

APLICACIÓN DE MALLAS DE TENSEGRIDAD COMO ESTRUCTURAS LIGERAS

Gómez-Jáuregui, V^{1,*}, Otero, C¹, Arias, R¹, Manchado, C¹

(1) Dpto. Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica, Univ. de Cantabria, España

RESUMEN:

Este trabajo está dividido en cuatro partes. La primera introduce el concepto de Tensegridad, que plasma la conversión del símbolo escultórico al hito estructural. Seguidamente, se presentan las diversas propuestas de mallas tensegríticas de doble capa (MTDC) que se han realizado a lo largo de su corta historia (60 años). Las MTDC son estructuras de Tensegridad que contienen dos mallas tensadas paralelas, conectadas por otra capa intermedia compuesta por elementos comprimidos y traccionados verticales y/o diagonales.

En la tercera parte, se expone una nueva metodología, llamada Manipulación de Rot-Umbela que, de manera eminentemente geométrica, sirve para la generación de nuevas estructuras tensegríticas. Las Manipulaciones de Rot-Umbela, aplicadas a las capas inferior y/o superior de las mallas de doble capa (MDC) convencionales o tensegríticas, consisten en la apertura de cada vértice en un cierto polígono al cual se le aplica una rotación o giro particular. Se consigue así un potente sistema para "tensegritizar" estructuras espaciales de distintos tipos y abrir una línea de investigación muy interesante en el campo de la Tensegridad.

Finalmente, se muestran algunas aplicaciones para este tipo de mallas tensegríticas, así como proyectos en los que han sido tenidas en cuenta. Se manifiestan de este modo sus propiedades más características, como son la ligereza, flexibilidad, eficiencia, facilidad de plegado, capacidad de absorber vibraciones, etc.

Palabras clave: Tensegridad, estructuras, mallas, doble-capa, Rot-Umbela.

APPLICATION OF TENSEGRITY GRIDS AS LIGHTWEIGHT STRUCTURES

ABSTRACT:

This paper is divided into four parts: Firstly, as an introduction, the concept of Tensegrity, which manifests the conversion of sculptural landmarks into structural milestones, is explained concisely. Following this, a perspective of the historical proposals for double-layer tensegrity grids (DLTGs) over their relatively short history (60 years) is presented. DLTGs are tensegrity spatial systems containing two parallel networks of members in tension forming the top and bottom chords, whose nodes are linked by vertical and/or inclined web members under compression and tension.

In the third part, a new methodology is described mainly in geometrical terms; known as Rot-Umbela Manipulation, it is used for generating DLTGs. Rot-Umbela Manipulations, applied to the upper and/or lower layers of double layer grids (DLGs), either conventional or tensegrity, consist of opening a vertex in the plane for obtaining a certain polygon, which is then rotated by a determined angle. This powerful operation opens an endless catalogue of different types of DLTGs and a very interesting line of research in the field of Tensegrity.

Finally, some applications for these kinds of tensegrity grids are shown, as well as some projects where they have been taken into account. In this way, the most characteristic properties are presented, like lightness, flexibility, efficiency, deployability, capacity of absorbing vibrations, etc.

Keywords: Tensegrity, structures, double-layer, grids, Rot-Umbela

* tensegridad.es@gmail.com

1. Introducción a la Tensegridad

Cuando fue preguntado por su opinión acerca de la Tensegridad, Jörg Schaich, el brillante ingeniero alemán, contestó: “Food for thought”¹. Su traducción extendida al castellano sería “aquello que supone un estímulo mental para el pensamiento”. Pocas explicaciones más concisas y descriptivas se han dado sobre la Tensegridad, además de las míticas “compresión flotante” de Snelson y las “islas de compresión en un mar de tracciones” de Fuller. Sin embargo, estas definiciones no son válidas para ayudar a entender cómo se sostiene la “Needle Tower”, símbolo e hito estructural por excelencia en el campo de la Tensegridad, sino para sintetizarlos de modo metafórico y abstracto una vez comprendidos.

