

Estructuras tensegríticas: ingeniería y arquitectura novedosas

VALENTÍN GÓMEZ JÁUREGUI (*)

RESUMEN Las estructuras tensegríticas [1] son realmente asombrosas: constan de barras que están flotando en el aire, tan sólo sujetas mediante cables a otras barras que, curiosamente, también flotan en el aire. Quizás sea precisamente esto lo que a la gente le entusiasma de la Tensegridad, contemplar este fenómeno "mágico" que son incapaces de entender.

Esta comunicación sirve de introducción a estos sistemas de "compresión flotante": indaga en su controvertido origen y autoría, profundiza en sus fundamentos físicos y estructurales, clasifica y ordena los diferentes tipos de tensegridades, analiza su presencia en la ciencia y el arte y finalmente aborda sus actuales y futuras aplicaciones en ingeniería y arquitectura. En definitiva, pretende ser una guía que oriente en este nuevo mundo que se abre camino.

TENSEGRITY STRUCTURES: NEW ENGINEERING AND ARCHITECTURE

ABSTRACT *Tensegrity structures are really amazing: they are made of struts floating in the air, only linked by cables to other bars that, curiously, float in the air too. Maybe this is the main reason why people like Tensegrity so much, observing a "magic" phenomenon that they are not able to understand. This paper is an introduction to these "floating compression" systems: trying to make the controversial origins and authorship clearer, understanding the structural and physical principles, making a first classification of different types of tensegrities, analyzing its presence in Science and Arts and finally, studying its future applications in Engineering and Architecture. In summary, this paper pretends to be a guide to explain the basics of this new world that is starting to develop.*

Palabras clave: Tensegridad, Estructuras, Tensión, Compresión flotante, Kenneth Snelson.

1. ¿QUÉ ES LA TENSEGRIDAD?

La definición del término Tensegridad es esencial para todas las futuras consideraciones que se harán a lo largo de esta obra, o de cualquier trabajo que trate sobre ella. Que una estructura sea considerada como tensegridad o no, es algo que depende directamente de la definición aceptada de entre todas las emitidas durante los últimos 50 años. De hecho, desde hace dos décadas, infinidad de estructuras, sistemas y fenómenos naturales han sido denominados empleando este vocablo, cuando realmente no lo eran ni se le acercaban.

Diversas definiciones han sido establecidas por diferentes especialistas en la materia. El autor [1], en un intento de explicar clara pero detalladamente lo que denota la palabra "tensegridad", sugiere definirla así:

La Tensegridad es un principio estructural basado en el empleo de componentes aislados comprimidos que se encuentran dentro de una red tensada continua, de tal modo que los miembros comprimidos (generalmente barras) no se tocan entre sí y están unidos únicamente por medio de componentes traccionados (habitualmente cables) que son los que delimitan espacialmente dicho sistema.

En todo caso, el mejor modo para entender lo que es y cómo funciona un sistema tensegrítico es examinando un modelo o, mejor, construyéndolo.

Aunque mostrar estas construcciones de modo gráfico no sea tan ilustrativo, pues no permite analizar su geometría tridimensional, palparlos o deformarlos y ver su reacción, la figura 1 muestra una escultura realmente espectacular y sorprendente de Kenneth Snelson [2], uno de los padres de la *compresión flotante*, como él lo llamaría. Las barras están flotando en el aire, tan sólo sujetas mediante cables a otras barras... ¡que también flotan en el aire! No existe un soporte sólido y rígido que las vaya apuntalando; ese puñado de varillas y tendones, aparentemente caótico, conforma una viga en voladizo que da la sensación de que se va a caer en cualquier momento, a la primera ráfaga de viento.

Quizás sea precisamente esto lo que a la gente le entusiasma de la Tensegridad, contemplar este fenómeno "mágico" que son incapaces de entender.

2. ORIGEN E HISTORIA: LA CONTROVERSIA

Probablemente, lo más conocido de la Tensegridad no sean sus fundamentos técnicos ni su potencial funcionalidad, sino la controversia generada en torno a su origen y, más concretamente, a la autoría de su descubrimiento.

Tres hombres han sido considerados los inventores de la Tensegridad: Richard Buckminster Fuller, David Georges Emmerich y Kenneth D. Snelson. Aunque todos ellos han clamado para sí el privilegio de ser el primer descubridor, el segundo de ellos, Emmerich (Debrecen, Hungría, 1925-1996) evidenció que el primer prototipo de sistema tensegrítico, denominado "Gleichgewichtskonstruktion", fue creado por Karl Inganson en 1920.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MSc Architecture. tensegridad.es@gmail.com

