Tensegridad. De la escultura a la célula

Tensegrity. From the Sculpture to the Cell

Miguel de Guzmán

Resumen

Las configuraciones espaciales conocidas como "estructuras de tensegridad" aparecieron hace más de 50 años en las esculturas de Kenneth Snelson. Sus propiedades matemáticas son interesantes desde diferentes puntos de vista y presentan un buen número de problemas aún sin resolver. Sus aplicaciones al diseño en arquitectura e ingeniería parecen ser muy amplias. Investigaciones recientes sobre la estructura del citoesqueleto y otros campos biológicos y médicos sugieren que tales estructuras pueden constituir una pista importante para explicar la arquitectura de la vida. El artículo que sigue resume algunos aspectos de este campo aparentemente tan fértil.

Palabras clave

Tensegridad. Arquitectura celular. Aplicaciones de la tensegridad. Estructura del citoesqueleto.

Abstract

The spatial configurations now known as "tensegrity structures" appeared more than 50 years ago in the sculptures of Kenneth Snelson. Their mathematical properties are interesting in many respects and they offer a great number of problems not yet solved. Their applications to design in architecture and engineering seem to be very rich. Recent research on the structure of the citoskeleton and other biological and medical fields suggest that they could be an important clue in order to explain the architecture of life. This paper summarizes some aspects of this apparently so fertile field.

Key words

Tensegrity. Cell architecture. Tensegrity applications. Structure of the citoskeleton.

El autor es Catedrático de Análisis matemático. Facultad de Ciencias Matemáticas. Universidad Complutense de Madrid.

Antecedentes

El antecedente más cercano a la aparición de la tensegridad fue la creación por Alexander Calder, al comienzo del siglo XX, de un nuevo tipo de escultura, la escultura móvil. Las estructuras creadas por él tenían aspectos muy originales y profundos. Aunque abstractas, eran en muchos aspectos más cercanas a la vida y a la naturaleza que la escultura tradicional. Eran estructuras ingeniosamente organizadas, constituidas por elementos muy simples en un equilibrio dinámico altamente inestable que se hace patente a través de los cambios que una ligera brisa produce en ellas. Su movilidad, su labilidad, nos hacen percibir su profunda sintonía con la de tantos otros elementos de la naturaleza como el agua de los ríos, la llama de una hoguera, el temblor de las hojas de un árbol, la vida misma, mutable, pasajera,... La belleza de las estructuras de Calder, como la de la música y la danza, se basa en la momentaneidad y fugacidad de sus distintas situaciones, al tiempo que conservan una cierta frágil identidad. Es claro que la permanencia, la estabilidad, la solidez, pueden dar lugar a creaciones que nos impresionan de forma muy diferente por su belleza y majestuosidad y que nos acercan a la percepción de la firmeza y consistencia de la roca, del firmamento, de los astros cuasieternos. Pero tal belleza es de otra naturaleza.

Hacia 1947, Kenneth Snelson, estudiante de artes plásticas, tratando de desarrollar el estilo de Calder, ideó una escultura basada en nuevas organizaciones de elementos también extraordinariamente simples que trasponían las ideas de Calder en una nueva dirección. Se puede decir que la estructura inicial que dio origen a su interesante innovación en la escultura, y más adelante, como veremos, a ideas y desarrollos novedosos en otras muchas artes y técnicas, fue el prisma oblicuo de base triangular, del que se puede ver un modelo en la figura 1.

Se trata de una construcción que desde la primera visión se presenta paradójica e intrigante. Seis puntos en el espacio, los vértices de las bases del prisma, aparecen en una estructura estable, unidos y separados a la vez por nueve cables inextensibles pero flexibles, y por tres barras rígidas, sin que ninguno de estos elementos toque a ninguno de los otros salvo en sus extremos.

