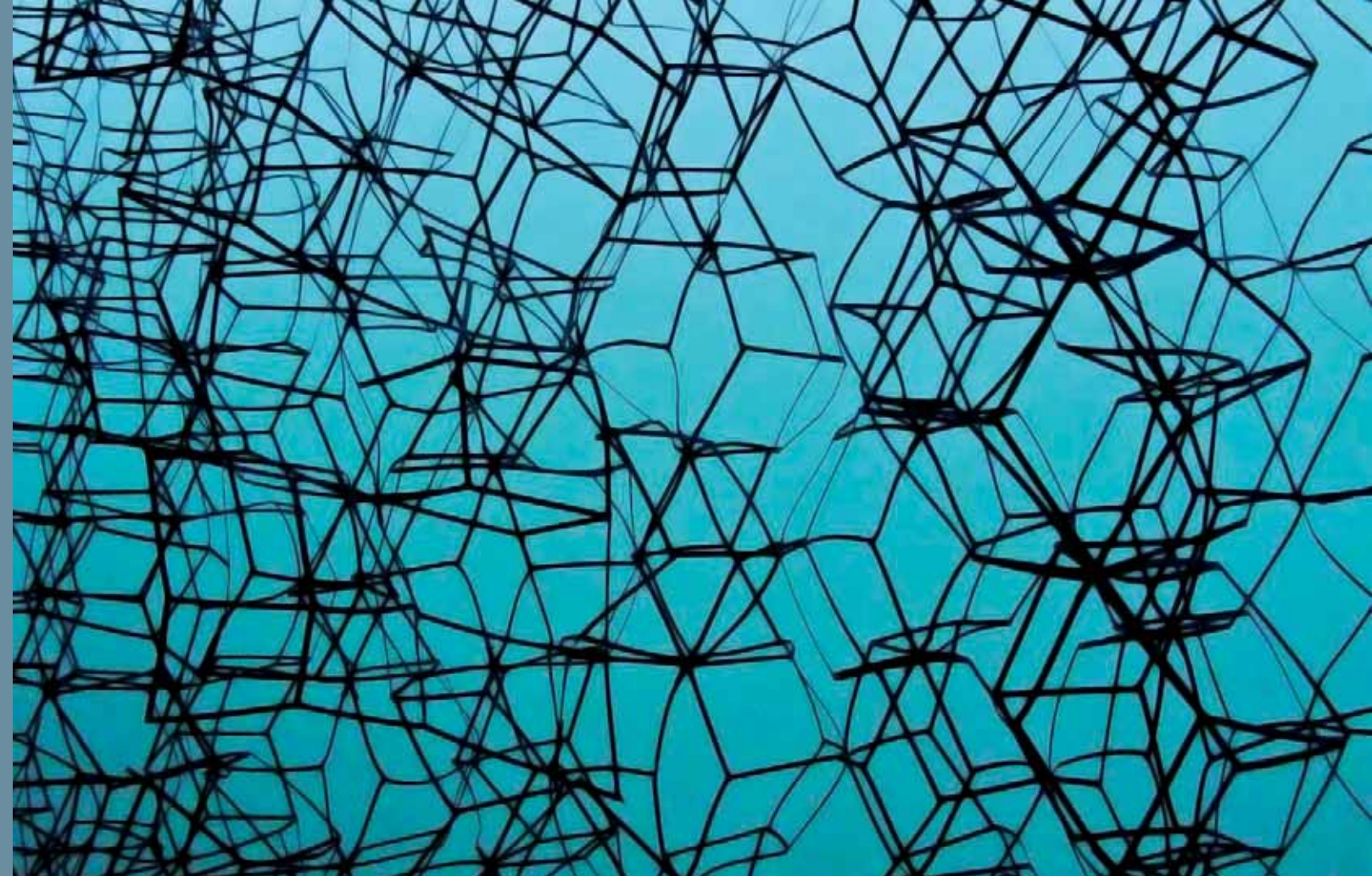


Foto: Pictelia

La tensegridad, dentro del campo de la ingeniería, es un principio estructural formado por un sistema de fuerzas que no necesita restricciones externas, tales como apoyos o condiciones de diseño impuestas, para mantener la correcta relación entre sus elementos. Una estructura tensegrítica es básicamente un conjunto de fuerzas de tracción y compresión que a partir de unos valores determinados de tensión en sus elementos mantienen una forma determinada, siendo la estructura estable por sí misma. Una de las particularidades más destacadas de las estructuras tensegríticas es que su comportamiento mecánico global no se ve influido por la disposición de los elementos ni por el material empleado, siempre y cuando los elementos de la estructura puedan soportar los esfuerzos solicitantes a nivel de sección. Los sistemas tensegríticos, pertenecientes a los sistemas reticulados, transmiten axialmente todas las fuerzas a través de sus elementos, cables y barras (tracción y compresión respectivamente), por lo que el material se aprovecha al máximo al ser solicitado en su forma más eficiente. La conexión entre los elementos se diseña como articulaciones permitiendo el libre giro de los elementos, lo que simplifica el cálculo, montaje y construcción de las uniones.