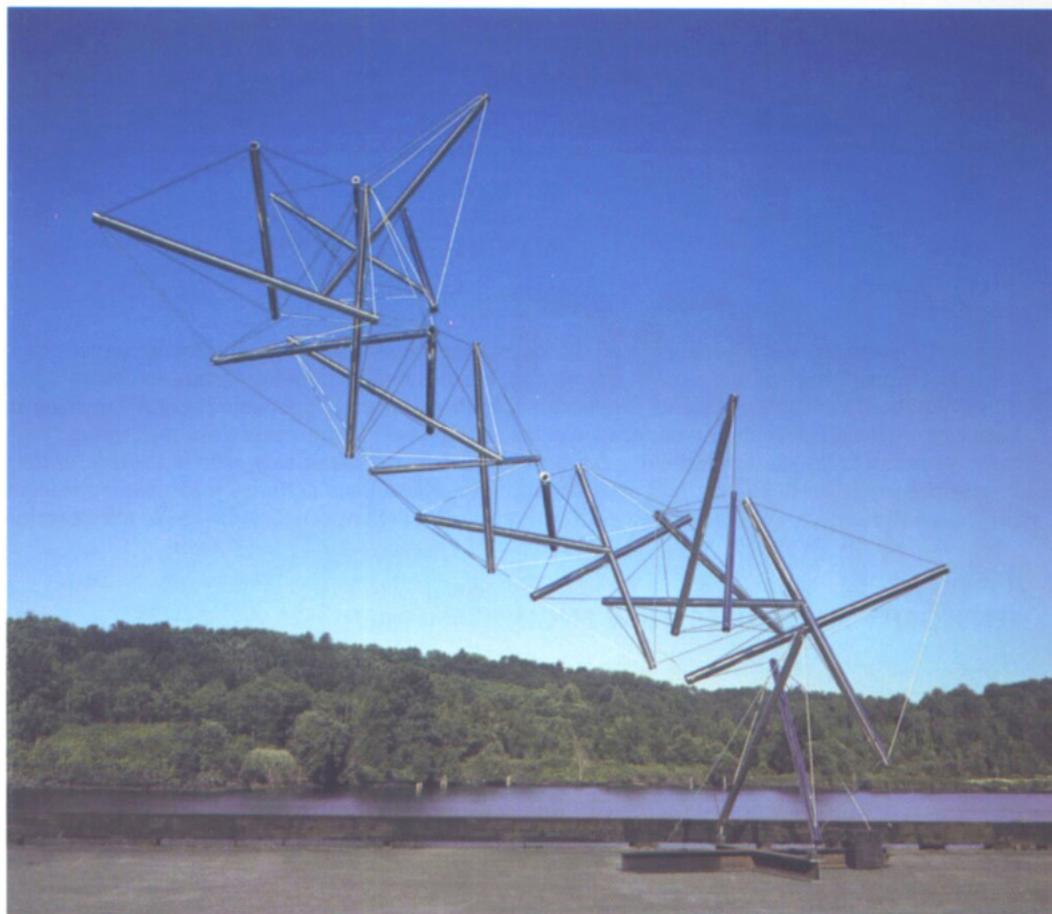


FIGURA 1. "Sleeping Dragon" de Kenneth Snelson. Imagen tomada de www.kennethsnelson.net.

Durante el verano de 1948, Fuller trabajó como profesor, sustituyendo a otro docente que hubo de ausentarse, en el Black Mountain College (Carolina del Norte, EEUU); aunque no muy conocido por entonces, era un carismático y peculiar inconformista que ejercía de arquitecto, ingeniero, matemático, cosmólogo, poeta e inventor (registrando 25 patentes a lo largo de su vida). Por su parte, Snelson era por aquella época un estudiante de artes plásticas de la Universidad de Oregón, que por diversas circunstancias atendió las clases de modelos geométricos impartidas por Fuller. Tal y como él mismo reconoce 40 años después, mortificándose por ello en cierto modo, Snelson quedó prendado de lo que aprendió en aquellas clases y por eso, profundamente influido por dichas enseñanzas, durante el siguiente otoño comenzó a estudiar diversos modelos tridimensionales. Como resultado, creó esculturas de diversas índoles bajo la influencia de Calder, Albers y Fuller, que fueron evolucionando progresivamente hasta que finalmente acabaron generando un nuevo tipo de estructura hasta entonces nunca concebida. En sus propias palabras, *"elementos sólidos fijados entre sí en el espacio, sustentados uno con el otro únicamente por medio de miembros en tracción. Estaba bastante impresionado con lo que había realizado"*.

Cuando al verano siguiente le mostró su trabajo a Fuller para preguntarle por su opinión, éste se dio cuenta de que tenía ante sus ojos la respuesta a la pregunta que se había estado planteando durante largo tiempo. En palabras del profesor: *"Durante 21 años, antes de conocer a Kenneth Snelson, yo había estado indagando en los conceptos de la Tensegridad (...). A pesar de mi descubrimiento, designación y desarrollo tanto de la geometría vectorial*

multidimensional como de la Tensegridad tridimensional, había sido incapaz de integrar ambas y así descubrir la Tensegridad multidimensional de cuatro, cinco y seis ejes de simetría." (Fuller, 1961).

Al mismo tiempo, pero independientemente, David Georges Emmerich, probablemente inspirado en la estructura de loganson antes mencionada, empezó a investigar diferentes tipos de estructuras basadas en prismas tensados y sistemas tensegríticos más complejos, que él denominaría "estructuras tendues et autotendants", o estructuras tensadas y auto-pretensadas. Como resultado, definió y patentó sus "redes auto-pretensadas", que eran exactamente la misma clase de esculturas sobre las que estaban trabajando Snelson y Fuller al otro lado del Atlántico.

Incluso aunque al principio Fuller mencionara a Snelson como el autor del descubrimiento, después de un tiempo empezó a hacer referencia al mismo como "mi Tensegridad". De hecho, Tensegrity es un término que él mismo acuñó en 1955 como contracción de "Tensional Integrity" (Integridad Tensional), de modo que aludiendo a ello con el nombre que él eligió, insinuaría sutilmente al mundo que el invento era suyo. *"Crear este extraño nombre era su estrategia para apropiarse de la idea como si fuera suya"*, cita Snelson en varias ocasiones.

Obviamente, su pupilo se quedó bastante desconcertado. A finales de 1949, Fuller escribió a Snelson comentándole que su nombre pasaría a los anales de la historia, pero algunos años más tarde cambiaría de opinión, insinuando a su alumno que se mantuviera en el anonimato durante algún tiempo más. En esta tesitura, Snelson se vio empujado a insistir en que se reconociera su esencial aportación, lo que

conseguió durante la exposición de algunas de las obras de Fuller instalada en el Museo de Arte Moderno de Nueva York (MOMA) en 1959. Así pues, por fin se dio crédito públicamente a su contribución respecto al nacimiento de la Tensegridad.

Un par de años más tarde, Fuller se referiría de nuevo a Snelson en los siguientes términos: "(...) en un momento importante, durante mi exploración de las estructuras de compresión-discontinua tensióncontinua, mi colega Kenneth Snelson aportó una ayuda intuitiva extraordinaria, y por ello debe ser oficialmente mencionado en el discurso formal de mis ideas sobre el descubrimiento de la Tensegridad."