La impresión que uno recibe se puede también explicar de la forma siguiente, que se adapta mejor a la intención pretendida por el autor y por la construcción misma. Lo que inicialmente atrae nuestra mirada son tres barras rígidas que se mantienen en equilibrio en el espacio de modo que ninguna se toca entre sí. Una de las barras, por supuesto estará anclada, pero las otras dos parecen flotar en el aire. ¿Cómo se sostienen? Cuando uno se acerca a la estructura, observa que hay conexiones entre los extremos de las barras. Pero la sorpresa no por ello desparece. Al observarla más de cerca se percibe que los seis extremos se mantienen unidos y separados a la vez, en equilibrio, mediante nueve cables en tensión.

¿Qué hay de extraño? Uno pensaría que los cables (flexibles pero inextensibles), si están en tensión, están obligando puntos, objetos, a que se mantengan no más separados entre sí que

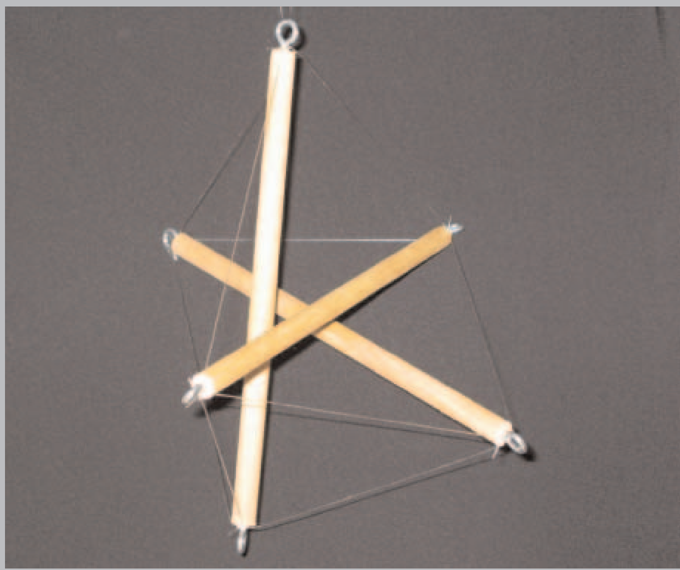

Figura 1. Modelo del prisma oblicuo de base triangular.

la longitud máxima del cable. En la escultura de Snelson los cables tienen una doble misión. Están manteniendo los puntos, los extremos de las barras, a la vez juntos y separados. Quien no perciba bien la sorpresa puede tratar de construir en el espacio una estructura en equilibrio de dos barras rígidas (una anclada en el suelo por uno de sus extremos) y la otra inmóvil en el aire, sostenida por cuatro cables que unan los extremos de las barras. Una tarea imposible. ¿Cómo se hace posible para tres barras?

Este elemento paradójico en la escultura de Snelson le proporciona una belleza peculiar. Pero por otra parte las posibilidades que se abren con ella a la imaginación para la construcción de estructuras semejantes hacen intuir la presencia de un tesoro oculto de formas que utilicen los mismos elementos simples y económicos para lograr inmensas complejidades. Como veremos, el paso del tiempo vino a confirmar este barrunto. Buckminster Fuller, profesor en Black Mountain College, donde Snelson permaneció una temporada, debió de prever de alguna forma la importancia de este tipo de estructura, se entusiasmó con ella, la utilizó profusamente y acuñó para ella un nombre, *tensegrity,* que con el tiempo se estableció firmemente.

El término tensegridad (que alude a *tensión integrada*) recoge en efecto la particularidad más importante de estas estructuras, que consiste en que su equilibrio depende exclusivamente de fuerzas de tensión y compresión, dirigidas en el sentido axial de cada uno de los elementos, barras y cables, que las constituyen. Las fuerzas de torsión están ausentes. Esta característica es la clave para entender geométrica y mecánicamente la tensegridad, como tendremos ocasión de exponer más abajo, y para explicar su simplicidad y su eficacia en sus muchas apariciones (figura 2).

Receta para una tensegridad

La imagen de la tensegridad que hemos descrito (prisma oblicuo de base triangular) proporciona una idea muy pobre. Para saborear más plenamente su belleza lo mejor es fabricarse un modelo uno mismo. Hacerlo con elementos caseros no es nada difícil. Tomamos tres bolígrafos de los que desechamos la parte interior, seis hembrillas de las que se usan para colgar cuadros y que introducimos en los extremos de los bolígrafos (se pueden usar pequeños tacos para ajustarlas) y unas cuantas sencillas anillas de goma que van a hacer el oficio de cables. Viene bien, para sostener la estructura mientras la construimos, un tubo cilíndrico de cartón, como por ejemplo el tubo interior de un rollo de papel de cocina.