Es curioso que, transcurridos más de 60 años desde el controvertido descubrimiento/invencción de las estructuras tensegríticas (Gómez-Jáuregui, 2009), no exista un consenso acerca de su definición universal y unificada. A este respecto, hay numerosa literatura (Motro, 2003; Burkhardt, 2008a; Skelton y de Oliveira, 2009), pues en función de la definición que se quiera considerar, determinadas estructuras podrían formar parte de la familia de las tensegridades o podrían quedar fuera por no cumplir con alguno de sus requisitos. Es el caso de las cubiertas de radios de bicicleta, como la Georgia Dome, la más grande del mundo con sus 227x185 m. Pese a comulgar indudablemente con los principios de la compresión flotante, el hecho de necesitar anclarse a un anillo exterior de hormigón armado que trabaja a compresión, hace que muchos autores no la cataloguen dentro del catálogo de las tensegridades denominadas “puras”.

Pero, ¿qué es la Tensegridad? Se podría decir que la Tensegridad, en mayúsculas, es un principio estructural basado en el empleo de componentes comprimidos, aislados entre sí, 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 o membranas) que son los que delimitan espacialmente dicho sistema, consiguiendo que el conjunto se encuentre en un estado de autotensión y autoequilibrio estable (Gómez-Jáuregui, 2007). Una tensegridad, en minúsculas, sería una construcción erigida según dicho principio estructural.

Entonces, ¿qué es lo que NO es Tensegridad? Volviendo al ejemplo de la Georgia Dome, dicha cubierta no sería tensegrítica puesto que no está delimitada por elementos traccionados, sino por un contorno perimétrico comprimido al que se tiene que anclar, sin el cual ni sería estable, ni estaría tensada, ni estaría en equilibrio. Evidentemente, habría que descartar también cualquier otro tipo de interpretación esotérica, biológica, sociológica o terapéutica que hoy en día se ha apropiado del término “tensegridad” con dudoso rigor científico-técnico.

Dadas las importantes limitaciones que nos ofrece esta definición, resultaría complicado diseñar una estructura de este tipo sin haber visto un ejemplo previo. La muestra más simple es, valga la denominación, el Simplex, o prisma tensegrítico triangular, compuesto por tres barras diagonales, tres cables “verticales” y tres cables en cada una de las bases (Figura 1). Es más, el trabajo de obtener una tensegridad nueva y diferente, después de haber visto este modelo o cualquier otro más complejo, tampoco es un asunto baladí. La idiosincrasia de las tensegridades tiene doble filo: por una parte, estas distribuciones espaciales no son intuitivas en absoluto, y requieren de

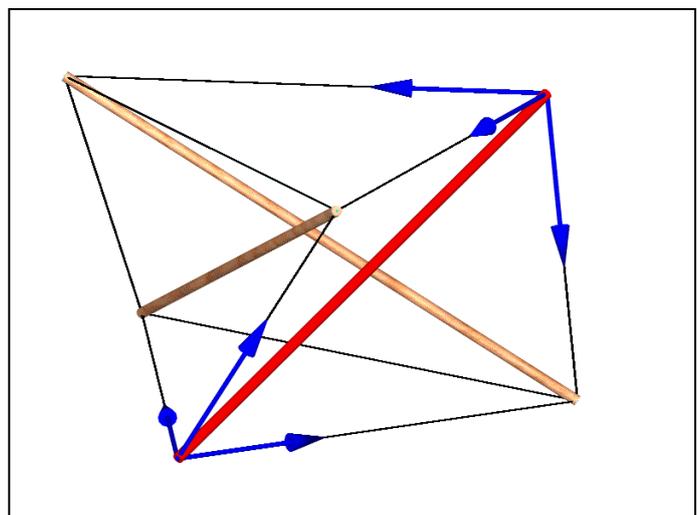


Figura 1. Equilibrio de fuerzas de una barra en un Simplex

¹ Correspondencia personal con Gómez-Jáuregui, V. 8 de julio de 2004.