¿Quién inventó la Tensegridad? ¿O quién la descubrió? Resulta evidente que la respuesta no es tan evidente. Al autor se le ocurre, sin ánimo de ser original en sus afirmaciones, que fue la sinergia (término empleado muy frecuentemente por Fuller) generada por la suma de esfuerzos del profesor y el estudiante lo que propició el origen de la Tensegridad. Para zanjar el asunto, se podría considerar que la invención de las tensegridades corresponde a Kenneth Snelson mientras que el descubrimiento de la Tensegridad se debió a Buckminster Fuller.

3. DEFINICIONES Y PRINCIPIOS BÁSICOS

Durante muchos años, algunos autores han estado buscando una "definición definitiva" de Tensegridad que no sea ambigua y pueda ser aceptada por toda la comunidad científica. Es esencial especificar de un modo preciso lo que es una estructura tensegrítica porque, dependiendo de lo que se entienda por ello, una misma estructura podría ser considerada como un verdadero o falso ejemplo de este tipo de construcciones.

3.1. DEFINICIONES

Las primeras disquisiciones sobre la Tensegridad, ya citadas en los capítulos precedentes, fueron dadas por los propios autores de las patentes intentando explicar lo que habían descubierto.

En su artículo "Tensegrity" [3], Buckminster Fuller explicaba profusamente los principios y conceptos básicos que gobernaban los sistemas "tensionales-integrales", pero no consiguió dar una definición concisa de los mismos. No obstante, también empleó una breve frase que desde entonces ha pasado a los anales de la historia de la Tensegridad: "Los elementos en compresión devienen pequeñas islas en un mar de tensión" (ibid). Algunos años más tarde, da otra explicación más extensa en su libro "Synergetics" [4]: "La Tensegridad define un principio de relación estructural en el cual la forma de la estructura está garantizada por el continuo y finitamente cerrado comportamiento de los elementos traccionados del sistema y no por el discontinuo y localizado comportamiento de sus elementos comprimidos." (Fuller, 1975b, 700.011).

Otro de los "padres" de la Tensegridad, David G. Emmerich, expuso en su patente que la invención podría ser descrita de un modo no restrictivo, es decir, mediante el uso de ejemplos, algunos de los cuales fueron incluidos gráficamente en dicho documento. De este modo, evitaba la difícil tarea de dar una definición concisa al respecto.

Quizás fue Kenneth Snelson, el tercero en discordia y el primero en construir el "Simplex" (fig. 2), el más claro a la hora de enunciar una definición. Aunque prefiriera evitar el término tensegridades, acuñado por Fuller, y aludir a ellas como "estructuras de compresión flotante", las describe como sigue: "La Tensegridad describe un sistema estructural cerrado compuesto por un conjunto de tres o más barras comprimidas dentro de una red de tendones atirantados, estando ambas partes mutuamente combinadas de tal suerte que las barras no se tocan entre sí pero empujan de dentro hacia fuera contra los nudos de dicha red atirantada para así formar una firme, triangulada y pretensada unidad de tensión y compresión."

Algunos años más tarde, Anthony Pugh [5] describió la Tensegridad de forma bastante sintética y precisa, siendo su definición aceptada casi universalmente por el resto de especialistas por su correcta y clara constitución, probablemente la primera de su clase: "Un sistema tensegrítico se establece cuando un conjunto discontinuo de componentes sometidos a

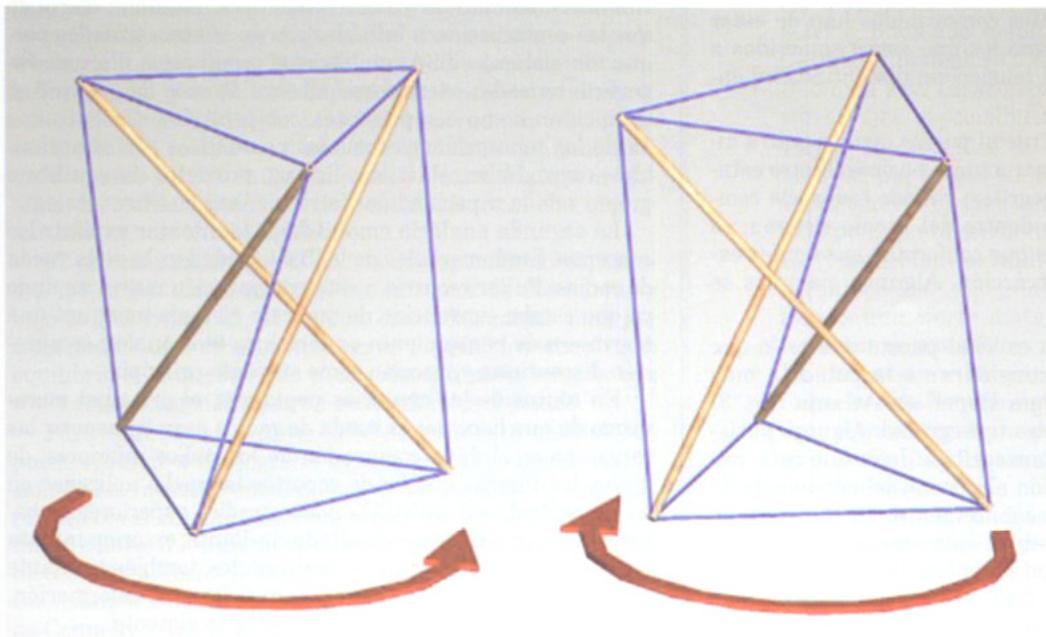


FIGURA 2. Representaciones enantiomórficas del "Simplex": dextrorso y sinistrorso.

compresión interactúa con un conjunto continuo de elementos sometidos a tracción definiendo un volumen estable en el espacio." (Pugh, 1976, p.3).