Figura 2. http://www.kennethsnelson.net/sculpture/outdoor/3.htm

Colocamos el tubo verticalmente. A la misma altura del tubo y simétricamente situados sobre el tubo señalamos tres puntos M_1, M_2, M_3 (es decir, M_1, M_2, M_3 son los tres vértices de un triángulo equilátero inscrito en el tubo). En el punto M_1 apoyamos uno de lo bolígrafos b_1 de modo que su punto medio coincida con M_1 y que b_1 quede tangente al tubo e inclinado un cierto ángulo, por ejemplo de 45°, con respecto al plano horizontal. Hacemos lo mismo en el punto M_2 con el bolígrafo b_2 y en el punto M_3 con el bolígrafo b_3. Usamos el mismo ángulo de 45° para la inclinación de los tres. Unimos ahora los tres extremos superiores de b_1, b_2, b_3 entre sí mediante tres anillas de goma y, así mismo, unimos los tres extremos inferiores entre sí. Obtenemos de este modo las bases del prisma, dos triángulos equiláteros horizontales. A continuación unimos el extremo superior de b_1 con el extremo inferior de b_2, el superior de b_2 con el inferior de b_3, y el superior de b_3 con el inferior de b_1. Finalmente quitamos el tubo de cartón y dejamos a las gomas actuar por sí mismas y... posiblemente obtengamos una estructura como la de la figura 1. Pero si resulta que los bolígrafos no quedan separados y se tocan, entonces lo que sucede es que las tensiones de las gomas horizontales o de las que van de arriba abajo no son las adecuadas. Se arregla la situación fácilmente fabricándonos anillas de menos tensión. Para ello unimos adecuadamente dos anillas para formar una más larga. Se experimenta ahora de nuevo con las tres anillas de arriba abajo con menos tensión, y manteniendo las seis anillas horizontales con la misma tensión anterior... Tras algún posible ensayo y error se obtiene la tensegridad.

Vale la pena explorar y manipular la estructura conseguida. Contemplar las tres barras juntas y separadas al tiempo por las gomas. Percibir su equilibrio. Tratar de deformarla y sentir cómo vuelve a su situación estable. Cambiar la tensión de las gomas haciendo nudos en ellas o cambiar alguna de las gomas por otra de tensión diferente y observar las modificaciones que esto causa en la estructura. Observar cómo estamos en presencia de una organización en la que cualquier parte de ella parece enterarse de lo que está pasando en cualquier otra parte. Un cambio por una intervención que se realice en cualquier vértice lleva consigo transformaciones en la estructura entera. Trataremos de entender ahora cómo es esto posible...

Geometría y estática de la tensegridad

El planteamiento de las condiciones de equilibrio de la tensegridad de tres barras y nueve tendones que hemos obtenido nos conduce de forma sencilla a la solución del problema geométrico, que nos presenta y nos proporciona valiosas luces para la solución de muchos otros problemas semejantes.

La simetría rotacional de la construcción planteada simplifica drásticamente el problema matemático. El vértice A_1 de la barra b_1 está en equilibrio porque las tres fuerzas que actúan sobre él, correspondientes a las tres tensiones de los tendones que en él confluyen, tienen una resultante dirigida hacia el vértice B_1 de la misma barra b_1, que se cancela con la fuerza que aparece en A_1 por razón de la reacción a la deformación de esta barra. Esto mismo sucede en cada vértice. El planteamiento geométrico de esta situación conduce, tras sencillos cálculos, a la solución explícita del problema. Para las coordenadas (x,y,z) de los vértices de los extremos de las barras A_1, B_1, A_2, B_2, A_3, B_3, se pueden tomar los siguientes valores co-