mucho tiempo para analizarlas y, posteriormente, comprenderlas; por otra parte, y afortunadamente, es precisamente esa configuración escurridiza y casi inmaterial, la que les confiere un semblante mágico y misterioso, pues siempre es sorprendente ver cómo una barra se sostiene en el aire colgada mediante cables que no se agarran a ningún punto fijo, sino únicamente a los extremos de otras barras que, paradójicamente, también están flotando del mismo modo en el vacío. Todo ello le confiere una belleza y una plasticidad que, emanando desde la escultura, llega al campo de la ingeniería y la arquitectura.

Es precisamente en estos dos campos en donde la compresión flotante se ha convertido en un hito estructural especialmente en la última década. Más que probablemente, los últimos avances en las ciencias de la computación han sido un acicate y revulsivo en el impulso que la Tensegridad ha tenido recientemente. Esto puede ser debido no solamente a la (relativa) facilidad en calcularlas y analizarlas mediante programas especializados, sino porque, como dice Donald Knuth (1973), a menudo se ha dicho que uno realmente no entiende algo hasta que se lo tiene que explicar a otra persona, cuando en realidad la verdadera comprensión no se produce hasta que uno se lo tiene que explicar a un ordenador. Y si bien es cierto que dichos avances aún no se han materializado en aplicaciones óptimas y eficientes como las que se proyectan con otras estructuras ligeras de barras y cables convencionales, no es menos cierto que cada vez son más las investigaciones, estudios y publicaciones que se dedican a esta tarea. Sirva como referencia el hecho de que, en las bases de datos de Scopus y Web Of Knowledge, en la última década se han generado el 83% de todas las publicaciones aparecidas desde los años 70.

2. Mallas Tensegríticas de Doble Capa (MTDC)

De entre todas las tipologías desarrolladas hasta el momento en el campo de la Tensegridad, las mallas tensegríticas, junto con las torres o mástiles, son quizás las que más estudios y proyectos han acaparado. Las MTDC son estructuras de Tensegridad que contiene dos mallas horizontales paralelas tensadas, unidas por otra capa intermedia compuesta por elementos comprimidos y traccionados verticales y/o diagonales.

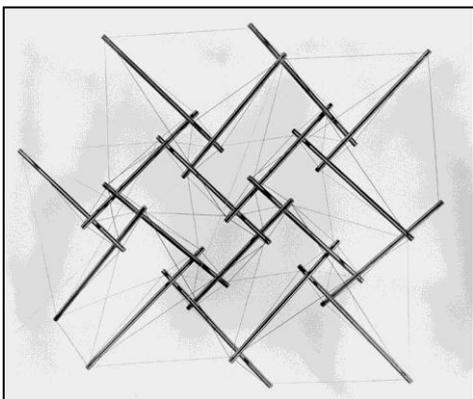


Figura 2. Square Planar Piece, Emmerich

Los primeros prototipos nacieron en los años 60, principalmente con las aportaciones escultóricas de Kenneth Snelson (Heartney, 2009). Algunos de esos diseños no fueron mostrados públicamente hasta fechas recientes (Burkhardt, 2008b), pese a que podrían haber resultado de indudable interés para su análisis y estudio. Un ejemplo concreto es la MTDC "Square Planar Piece" de la Figura 2, construida en 1961 (antes de que fuera concedida ninguna patente) y que curiosamente también aparecería posteriormente en el catálogo de Emmerich.