Por último, René Motro [6] se propuso distinguir dos conceptos bien diferentes. Este ingeniero francés hizo la distinción entre la definición "basada en las patentes" y la definición "extendida". Esta última tiene algunos puntos en común con la que diera Anthony Pugh, pero añade otros matices: los elementos comprimidos se encuentran dentro de la continua red atirantada y el sistema es estable por sí mismo, lo que permite que esté en equilibrio independientemente de reacciones externas. Como resultado, René Motro explica lo siguiente: "Un sistema tensegrítico es un sistema que está en equilibrio, es estable por sí mismo y comprende un conjunto discontinuo de componentes comprimidos dentro de un conjunto continuo de componentes atirantados." (Motro, 2003, p. 19).

3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Si considerásemos a esta última enunciación como suficientemente clara y concisa, sería posible hacer la distinción entre verdaderas y falsas tensegridades, dadas sus características. Resulta de interés desgranar uno a uno los conceptos englobados en dicha descripción, tal y como su autor sugiere:

En equilibrio y estable por sí mismo: Equilibrio estable porque el sistema puede recuperar su posición original después de que alguna acción externa lo haya alejado de ella; y por sí mismo porque dicho equilibrio es independiente de cualquier condición ajena al mismo, no depende de fuerzas externas, ni siquiera de la gravedad o de anclaje alguno, debido a su estado de pretensado inicial. Es estable incluso en el espacio fuera de la atmósfera.

Componentes: este término se opone al de "elemento", empleado en otras definiciones, ya que igual que generalmente se trata de una barra o un cable, también puede hacer referencia a una membrana, un volumen de aire, un átomo o un ensamblaje de componentes más elementales.

Comprimidos o traccionados: en lugar de comprimidos y traccionados, porque la clave está en que cada componente, en su totalidad, ha de trabajar a compresión o a tracción, no a ambas a la vez o de forma mixta (como podría ser considerada la flexión).

Tensión continua y compresión discontinua: ya que, como se ha comentado, los componentes comprimidos han de estar aislados entre sí, mientras que los que están sometidos a tracción crean un "océano" de tensión sin discontinuidad entre nudos.

Dentro: Este es un concepto crucial puesto que permitirá diferenciar entre dos tipos de estructuras básicas: Motro establece que un sistema es tensegrítico cuando todos sus componentes comprimidos están dentro del propio sistema, es decir, cuando los componentes que conforman sus bordes exteriores están sometidos a tracción. Algunos ejemplos se ilustran en las figs 2, 4 y 6.

Esta última característica es vital puesto que es lo que nos permite, por ejemplo, considerar a la cubierta más grande del mundo, la "Georgia Dome" en Atlanta (fig. 3) como una pura o como una falsa tensegridad. Algunos puristas no consideran que sea tensegrítica dado que está anclada a un anillo de compresión alrededor del entramado de cables y barras y que, consecuentemente, su contorno no está traccionado. Así pues, según esta opinión, estaría incluida más apropiadamente en el ámbito de las estructuras pretensadas, como una "cubierta de barras y cables" más que como una "cubierta tensegrítica".



FIGURA 3. Georgia Dome, del estadio de los Falcons de Atlanta, la mayor cúpula del mundo.

3.3. PRINCIPIOS BÁSICOS

3.3.1. Principales Conceptos

Hasta el siglo pasado, las técnicas y filosofías constructivas habían sido relativamente simples: todo se mantenía erguido en su lugar por acción del peso de los materiales, luego la continuidad tensional era de carácter eminentemente compresivo. Las estructuras tensegríticas están enfocadas desde una perspectiva diametralmente opuesta. En lugar de emplear una estrategia de "peso y empuje" están ideadas como un "sistema de tensiones equilibradas omnidireccionales" [7]. Yendo aún más lejos, se podría decir que no tienen que estar apoyadas en lugar alguno ya que están pretensadas y disfrutan de un equilibrio interno propio, luego no dependen de la gravedad para asegurar su propia estabilidad; la tensión generada por la atracción terrestre es reemplazada por las tensiones multidireccionales de cada uno de sus miembros.

3.3.2. Algunas analogías

Los principios de la Tensegridad se puede llegar a comprender de forma más intuitiva mediante el empleo de analogías. La más común de todas ellas es la comparación entre las estructuras neumáticas y las tensegríticas. Existe la teoría de que las construcciones inflables son sí tensegridades porque son sistemas auto-equilibrados compuestos por una superficie tensada exterior que alberga átomos de gas que se comportan como componentes comprimidos discontinuos. Tanto las tensegridades como los neumáticos son comprimibles, expandibles, elásticos, ligeros, provistos de equilibrio propio y de la capacidad de distribuir las tensiones locales.

La segunda analogía empleada para intentar explicar los conceptos fundamentales de la Tensegridad es la de la rueda de radios. Fuller recurría a esta comparación muy a menudo ya que estaba convencido de que este ejemplo inauguró una nueva era de pensamiento en términos tensionales: compresión discontinua y tracción como sustento principal.

En contra de las creencias populares, el principal mecanismo de que hace uso la rueda de radios para transmitir las cargas no es el de la compresión de los radios inferiores; de hecho, las fuerzas que ha de soportar la rueda, aplicadas en su eje central, son resistidas por los radios superiores trabajando a tracción. Como resultado, la llanta exterior intenta ovalarse, por lo que los radios horizontales, también mediante un esfuerzo de tracción, sirven para evitar tal deformación, mientras que la llanta se ve comprimida localmente.

3.3.3. Creación de los modelos más simples

El caso más primitivo y ancestral de las estructuras pretendidas no fue la rueda de radios, sino la cometa. Este juguete, que se empleó ya en tiempos remotos, tiene su fundamento en dos ligeros travesaños ubicados en forma de cruz que se rigidizan por medio de una cuerda tensada que une los cuatro extremos en forma de cuadrilátero. Nos encontramos, pues, con una estructura bidimensional que no puede ser considerada una tensegridad ya que sus dos elementos comprimidos se están tocando por su zona central.