$$A_1 = (1,\ 2 + \sqrt{3},\ (2 + \sqrt{3})\tan c)$$

$$B_1 = (1,\ -(2 + \sqrt{3}),\ -(2 + \sqrt{3})\tan c)$$

$$A_2 = (-\sqrt{3} - 2,\ -1,\ (2 + \sqrt{3})\tan c)$$

$$B_2 = (1 + \sqrt{3},\ 1 + \sqrt{3},\ -(2 + \sqrt{3})\tan c)$$

$$A_3 = (1 + \sqrt{3},\ -(1 + \sqrt{3}),\ (2 + \sqrt{3})\tan c)$$

$$B_3 = (-(2 + \sqrt{3}),\ 1,\ -(2 + \sqrt{3})\tan c)$$

locando los puntos medios de las barras en los puntos de coordenadas (1,0,0), $(-1/2,\sqrt{3}/2,0)$, $(-1/2,-\sqrt{3}/2,0)$, y tomando c como ángulo de inclinación común de las barras.

Algunas características importantes de la tensegridad

La estructura de tres barras y nueve tendones que hemos descrito y calculado es tan sólo el modelo inicial más simple con el que se inició todo un campo de exploración en el que se conjugan cualidades artísticas, saberes matemáticos y científicos de muy diversas ramas y que está en plena expansión y en busca de aplicaciones. Pero antes de exponer algunas de sus ramificaciones tratemos de resumir cuáles pueden ser las características principales por las que se piensa que estas estructuras pueden ayudar a resolver problemas interesantes.

Por su comportamiento integrado las estructuras de tensegridad se asemejan a organismos vivos. Un elemento cualquiera, una barra o tendón, está ligado al conjunto de tal manera que cualquier mínimo cambio que experimente altera todas y cada una de las partes de la estructura. Y esto ocurre de una forma extraordinariamente directa y simple, sin que medien para ello ni muchos ni muy distintos mecanismos. La economía de esta transmisión de información es asombrosamente sencilla, no interviniendo en ella otros elementos sino los que proporcionan la propia consistencia a la estructura.

El control de la estructura misma en sus posibles modificaciones se puede realizar sin violencia alguna para ella, utilizando las mismas tensiones ya inherentes y simplemente variando sus intensidades. La torsión de algunos de los componentes, que tradicionalmente era el mecanismo normal para las modificaciones estructurales, está aquí ausente. En las estructuras de tensegridad todas las fuerzas que aparecen son fuerzas axiales, y así el encorvamiento o pandeo global de ellas se efectúa sin necesidad de torcimiento de ninguno de sus elementos.

La simplicidad de las estructuras de tensegridad, esencialmente con dos tipos de sencillos elementos, barras y tendones, con su economía de energía y de espacio, hace posible, si es deseable, una redundancia que resulta bien económica desde muchos puntos de vista.

Por otra parte, como hemos visto, las estructuras de tensegridad se prestan a la exploración exacta a través de los métodos precisos de la matemática actual. Si bien es necesario añadir que muchos de los problemas que en su estudio y utilización se presentan, relativos tanto a los aspectos geométricos y más estáticos (determinación de formas posibles de tensegridad) como a otros más dinámicos (estudio y control de las posibles modificaciones de la estructura), resultan tan complejos que los desarrollos actuales de la matemática y la potencia de cálculo de la que disponemos no alcanzan para enfrentarse a ellos con éxito.

¿Tensegridad en la estructura del citoesqueleto?

Del citoesqueleto, la red estructural interna de la célula que resultaba un tanto misteriosa hasta no hace mucho, se sabía al menos que estaba compuesto esencialmente por tres clases de filamentos, llamados microfilamentos, filamentos intermediarios y microtúbulos. Los microfilamentos y los microtúbulos vienen a constituir conjuntos fibrosos más bien rígidos. Los filamentos intermediarios son de naturaleza más flexible y extensibles y actúan como tendones.