No cabe duda de que la tensegridad crea asombro y desconcierto en el espectador al contemplar cómo los elementos a compresión de una estructura que, sin estar en contacto entre sí, puede mantener el equilibrio y tener la capacidad de transmitir cargas. La discontinuidad de las líneas de compresiones es una de las principales características de las estructuras tensegríticas y la razón de poseer propiedades únicas en comparación con otras tipologías. Por ello, se las conoce como “estructuras de compresión flotante” o dicho de una manera más gráfica, son “islas de compresiones en un mar de tracciones” (R. B. Fuller). Debido a sus características únicas en el campo de la ingeniería y la arquitectura, estas estructuras deben ser estudiadas como un caso especial dentro del diseño estructural.

Los orígenes de la tensegridad

La tensegridad llama la atención desde sus misteriosos orígenes aunque se reconoce quién materializó por primera vez la idea de generar un volumen estable en el espacio con líneas de compresión discontinuas. La disputa por determinar quién fue el inventor de la tensegridad se la reparten el arquitecto Buckminster Fuller, el escultor Kenneth Snelson y el ingeniero David Emmerich.

Aunque algunas ideas similares ocurrieran allá por la década de 1920, el tema fue primordialmente tratado por Fuller, reputado arquitecto, diseñador, inventor y filósofo americano creador de la geometría geodésica. Él impulsó la idea y acuñó el término original *tensegrity*, término anglosajón proveniente de la contracción de otros dos: *tensional* e *integrity*, traducido al castellano como “integridad tensional” (Gómez 2007).

En 1940, Fuller creía que el principio tensegrítico era la regla que regía en toda la naturaleza, desde el Sistema Solar hasta los sistemas atómicos. Estaba convencido de que el universo se movía según el principio de integridad tensional. Mientras Fuller ejercía de profesor dando clases de modelos geométricos en Black Mountain Collage (Carolina del Norte, EE UU), uno de sus alumnos, Kenneth Snelson, asombrado por las novedosas ideas que su profesor impartía en las aulas, le presentó un conjunto de diseños en los que había estado trabajando. Aquellos modelos generaban una tipología estructural que hasta la fecha no había sido concebida. Cuando Fuller vio los modelos de Snelson, se dio cuenta de que aquello era lo que había estado buscando durante años y su idea preliminar de tensegridad se llegaba a concretar.

Al mismo tiempo, pero al otro lado del Atlántico, David Georges Emmerich empezó a investigar algunos diseños de estructuras basadas en prismas tensados. Como fruto de su trabajo, Emmerich patentó sus “redes autopretensadas” (1964), que eran exactamente los mismos criterios de diseño sobre las que estaban trabajando Snelson y Fuller, cada uno de ellos independientemente.

Definición de tensegridad

Para establecer las propiedades de la tensegridad en el campo de las estructuras, nos basaremos en la definición realizada por A. Pugh debido a su claridad y simplicidad:

“Un sistema tensegrítico se establece cuando un conjunto de elementos a compresión discontinuos interactúa con un conjunto de elementos a tracción continuos para definir un volumen estable en el espacio” (Pugh 1976).

Según su definición, una tensegridad pura está compuesta de un conjunto de cables continuos a tracción y un conjunto de barras discontinuas a compresión. Sin embargo, muchas estructuras que se desarrollan hoy día dentro del campo de la tensegridad no se ajustan a su definición exacta, como la cubierta del *Georgia Dome* (Atlanta, Estados Unidos), una cubierta tensegrítica “no pura”, ya que posee un anillo de compresión continuo de hormigón que forma el perímetro exterior de la estructura, lo que permite la estabilidad de la cubierta por sí misma en su conjunto.

Una definición alternativa, basada en sus propiedades matemáticas es la siguiente:

“Una tensegridad es un conjunto ordenado finito de puntos en un espacio euclídeo, con una determinada configuración, de los cuales ciertos pares de esos puntos, llamados cables, están obligados a no separarse; y el resto de pares de esos puntos, llamados barras, están obligados a no unirse” (J. E. Charalambides, 2004).