No es una coincidencia, por tanto, que Snelson obtuviera su primera escultura tensegrítica a raíz de experimentar con módulos en forma de cometa hechos de madera. Tal es así que en su patente empleó estos módulos en forma de X para explicar cómo se podían construir torres de tensión continua-compresión discontinua y para describir el proceso con el que se puede obtener la estructura tensegrítica más sencilla, el "Simplex", también denominado "Equilibrio Elemental" o "Prisma-T de 3 Barras" (fig. 2).

3.3.4. Análisis estático

Para entender el comportamiento de equilibrio estable independiente de reacciones externas, es necesario realizar un análisis estático de las fuerzas de tensión y compresión que intervienen en cada nudo. Cada vértice en cuestión ha de estar en equilibrio para así dotar de estabilidad total a cada elemento y, así, a la estructura. En ocasiones, un estudio mecánico pormenorizado puede resultar excesivamente complejo dado el alto número de elementos y de nudos, las importantes deformaciones que se dan lugar y el comportamiento no lineal del sistema, lo que hace conveniente el uso de ordenadores y programas informáticos diseñados al efecto.

La figura 2 puede servir de ilustración de las fuerzas que entran a formar parte en este tipo de análisis. Cada barra está sometida a la tensión que generan sobre ella los tirantes atados a sus extremos. Como en toda celosía tridimensional, en cada nudo, y para cada barra, debe haber al menos tres cables que garanticen su estabilidad (aunque las condiciones de equilibrio de barras sujetas a tan sólo dos cables es posible y fue demostrada con la construcción del Skylon de la Exposición Británica de Londres de 1951). Y así fue señalado por Snelson: "Sé que necesito un mínimo de tres cables en cualquier extremo de cada barra". La resultante de cada triada de fuerzas en cada nudo, añadido a la insignificante influencia del peso de los componentes, ha de estar alineado con el eje longitudinal de cada barra, porque de otro modo éstas estarían sometidas a una fuerza oblicua que generaría un momento flector en las mismas, y provocaría que el sistema, inestable, intentase acomodarse a las tensiones internas hasta encontrar el equilibrio.

El mismo razonamiento podría ser aplicado a los tirantes, los cuales están atados a los extremos de dos barras y bajo la influencia de, al menos, otros dos cables más por cada nudo. Como consecuencia, cada tendón se encuentra en equilibrio si está sometido a una determinada tensión que suele estar ocasionada por un esfuerzo de pretensado.

Para una revisión en detalle de todo este análisis, se puede recurrir a bibliografía especializada, ya que la extensión de los razonamientos no hacen aconsejable su inclusión en esta obra. Por ejemplo, recientemente Mark Schenk resumió y comparó los métodos cinemático y estático para establecer el equilibrio de las estructuras tensegríticas simétricas, citando a su vez los trabajos tanto de Murakami como de Connelly y Terrel respectivamente.

3.4. PROPIEDADES

- Las tensegridades destacan por su ligereza en comparación a otras estructuras de similar resistencia o, si se prefiere, tienen una gran capacidad portante si se comparan a otras estructuras de peso análogo.
- No existen elementos redundantes, puesto que cualquier nuevo tendón añadido a la estructura sirve para conferirle de mayor rigidez.
- Como ya se ha dicho, no dependen de la gravedad gracias a su auto-equilibrio, luego no requieren de ningún anclaje o fijación para mantener su forma o geometría. Son, pues, sistemas estables en cualquier posición.
- La mayoría de los sistemas tensegríticos son enantiomórficos. Esto significa que aparecen con igual geometría pero dispuesta en sentido inverso (dextrorso y sinistrorso), como si de una simetría especular se tratara (fig. 2). Por ejemplo, la mano izquierda y la mano derecha son enantiomórficas, ya que son idénticas sin ser superponibles.
- Módulos elementales tensegríticos pueden ser ensamblados juntos para así conformar torres, emparrillados o conglomerados tensegríticos compuestos por iguales o distintas figuras elementales.
- Cuanto mayor sea el pretensado de un sistema tensegrítico, mayor será su capacidad portante o resistente.
- El grado de tesado del pretensado es directamente proporcional a la cantidad de espacio ocupado.
- Debido a que los componentes a compresión son discontinuos, sólo trabajan localmente; la compresión está ceñida a líneas de acción cortas y específicas, luego éstos no son susceptibles de colapsar por pandeo.
- Por la razón argüida en el punto anterior, la discontinuidad de los esfuerzos de compresión, las tensegridades no sufren torsión alguna.
- Poseen la propiedad de la sinergia, donde el comportamiento de todo el conjunto no es predecible a partir del comportamiento de sus componentes considerados individualmente.
- La resiliencia o rigidez de la estructura depende de los materiales empleados y de su modo de ensamblarlos, pudiendo resultar, en función de ellos, muy flexibles y maleables o de gran rigidez y firmeza.
- Debido a esta característica, son muy sensibles a las vibraciones, especialmente bajo cargas dinámicas.
- Tienen la capacidad de responder globalmente como un todo, por lo que cualquier carga puntual a la que se les someta es transmitida uniformemente y absorbida por toda la estructura.
- La "elasticidad multiplicativa" es una propiedad inherente a las tensegridades: cuando se separan dos barras una cierta distancia, el acortamiento de los tendones es muchísimo menor que esta distancia.
- La respuesta a las cargas impuestas es no lineal. Como resultado, son más flexibles a cargas moderadas, pero su rigidez aumenta rápidamente a medida que dicha fuerza aumenta, como le sucede a los puentes colgantes.
- Algunas tensegridades, bajo cargas axiales, experimentan una rotación de sus elementos en torno a dicho eje. El sentido de la rotación depende del tipo de enantiomorfismo de la figura (dextrorso o sinistrorso).