En los años 70, Pugh (1976) propuso otros tipos diferentes de mallas de Tensegridad desde un punto de vista eminentemente geométrico. No obstante, no sería hasta la siguiente década cuando se tomara una perspectiva más estructural y tensional, profundizando en otros aspectos como la búsqueda de forma, resistencia, eficiencia, rigidez, estabilidad, deformación, etc. Ariel Hanaor (1987; 1991; 1994), experimentó de modo más intensivo con la yuxtaposición de prismas tensegríticos (para mallas planas) y pirámides truncadas (para configuraciones abovedadas). Por su parte, René Motro (1987) estudió mallas compuestas por pirámides tensegríticas truncadas de cuatro barras, o semicuboctaedros tensegríticos (Figura 3.a). Estas composiciones son esencialmente las mismas mostradas por Emmerich (1964) en su primera patente, tal y como muestra la Figura 3.b), pero anexionándolos de tal forma que los extremos de sus barras se tocaran entre sí.

Los principales inconvenientes obtenidos entre ambos autores fueron la dificultad para la búsqueda de forma de la configuración pretensada inicial, las grandes deformaciones ante cargas verticales y la gran concentración de esfuerzos si se quiere que ningún cable deje de trabajar a

tracción. Sin embargo, estos dos últimos aspectos podrían ser minimizados radicalmente mediante el diseño de MTDC rígidas, es decir, con cables adicionales que eliminasen los mecanismos infinitesimales internos. Asimismo, se encontraron diversas ventajas, como la capacidad resistente aun cuando alguno de sus cables fallara, la distribución de esfuerzos en todos los elementos, la posibilidad de diseñar sistemas plegables y la relativa (dependiendo del tipo de contacto entre barras) disminución de peso comparadas con los mallas de doble capa convencionales para un comportamiento estructural similar.

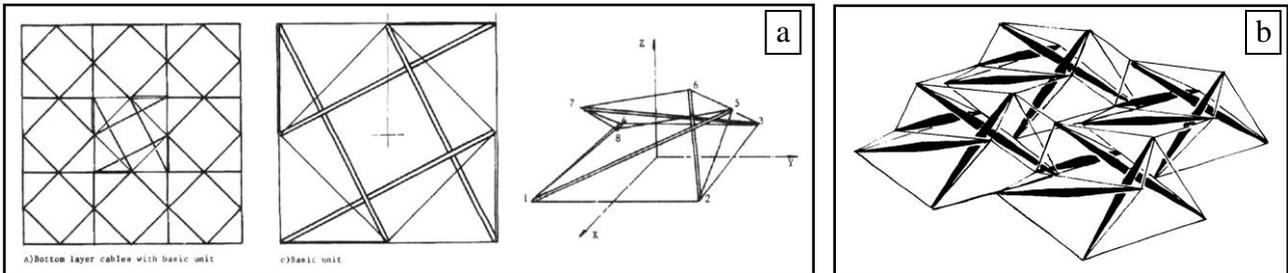


Figura 3. Mallas de semicuboctaedros tensegríticos propuestos por Motro (a) y por Emmerich (b)

Paralelamente, aunque desde un punto de vista meramente constructivista, Emmerich (1988) sacaba a la luz un completo catálogo de estructuras, modelos y proyectos llevados a cabo por él mismo y por sus estudiantes. Uno de los capítulos de su libro está dedicado exclusivamente a lo que él denominaba “redes planas autotensadas”, aunque de manera restrictiva, pues solo tendría en cuenta las MTDC compuestas por yuxtaposición de módulos estables. Curiosamente, algunas de dichas composiciones ya habían sido descubiertas por otros autores, como es el caso de la Figura 2 y la Figura 3.a.