Propiedades de las estructuras tensegríticas

La configuración que adoptan las tensegridades le reportan una serie de características particulares. A continuación, se enumeran sus principales cualidades:

- En el diseño de sistemas tensegríticos, se parte de la hipótesis de que los elementos están articulados y las cargas externas aplicadas sobre los nudos, en caso de existir. Así pues, los elementos sólo transmiten fuerzas de tracción o compresión. Al ser estructuras que trabajan exclusivamente a esfuerzos axiales,

se obtiene la máxima capacidad resistente de sus materiales, obteniendo una gran capacidad portante si las comparamos con estructuras de peso similar.

- Como estructuras en autoequilibrio, no necesitan de elementos exteriores para mantener su forma, por lo que son independientes de las fuerzas gravitatorias.

- Su capacidad resistente es directamente proporcional al estado tensional de sus elementos: a mayor pretensado mayor capacidad portante.

- La formación de estructuras complejas a partir del ensamblaje de módulos elementales estables por sí mismos le permiten mayor libertad para la definición del proceso de ejecución. Esta concepción estructural permite generar nuevos sistemas a partir de la unión de varios módulos. La propiedad de ser estructuras autoestables formadas por módulos independientes puede generar beneficios en la fase de ejecución, al utilizar la propia estructura como elemento soporte en el proceso constructivo eliminando así medios auxiliares en la fase de montaje.

- La discontinuidad de los elementos a compresión evita la aparición de esfuerzos de torsión en la estructura. Por la reducida esbeltez de sus elementos a compresión, el fenómeno de pandeo raras veces es criterio principal de dimensionamiento de los elementos.

- A partir de una configuración mínima necesaria para su estabilidad, todo elemento a tracción que se añada a la estructura le confiere mayor rigidez, por lo que no hay elementos redundantes.

- No se producen puntos de concentración de esfuerzos. La estructura se comporta como un todo y transmite las cargas a toda la estructura. Los esfuerzos afectan a la estructura de igual modo, independientemente del punto de aplicación.

- Son estructuras muy sensibles a las vibraciones que transfieren rápidamente las cargas a través de sus elementos. Al no existir puntos de debilidad local, es una propiedad muy indicada para situaciones que requieran absorción de impactos o de vibraciones sísmicas. Debido a la gran deformación asociada con las estructuras tensegríticas, es necesario aplicar métodos de cálculo no lineal para determinar su equilibrio, los cuales son considerablemente más complejos que los métodos de rigidez.

- El comportamiento mecánico de las estructuras tensegríticas frente a acciones impuestas genera no linealidades geométricas. La validez de los resultados dependen en gran medida de la optimización de la metodología empleada en la

obtención de la geometría y tensiones de equilibrio, debido a la aplicación de métodos iterativos involucrados en las distintas fases del diseño, principalmente en los concernientes al proceso de búsqueda de forma.

- Son sistemas plegables. La mayoría de las estructuras tensegríticas son sistemas estática y cinemáticamente indeterminados. Los mecanismos internos de la estructura son contrarrestados por el estado de autotensión que sufren las tensegridades. Así pues, el diseñador puede cambiar la forma de la estructura actuando sobre su equilibrio, a partir de los mecanismos infinitesimales, invirtiendo una pequeña cantidad de energía para iniciar el movimiento.

Conceptos fundamentales

A continuación, se van a tratar conceptos fundamentales de las estructuras tensegríticas, los cuales constituyen el trasfondo mecánico necesario para la comprensión del comportamiento de los sistemas tensegríticos.

La rigidez de los sistemas tensegríticos está condicionada por la estabilidad de los mecanismos infinitesimales con respecto al estado de autotensión. Esta rigidez sólo es posible con una geometría determinada, la cual es consistente con los criterios de equilibrio estático. En la figura 1 se puede observar el movimiento generado por el mecanismo interno (rotación y traslación del triángulo superior con respecto al inferior) que se ve estabilizada por el estado de autotensión ($ss = m = 1$). La figura representada se corresponde a la configuración denominada “símplex”, que conforma la configuración con el mínimo número de elementos posibles de una estructura tensegrítica en tres dimensiones, compuesta por tres barras y nueve cables.

Figura 1. Rotación y traslación del triángulo superior con respecto al inferior en el símplex, debidas a la estabilización del mecanismo interno desarrollada por el estado de autotensión ($ss = m = 1$).