3.4.1. Ventajas

- La red de tensiones multidireccionales encierra y asimila los esfuerzos volubles que aparecen en la estructura, por lo que no hay puntos de debilidad local.
- Dada la capacidad de comportarse como un todo, resulta extremadamente factible el empleo de materiales de forma económica y rentable, ofreciendo altos valores resistentes para una reducida cantidad de material.
- Como apuntara Fuller, las tensegridades no sufren a torsión, y el pandeo es un fenómeno raramente presente en ellas debido a la reducida esbeltez de sus elementos comprimidos.
- Las fuerzas que aparecen en el conjunto, se transmiten a través de la distancia más corta entre los puntos englobados en el fenómeno resistente, razón ésta por la que se dice que sus miembros están posicionados de la forma más adecuada para soportar dichas cargas.
- El hecho de que estas estructuras vibren ostensiblemente en todo su conjunto indica que están transfiriendo fuerzas muy rápidamente, y por tanto dichos esfuerzos no aparecen localmente.
- Esto es muy indicado para aquellos casos en los que sea necesario absorber impactos o vibraciones sísmicas. Consecuentemente, serían muy útiles en áreas susceptibles de sufrir terremotos, movimientos de tierra, erupciones volcánicas, etc.
- Tienen una excepcional capacidad para crear sistemas más complejos mediante el ensamblaje de otros más simples.
- Para estructuras a gran escala, el proceso constructivo se vería importantemente facilitado al no necesitar dichas construcciones de andamiajes adicionales. La propia estructura sirve de andamio para sí misma.
- La indeterminación cinemática de las tensegridades es, en ocasiones, una ventaja. En sistemas plegables, sólo una pequeña cantidad de energía sería necesaria para cambiar su configuración, ya que la forma cambia con el equilibrio de la estructura y viceversa. Al hilo de esto, Skelton y Sultan han estado estudiando el uso de sistemas tensegríticos como sensores y activadores.

3.4.2. Inconvenientes

- Las agrupaciones tensegríticas aún han de resolver el problema de la congestión de barras. A medida que algunos diseños crecen en tamaño, sus montantes empiezan a interferirse entre ellos.
- Se constata, según Ariel Hanaor, un "*relativamente alto grado de deformaciones y escasa eficiencia del material, en comparación con estructuras convencionales geométricamente rígidas*".
- La compleja fabricación de estas construcciones es también una barrera para el desarrollo de las mismas. Las configuraciones esféricas y abovedadas son complicadas de ejecutar.
- Para mantener el estado de auto-tensión, es necesario someterlas a un estado de pretensado que requeriría de fuerzas muy elevadas para su estabilidad, especialmente para aquellas de grandes dimensiones.

4. APLICACIONES EN INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Aunque en este apartado sólo se citen algunos ejemplos representativos de cada una de las aplicaciones que tiene la Tensegridad, el lector avezado sabrá entender que esto es sólo una somera muestra del prometedor potencial que tiene este tipo de estructuras.



FIGURA 4. Cúpula tensegrítica 8v de doble capa realizada por Burkhardt.

4.1. CÚPULAS

Probablemente, uno de los mejores libros sobre cúpulas fue editado por Z.S Makowski en 1984, "Analysis, Design and Construction of Braced Domes". Resulta realmente significativo el hecho de que no menciona a las cúpulas tensegríticas, aunque sí se haga eco de las patentes de Fuller y los trabajos de Pugh y Kenner. Que este punto sirva para ilustrar el grado de reconocimiento que tienen este tipo de estructuras.

Además de las cúpulas de barras y cables, también denominadas cubiertas de cables radiales, como la Georgia Dome, existen otro tipo de cubiertas puramente tensegríticas. Llegados a este punto, es importante mencionar la labor de investigación de Robert W. Burkhardt sobre este tema.

Aparte de otras obras, destaca entre ella el desarrollo de "A Technology for Designing Tensegrity Domes and Spheres" [8], dedicado al diseño de cúpulas y esferas de compresión flotante y que está en continua actualización. Dicho autor se centra en las mallas de doble capa (fig.4), en las que una red externa y otra interna de cables están interconectados por barras, así como de otros cables, para así conseguir la triangulación necesaria para la estabilidad y rigidez de las tensegridades.

Entre las utilidades que podrían tener las cúpulas tensegríticas destacan las edificaciones, puentes o refugios antisísmicos (debido a su resiliencia y flexibilidad), superestructuras capaces de albergar subestructuras que aislen o confinen ciertas áreas a preservar, refugios o tiendas de campaña plegables, confinamiento en grandes reservas de animales voladores y aves, recintos musicales, pabellones (para exposiciones, ferias, mercados), marquesinas de entrada a eventos especiales, protección ante meteoritos o rayos solares en futuras colonias espaciales, etc.

4.2. TORRES

Siguiendo lo que ya bosquejara en los croquis de sus patentes, Snelson ha construido infinidad de mástiles durante los últimos 40 años, a saber: 4-way tower (1963), Tetra Tower (1963-2001), Needle Tower (1968), E.C. Column (1969-81), Needle Tower II (1969) y Penta Tower (2001-03). Las susodichas están configuradas como ensamblajes de prismas tensegríticos elementales, que montados uno sobre otro son capaces de configurar torres de más de 30 m. de altura.

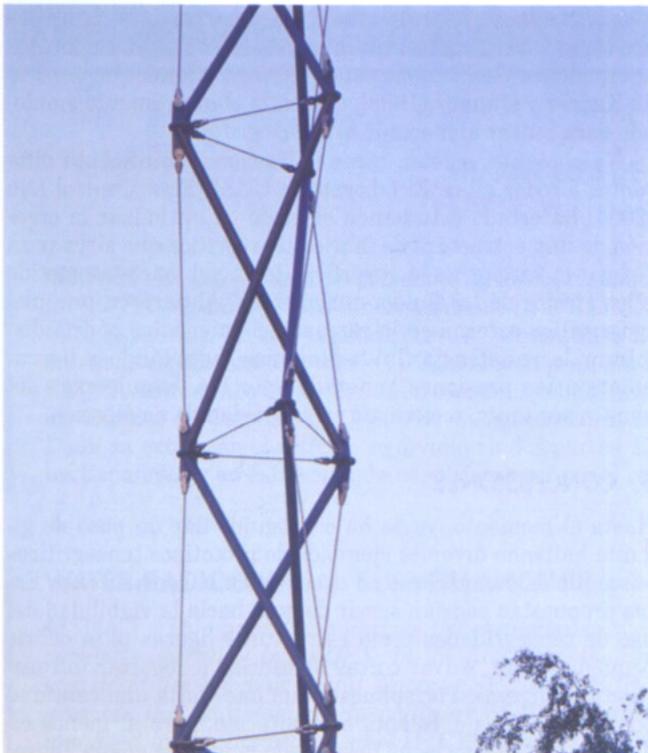


FIGURA 5. Torre Tensegrítica de Rostock (Alemania), por Mike Schlaich.