Alrededor de 1980 Donald Ingber, entonces estudiante en la universidad de Yale, conocedor de las estructuras de tensegridad, tuvo la sospecha de que la arquitectura interna de la célula podría ser explicada a través de las estructuras de tensegridad. Más adelante tuvo ocasión de realizar interesantes experimentos que parecen corroborar tales intuiciones. En un artículo publicado en enero de 1998 en Scientific American (Investigación y Ciencia, marzo 1998) expresa su convicción de que las propiedades peculiares de las estructuras de tensegridad pueden ayudar muy crucialmente en la exploración de la arquitectura del organismo vivo, tanto a nivel macroscópico como a nivel celular.

Ingber describe en particular sus observaciones en torno a las alteraciones que tienen lugar en la forma de la célula y su citoesqueleto cuando una célula se deposita sobre diferentes tipos de superficie. Si la superficie sobre la que se deposita es un cristal rígido, la célula se aplana y se expande. En cambio, cuando la misma célula se coloca sobre una superficie elástica la célula frunce la superficie y adquiere de nuevo su estructura más esférica. Ingber comenzó a explicarse éste y otros fenómenos a través de las propiedades que podrían resultar si la arquitectura de la célula fuera en realidad la de una estructura de tensegridad, en la que los filamentos intermediarios fueran los tendones y los otros tipos de filamento actuaran como barras (figura 3).

Experimentos semejantes a los de Ingber se pueden llevar a cabo fácilmente. En la figura del modelo de la célula se observa una estructura de tensegridad con seis barras de unos 35 centímetros conectadas por medio de 18 tendones. Esta tensegridad resulta de manera muy simple conectando dos tensegridades del tipo anterior, de tres barras y nueve tendones, para dar lugar a una de tres alturas interesante también por otros motivos. Dentro de ella se encuentra otra pequeña tensegridad de tres barras y nueve tendones. La pequeña *flota* dentro de la grande, manteniéndose en su lugar mediante seis tendones que unen los vértices de los triángulos equiláteros de sus bases a los de los dos triángulos equiláteros de las bases de las alturas primera y tercera de la grande.

La tensegridad total así construida modeliza la célula. Dentro de ella la tensegridad pequeña hace el oficio del núcleo. La forma del núcleo varía al alargar la célula en una dirección como sucede en nuestro modelo. Si el modelo se coloca sobre un cristal y se presiona la parte superior, entonces su núcleo se aplana y se extiende también. Y cuando la presión mengua, la célula y el núcleo vuelven a su posición estable. Y todo ello debido a las propias conexiones internas de todo el entramado.

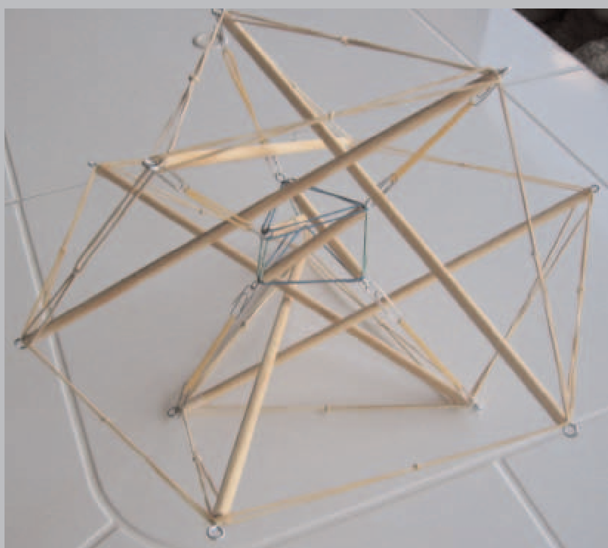

Figura 3. Modelo de la célula.

Teniendo en cuenta las propiedades de las estructuras de tensegridad señaladas en la sección cuarta relativas a su organización holística, la simplicidad, facilidad y economía de su control interno, etcétera, es razonable pensar que a través de tales estructuras se puedan explicar muchas de las propiedades, mecánicas y químicas que en la célula se observan. Ello hace bien plausible el modelo de Ingber y viene a estimular una tendencia clara en muy diversos campos de la ciencia moderna, esto es, tratar de implicar en sus exploraciones los aspectos más intrincados e inesperables de la matemática.