Según Haber y Abel (1982) los parámetros básicos para el diseño de estructuras de membranas traccionadas, también apropiadas para el caso de estructuras tensegríticas, son la determinación de la topología, fuerzas internas, cargas externas, configuración y restricciones geométricas que afectan a la estructura.

La topología define la conectividad de los elementos y los nodos por medio de la denominada matriz de incidencia. Se utiliza la teoría gráfica para definir la relación estructural de los elementos que componen la estructura, quedando definida por el número de nodos y enlaces. El número mínimo de nodos necesarios para formar un sistema tensegrítico es seis en un sistema tridimensional; cuatro en el caso de sistemas bidimensionales, y dos en el caso de sistemas lineales. Las restricciones geométricas descritas en términos de coordenadas nodales, tales como la disposición y dirección de los elementos o las propiedades simétricas son, a menudo, necesarias para asegurar una solución única en el proceso de búsqueda de forma, ya que la mayoría de los sistemas tensegríticos son indeterminados.

Se exponen, a continuación, una serie de suposiciones básicas usadas generalmente para la aplicación del método de búsqueda de forma de las estructuras tensegríticas.

- El estudio de estructuras tensegríticas normalmente idealiza las estructuras como elementos conectados por uniones sin rozamiento e ignorando el peso propio de la estructura. Estrictamente hablando, estas condiciones nunca son satisfechas, pero es una simplificación que ayuda al cálculo y da puntos de referencia significativos.

- Los elementos se consideran solamente sometidos a esfuerzos de tracción o compresión. No se considera el pandeo en elementos comprimidos, debido a su corta longitud rara vez aparece este fenómeno, así como tampoco se considera la relajación de los elementos a tracción. Tampoco se tiene en cuenta la variación de temperatura de los elementos, ni el estado de equilibrio de la estructura se ve afectado por la fuerza de la gravedad.

- Los elementos, ya sean a tracción o compresión, se consideran materiales isotrópicos de comportamiento elástico lineal.

- Las distancias y longitudes están medidas asumiendo que los nodos son puntos de terminaciones concretos. Esta hipótesis permite olvidar las dimensiones reales de los nodos.

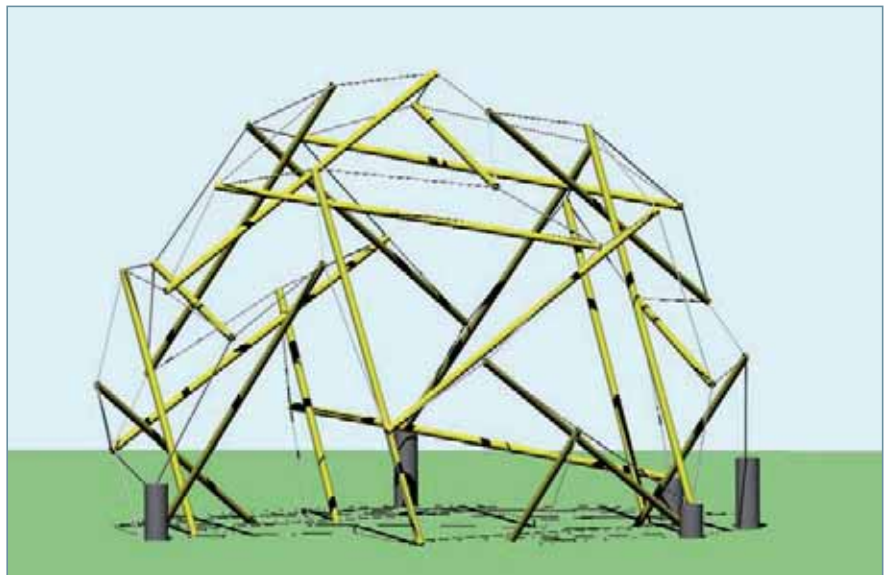


Figura 2. Cúpula tensegrítica en función del icosaedro truncado.

- Las tensegridades son modeladas en situación de autoequilibrio, libres de cualquier fuerza y restricción externa.

Análisis estructural

Un paso clave en el diseño de estructuras tensegríticas es la determinación de su configuración geométrica y tensional, conocida como el proceso de búsqueda de forma (en terminología inglesa *form-finding*).