Jörg Schlaich, uno de los más grandes ingenieros contemporáneos, estimó categóricamente que la Tensegridad no tiene apenas pragmatismo alguno, mas que el mero deleite escultórico: "food for thought". Sin embargo, ha sido precisamente su firma, Schlaich Bergermann und Partner, guiada por su hijo Mike Schlaich, quien ha levantado la torre tensegrítica más alta del mundo (62.3 m). La Torre de Rostock (fig. 5), inspirada en la ZigZag Tower (1997) de Snelson, y

concebida como un símbolo para la feria de 2003 de Rostock (Alemania), consta de seis módulos simples girados (8.3 m de altura cada uno), confeccionados a partir de tres tubos de acero ($\varnothing=273$ y $t=12$ a 40 mm), y seis cables de alta resistencia, tres de ellos horizontales ($\varnothing=30$ y 50 mm) y otros tres diagonales de mayor sección ($\varnothing=50$ y 75 mm).

Dicha torre se configura alternando módulos "Simplex" dextrorso y sinistrorso, pero con la particularidad de que éstos están rotados 30° , por lo que las barras de un nivel entran en contacto con las barras de niveles adyacentes. Desde un estricto punto de vista, este factor sería suficiente para catalogarla de tensegridad "impura", pero puesto que los tres conjuntos de barras adyacentes no entran en contacto entre sí, el sistema podría ser catalogado como tensegrítico auténtico (aunque de clase 2 porque al menos dos barras confluyen en un solo nodo).

Otras aplicaciones para torres tensegríticas que podrían tener cabida son la construcción de pararrayos, torres de telecomunicaciones, parques eólicos, elementos estéticos, etc.

4.3. ARCOS

En los últimos años se ha estado desarrollando un proyecto de investigación en la Universidad Tor Vergata (Roma) en colaboración con instituciones francesas e italianas para construir un arco tensegrítico de 50 m. de luz. El objetivo estaría encaminado a estimar las acciones efectivas del viento en este tipo de estructuras, y más concretamente en este arco modular confeccionado con octaedros expandidos. También se estudia el empleo de arcos tensegríticos que sirvan de soporte de membranas para cobertura de amplios espacios, según una idea de Adriaenssens y Barnes.

Asimismo, es reseñable el proyecto de un arco diseñado por Passera y Pedretti para la Expo '02. Se trataba de una pasarela curva de 70 m. de radio elaborada en base a módulos "Simplex". Aunque finalmente no fuera ejecutada, estaba previsto que en su interior llevara alojada una escala metálica por la que pudiera "trepar" el transeúnte volando sobre el lago de Neuchâtel en Bienne (Suiza).

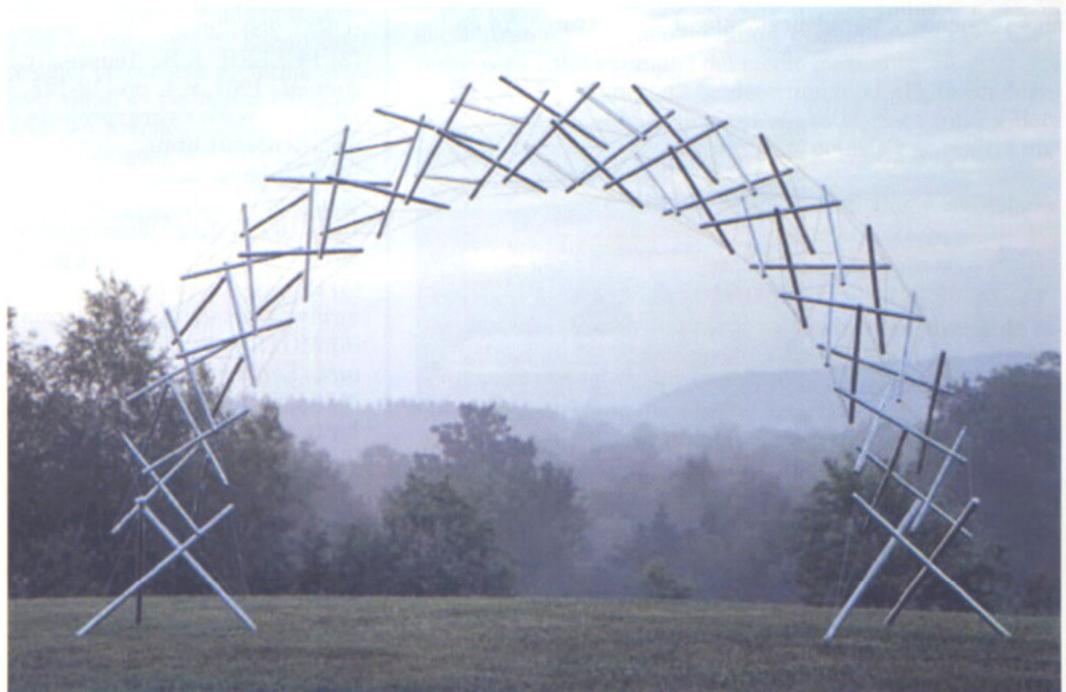


FIGURA 6. Arco tensegrítico construido por Kenneth Snelson.