Otras aplicaciones de la tensegridad

El interés teórico de las estructuras de tensegridad es muy claro para matemáticos y físicos. Como en muchos otros casos de la historia de las matemáticas, lo que comenzó como una aventura estética o lúdica se ha convertido también en una fuente de problemas e ideas novedosas en el campo de la matemática, ganando con ello una atracción estética muy peculiar. Éste ha sido el camino de desarrollo de campos tan importantes como la teoría de la probabilidad, la topología, la teoría de juegos, los fractales, el caos y otras muchas ramas de la matemática clásica y actual. Cuanto más se ahonda en el conocimiento de la tensegridad más problemas surgen, muchos de los cuales, aunque de aspecto sencillo, parecen resistirse extraordinariamente a su tratamiento exacto. Algunos de ellos serán mencionados en la sección final de este artículo.

Pero las aplicaciones prácticas de lo que se va descubriendo son ya interesantes. Es claro que en arquitectura, donde se buscan estructuras espaciales que se adapten a ciertos objetivos concretos, las propiedades de la tensegridad han de resultar extraordinariamente fecundas. Tales estructuras pueden llegar a presentar una enorme variedad que estimula la creatividad de los artistas de las formas útiles y bellas en el espacio. La gran facilidad para su modelización y construcción, dejando a un lado el conocimiento riguroso y difícil, invita a cualquiera a la experimentación.

Las estructuras de tensegridad son fácilmente construibles, desmontables, transportables. Por ello se emplean con gran frecuencia en la construcción de grandes espacios cubiertos de uso transitorio. Tiendas de campaña de construcción basada en la tensegridad se distribuyen comercialmente. Construcciones arquitectónicas muy originales inspiradas o enteramente construidas de acuerdo con las técnicas de tensegridad se pueden contemplar en muy diversos lugares. Un ejemplo reciente se encuentra en el interesante pabellón proyectado para la Expo 2002 sobre el lago Neuchatel, en Yverdon, Suiza (véase Bibliografía recomendada).

Es claro que el campo de aplicaciones de la tensegridad es muy amplio aunque todavía poco explotado. El interés creciente de arquitectos e ingenieros de estructuras encontrará probablemente en la tensegridad una gran veta de recursos novedosos.

Una tarea. El tensegrobot

Hemos tenido ocasión de ver cómo la tensegridad es capaz de explicar algunos aspectos de la estructura arquitectónica de los organismos vivos. Esto invita a pensar en las posibilidades que este tipo de estructuras ofrece para construir un robot basado en ellas. Lo llamaremos el tensegrobot. El problema de partida cuando se quiere construir un tensegrobot muy simple, constituido por tres barras y nueve tendones, que se pudiera desplazar en el plano, incluso salvando obstáculos importantes sería el siguiente:

Se dan tres puntos B_1, B_2, B_3 *y las longitudes de las tres barras,* d_1, d_2, d_3. *Determinar las posibles tensegridades de tres barras y nueve tendones con estos elementos.*

Los puntos B_1, B_2, B_3 podrían considerarse como los puntos de apoyo en el suelo del tensegrobot, una tensegridad en la que las tres barras tienen longitudes determinadas. Hasta cierto punto, como se dan 12 parámetros, el problema, salvo simetrías, tiene solución única. Podríamos pensar en construir las tres barras dotadas de un simple mecanismo telescópico interno con el que pudiéramos controlar la longitud de cada una en un instante t dado. Sean éstas $d_1(t)$, $d_2(t)$, $d_3(t)$. Podemos suponer que las barras son ahora de masa uniforme y los tendones no tienen peso. Supongamos que la solución que hemos escogido tiene su centro de gravedad por encima del plano de B_1, B_2, B_3 (podemos pensar que éste es un plano horizontal). Esta solución será el soporte matemático de nuestro tensegrobot. Podemos hacer, variando las longitudes de las barras y la tensión de los tendones, que, permaneciendo B_1, B_2, B_3 fijos, el baricentro de la tensegridad, que podemos calcular de modo fácil, pase por encima de, por ejemplo, la línea B_1, B_2 y así el tensegrobot bascula y gira alrededor de esta línea y pasa a estar apoyado sobre B_1, B_2, A_3. Ahora, se varían de nuevo las longitudes de las barras y tendones y el tensegrobot puede dar un paso más. Este no es el lugar para describir los cálculos necesarios para llevar a cabo este movimiento del tensegrobot, pero se puede decir que no son excesivamente complicados.