El método de búsqueda de forma pretende determinar el equilibrio geométrico de la estructura bajo la acción del pretensado. Excepto en casos especiales, la geometría inicial no es conocida, ya que depende del estado de autotensión. Por tanto, se establece una geometría de partida en función de la forma final deseada. Aplicado el pretensado a la estructura inicial se encuentra una nueva geometría por medio de un proceso iterativo. Si esta geometría no satisface los requisitos de diseño, se modifican los esfuerzos de pretensado hasta que la geo-

metría pretensada resultante cumpla con los requisitos de diseño.

A partir del resultado geométrico y tensional de la estructura obtenido en el proceso de búsqueda de forma, se aplican métodos de cálculo no lineal, como el método iterativo de Newton-Raphson, para calcular los esfuerzos y desplazamientos de la estructura bajo la acción de las cargas externas con el fin de dimensionar los elementos de la estructura según la normativa aplicable en cada caso. Hasta la obtención de una geometría y estado tensional en situación de equilibrio, las propiedades mecánicas de los elementos que componen la estructura no han tomado parte en el proceso de diseño, lo que demuestra la independencia de la disposición de los elementos y los materiales utilizados en el proceso de cálculo de equilibrio en cualquier estructura tensegrítica.

Tibert y Pellegrino (2003) clasificaron los métodos existentes para la búsqueda de forma.

Tabla 1. Clasificación de los sistemas reticulados.

Clase	r_E	m, ss	Observaciones
1	$r_E = b$ $r_E = N$	$ss = 0$ $m = 0$	Sistemas estática y cinemáticamente determinados
2	$r_E = b$ $r_E < N$	$ss = 0$ $m = N - r_A$	Sistemas cinemáticamente indeterminados
3	$r_E < b$ $r_E = N$	$ss = b - r_A$ $m = 0$	Sistemas estáticamente indeterminados
4	$r_E < b$ $r_E < N$	$ss = b - r_A$ $m = N - r_A$	Sistemas estática y cinemáticamente indeterminados

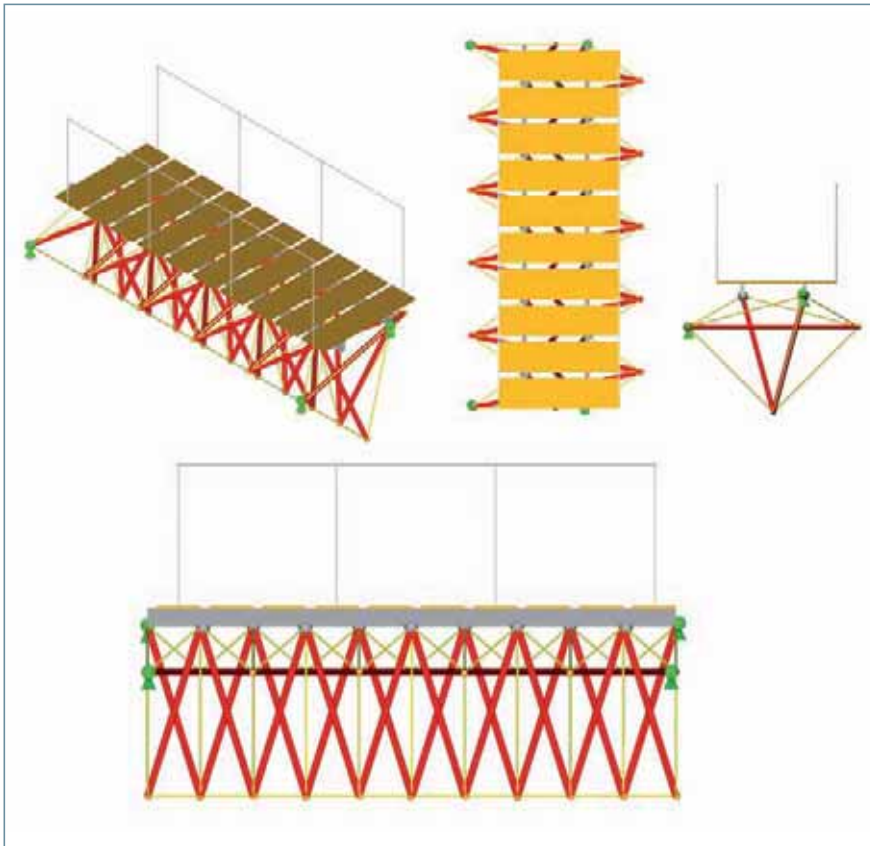


Figura 3. Propuesta de pasarela tensegrítica realizada por el autor formada a partir de la unión varios módulos tipo simplex.

queda de forma de sistemas tensegríticos en dos categorías: métodos cinemáticos y métodos estáticos. Los primeros determinan la configuración de equilibrio a partir de cualquier longitud máxima total de las barras o la mínima longitud total de los cables, mientras que la longitud total del resto de elementos se mantiene constante. Por otro lado, los métodos estáticos buscan configuraciones de equilibrio que permitan la existencia de un estado de pretensado en la estructura con una topología y fuerzas dadas.