4.4. ESTRUCTURAS PARA EL ESPACIO EXTERIOR

Desde los comienzos de la "era tensegrítica", una de las aplicaciones más recurrentes para la compresión flotante fue la relativa a las colonias lunares, lo cual es en cierto modo comprensible dado el contexto socio-cultural y científico-tecnológico de la época. Ya en 1961 Buckminster Fuller reveló sus más novedosas invenciones: futuribles prototipos de satélites y estructuras lunares basados en la integridad tensional, plegables, extremadamente ligeras, autoestables en ausencia de gravedad, "omntrianguladas" y pretensadas. Básicamente, serían mallas esféricas en las que islas locales de compresión actuaran sólo como rigidizadores.

No deja de ser interesante la investigación desarrollada por Tibert y Pellegrino [9]. El primero ha estado dedicado intensamente a las tensegridades plegables, particularmente para aplicaciones espaciales, concretamente en cuanto a antenas reflectoras y mástiles despleables; por su parte, el segundo ha centrado su tarea indagatoria en el campo de grandes artefactos retráctiles aplicados a la aeronavegación. Pero también han sido muchos los artículos y publicaciones de Sultan, Skelton y Masic entre otros, que versan sobre estructuras tensegríticas controlables, habilitadas con sensores, desarrollos telescópicos, tensegridades robóticas inteligentes, etc.

Podría alegarse en este caso que ya no estamos tratando con arquitectura o ingeniería convencional, tal y como las conocemos; no hay duda de ello; sin embargo, no dejan de ser arquitectura e ingeniería, ni dejan de ser susceptibles de aplicar los principios estructurales de la Tensegridad para solventar las circunstancias particulares de una situación a la que vamos a tener que enfrentarnos tarde o temprano.

4.5. OTRAS APLICACIONES

Finalmente, para concluir con las aplicaciones de la Tensegridad y a modo de curiosidad, se apuntan brevemente otros desarrollos que han tenido como punto de partida y sujeto principal a este tipo de estructuras. Es el caso de los numerosos artículos de mobiliario tensegrítico que se ha comenzado a comercializar en los últimos años. Esta nueva tendencia incluye el diseño de sillas (fig. 7), mesas, lámparas, hamacas, etc.

Asimismo, existen varios juegos infantiles que emplean las características de las tensegridades para atraer a los más pequeños y, paradójicamente, a sus mayores. Ya en los



FIGURA 7. Silla tensegrítica como ejemplo de mobiliario.

años 70 empezaron a aparecer patentes, como la de Mogilner et al. (1972) que acabarían comercializándose con las aportaciones de Flemons como "Skwish Classic", o como la de Kittner y Quimby (1988), que sería el instrumento empleado para lanzar al mercado el "Tensegritoy".

No obstante, existen otras aplicaciones totalmente diferentes a todas ellas. El laboratorio UCSD Flow Control Lab (2004) ha estado estudiando el modo de optimizar la creación de una estructura de fábrica tensegrítica que sirva para reducir la fricción de la superficie de un submarino sometido a los efectos de los fluidos turbulentos. Al parecer, una piel tensegrítica externa en la carcasa del submarino podría disminuir la resistencia fluido-dinámica, adaptándose ligeramente a las presiones generadas por las turbulencias del agua y, por tanto, mejorando su capacidad de navegación.

5. CONCLUSIONES

Hasta el momento, ya se ha conseguido dar un paso de gigante hallando diversos ejemplos de prototipos tensegríticos susceptibles de aplicarse en el sector de la construcción. Estas propuestas podrían servir de guía hacia la viabilidad del uso de tensegridades como estructuras ligeras para cubrir pequeñas luces, salvar cortas distancias o soportar infraestructuras ligeras. Por supuesto que hace falta una cantidad enorme de trabajo, talento e inspiración, pero al menos en algunos sectores ya se ha desterrado la idea de que la Tensegridad queda reducida al mundo del Arte.

La Tensegridad, al aislar completamente compresión y tracción en diferentes elementos, podría tener una enorme importancia para la formación de técnicos estructuralistas. La construcción de maquetas aporta una excelente intuición acerca del comportamiento mecánico de las estructuras, ayudando a comprender mejor la transmisión de fuerzas y la rigidez de los cuerpos en general.

6. REFERENCIAS

- [1] GÓMEZ JÁUREGUI, V.: *Tensegridad. Estructuras Tensegríticas en Ciencia y Arte*.- Santander: Universidad de Cantabria, 2007.
- [2] SNELSON, K.: *Kenneth Snelson*, [on-line], New York (USA). 2004-2008 <http://www.kennethsnelson.net>.
- [3] FULLER, R.B.: Tensegrity. En *Portfolio and Art News Annual*, 1961, n.4, pp.112-127, 144, 148. También accesible en <http://www.rwgrayprojects.com/rbfnote/fpapers/tensegrity/tenseg01.html>.
- [4] FULLER, R.B.: *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*.- New York: MacMillan Publishing Co., Inc., 1975.- También accesible en <http://www.rwgrayprojects.com/synergetics/synergetics.html>.
- [5] PUGH, A.: *An Introduction to Tensegrity*.- Berkeley (California): University of California Press, 1976.
- [6] MOTRO, R.: *Tensegrity: Structural Systems for the Future*.- London: Kogan Page Science, 2003.
- [7] KENNER, H.: *Geodesic Math and How to Use It*.- Berkeley (California): University of California Press, 1976.
- [8] BURKHARDT, R.W.: *A Technology for Designing Tensegrity Domes and Spheres*, [online], Cambridge (USA), 1999-2004 <http://www.channel1.com/users/bobwb/prospect/prospect.htm#sec:app>.
- [9] TIBERT, G. y PELLEGRINO, S.: Deployable Tensegrity Masts. En *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit*, 7-10 Abril 2003, Norfolk (USA). También accesible en <http://www2.mech.kth.se/~gunnart/AIAA-2003-1978.pdf>.