Las ventajas que presentaría un robot semejante parecen importantes. Sus elementos son de estructura muy sencilla, idéntica en cada barra y cada tendón, y en cada uno hay una función, de acortamiento o extensión, fácilmente automatizable. El control sería relativamente simple y necesitaría de poca energía para su realización. Se trata de una estructura ligera, como una especie de araña que puede moverse de diversos modos girando y evolucionando sobre sí misma para salvar muchos tipos de obstáculos fácilmente. Su simplicidad de organización proporcionaría una estructura económica, fácilmente armable y desmontable.

Cuestiones en torno a la tensegridad

Como ha quedado dicho, los problemas matemáticos pendientes en torno a la tensegridad son interesantes y profundos. La determinación de las formas posibles de tensegridad, sobre todo en ausencia de simetrías que ayuden al planteamiento de las ecuaciones de equilibrio pertinentes, presenta uno de los campos iniciales de investigación que se viene explorando a través de diferentes métodos, cada uno con sus ventajas e inconvenientes, lo que pone de manifiesto la ausencia de soluciones definitivas. Incluso en el caso aparentemente simple de la tensegridad general de tres barras y nueve tendones hay cuestiones profundamente intrigantes. Por citar una, ¿hasta qué punto hay libertad para escoger los seis vértices de las barras o las tres rectas donde se encuentran las barras?

Cuando uno considera la posibilidad de contar con otros elementos de construcción semejantes basados en los mismos principios, como por ejemplo muelles entre los vértices de la tensegridad en lugar de tendones, el campo se amplía extraordinariamente. Por ejemplo, en la tensegridad clásica de tres barras y nueve tendones se puede sustituir cada uno de los tendones por un muelle separando los vértices, que ejerza una fuerza de la misma intensidad y contraria a la del tendón correspondiente, así, la tensegridad conserva su estabilidad. Pero la riqueza y variedad de formas posibles que con ello se añaden son inmensas.

Por supuesto, cuando se desciende al campo de las aplicaciones, la escultura y las diferentes técnicas, las cuestiones abiertas son innumerables. Snelson y otros han aprovechado a fondo las intuiciones originales para crear nuevas y muy interesantes obras de arte, pero creo que aún se está muy lejos de alcanzar los límites posibles en este tipo de creaciones. Y cuando se pone los ojos en las aplicaciones más cercanas a las técnicas de diseño y construcción parece claro que apenas se ha comenzado a explotar un montón de ideas interesantes en torno a las estructuras de tensegridad.

Bibliografía recomendada

- Uno de los artículos más interesantes para conocer lo que se pensaba hasta 1997 es: Hanaor, A., Tensegrity: Theory and Application. En: J. François Gabriel J. (ed.). Beyonde the Cube: The Architecture of Space Frames and Polyhedra. New York: J. Wiley, 1997; 385-408.
- El artículo más adecuado, citado en el texto, referente a aplicaciones a la biología es: Ingber, D. E., The Architecture of Life, Sci Am, Jan 1998, 48-57. En: Investigación y Ciencia, marzo 1998.
- Una descripción extensa del pabellón a orillas del lago Neuchatel, en Yverdon, Suiza, se encuentra en Ellisabeth Diller, Desenfocado, Oeste 014 (Rev Colegio Arquitectos Extremadura), 2001; 24-31.
- Para tener una idea de los diversos problemas actuales en torno a la teoría y práctica de la tensegridad en temas tales como cálculo de estructuras, mecánica, control, diseño, ingeniería,... me parece aconsejable acudir a los artículos más recientes publicados por importantes especialistas tales como R. Connelly, S. Pellegrino, R. Skelton, W. O. Williams, D. Williamson. A través de internet se pueden encontrar fácilmente referencias exactas.