Los sistemas tensegríticos se configuran como una subclase de los sistemas reticulados, pertenecientes generalmente a la clase 4 en función del número de estados de autotensión y mecanismos internos (tabla 1). Para comprender los problemas relacionados con la autotensión y los mecanismos que se producen en dichas estructuras es necesario conocer sus indeterminaciones estáticas y cinemáticas, es decir, conocer el orden de mecanismos infinitesimales y comprobar que están estabilizados por el estado de autotensión.

Cuando los elementos de la estructura son ensamblados, la conexión entre estos y sus elementos pueden llevar a una indeterminación cinemática. Es decir, si existe

un desplazamiento que no pertenece a un movimiento del sólido rígido, entonces la estructura se dice que es cinemáticamente indeterminada, y este desplazamiento se llama mecanismo de la estructura. En la mayoría de los casos de estructuras convencionales, se evitan estructuras con mecanismos, puesto que no serán estructuras rígidas (y ni tan siquiera se les podrá llamar estructuras en el sentido estricto de la palabra). Sin embargo, en el caso de las tensegridades, la activación de un estado de autotensión genera una estabilización del mecanismo interno.

El camino entre las diferentes geometrías se corresponde con los diferentes movimientos (mecanismos) de los elementos. Actuando sobre el estado de autotensión, es decir, variando las tensiones de los elementos y, por tanto, su equilibrio, se produce un movimiento de la estructura. La deformación que sufre la estructura debe respetar en todo momento las condiciones de compatibilidad.

Para una topología dada, el valor de mecanismos internos y estados de autotensión puede ser determinado por técnicas de álgebra lineal a partir de la matriz de equilibrio establecida en la configuración inicial.

Conclusiones

Como definición básica de la tensegridad, se puede decir que son estructuras articuladas compuestas por elementos traccionados que forman una red continua exterior que mantiene encerrada en su interior elementos a compresión discontinuos generando un volumen estable.

En el diseño de las estructuras tensegríticas se muestra la dificultad de encontrar un estado tensional y geométrico que conformen una estructura estable, debiendo aplicar procesos iterativos en los métodos de búsqueda de forma. En función de la topología de la estructura que diseñar, la elección del método de búsqueda de forma será clave para obtener resultados con configuraciones estables.

El principal problema que presenta esta tipología estructural en la fase de ejecución es el desplazamiento que se produce en los nodos debido al proceso de tesado de los cables. Todas las deformaciones producidas y los diferentes estados tensionales deben ser anticipados en la fase de diseño para poder prever el comportamiento de la estructura en cada momento del tensado y, finalmente, encontrar la geometría requerida en situación de servicio. A mayor dimensión de la estructura, mayores son las tensiones iniciales que se deben introducir para mantener la estabilidad, lo que dificulta el proceso constructivo.

La complejidad en el proceso de ejecución y la sensibilidad que poseen estas estructuras ante acciones solicitantes son las principales barreras que se encuentra la tensegridad para su introducción en el campo de la edificación.

Bibliografía

- Charalambides, JE (2004). *Computer methods for tensegrity structures*. University of Texas at Austin.
- Gómez Jauregui, V (2007). *Tensegridad: Estructuras tensegríticas en ciencia y arte*. Servicio de publicaciones de la Universidad de Cantabria.
- Haber, RB, Abel, JF (1982). Initial equilibrium solution methods for cable reinforced membranes. Part I. Formulations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 30, 263-284.
- Pugh, A (1976). *An Introduction to Tensegrity*. University of California Press.
- Tibert, G., Pellegrino, S (2003). Review of Form-Finding Methods for Tensegrity Structures. *International Journal of Space Structures* Vol. 18, No. 4, 209-223.

Mamerto Gamboa Cerezo

mamertogamboa@hotmail.com

Ingeniero industrial e ingeniero técnico industrial, especialidad Mecánica por la Universidad de Málaga. Máster en Gestión de la Tecnología y la Innovación. Desarrolla su carrera profesional como ingeniero en Advanced Bau System, empresa dedicada a la fabricación de paneles estructurales de EPS.