A finales de los años 90, surgen nuevos estudios, como los de Kono et al. (1999), que abordan un tipo de malla ya investigado por Snelson y Emmerich, pero con fines teórico-prácticos. Suponen un hito estructural, puesto que culminan con la construcción de un prototipo de MTDC de 80m² de superficie y 9 m de luz, compuesta por trípodes interconectados, concluyendo que la construcción de este tipo de mallas no sólo es sencilla sino que además puede emplearse para cubrición de pequeñas luces. Desde un punto de vista más teórico, Wang comenzaría un profundo análisis comparativo que terminaría casi una década más tarde con un riguroso estudio de construcciones de barras y cables, así como de tensegridades modulares en forma de MTDC (Wang, 2004). En particular, diferenció dichas estructuras según fuera su módulo básico, la yuxtaposición y tipo de unión entre ellos, la conexión o aislamiento entre elementos a compresión, la rigidez o flexibilidad del conjunto, la ubicación y tipo de los apoyos, etc. Una de sus principales conclusiones fue que las estructuras en las que los elementos a compresión están en contacto, es decir, de barras contiguas articuladas, son mucho más eficientes a efectos de comportamiento estructural (resistencia, rigidez, ligereza, distribución de tensiones, etc.) que las de barras aisladas. Aunque las primeras se acercan en eficiencia estructural a las estructuras espaciales convencionales, como la Space Deck o malla de semioctaedros, no llegan a igualarlas del todo.

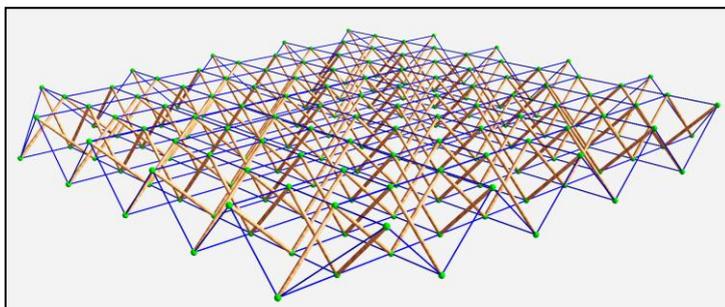


Figura 4. MTDC de Expanders V22 del LMGC de la U. Montpellier

El Laboratorio de Mecánica e Ingeniería Civil (LMGC) de la Universidad de Montpellier, liderado por René Motro, ha estado albergando, dirigiendo y supervisando numerosos proyectos dedicados a esta temática durante más de diez años. Su enfoque ha estado centrado en muy diversos aspectos, como metodologías de búsqueda de forma (form-finding), estados de pretensado, sistemas desplegados,

técnicas constructivas, control activo del sistema, dimensionamiento óptimo, etc. Una de sus aportaciones más relevantes (Raducanu, 2001) fue el diseño, análisis y construcción de nuevas MTDC compuestas por varias alineaciones, entrelazadas y con simetría rotacional entre sí, en

donde sus barras se entrecruzan en zigzag (Figura 4), similares a alguna de las mallas planas que construyera Snelson en los años 60. Durante dicho proceso de estudio, se construyeron y testaron diferentes prototipos a gran escala (hasta 82 m²), y como resultado se desarrolló una patente.

Finalmente, y aunque en este breve resumen no se hayan podido exponer todas las experiencias realizadas con esta tipología estructural, es digno de reseñar el trabajo de investigación y análisis de Frank Biele (2010), que compara la realización de una estructura de cubierta para un hangar mediante cuatro alternativas. Analiza el comportamiento de una malla plana convencional, una cubierta de cables y barras y dos tipos de MTDC: con barras contiguas y con barras aisladas. Concluye que la solución más eficiente y ligera (aunque no la más económica) es la tensegrítica de 4 direcciones que propusiera Raducanu (2001) con cables de fibra de carbono.

3. Manipulaciones de Rot-Umbela

El presente concepto, ideado para “tensegritizar” mallas de doble capa (MDC) convencionales, se deriva de otro ya existente, pero que tan sólo se había aplicado a los poliedros. Gancedo (1988) definió manipulación en umbela a la operación que consiste en abrir una dirección dada en el espacio de tal modo que se obtenga un polígono regular con sus vértices ubicados en el plano perpendicular a dicha dirección. Análogamente, aplicado a mosaicos y MDC, definiremos como Manipulación de Rot-Umbela a una manipulación en umbela convencional en la cual la dirección dada es siempre perpendicular al plano en el que esté definida dicha red, pero con las salvedades de que los polígonos generados no tienen por qué ser regulares y que pueden girarse tomando como eje de rotación dicha dirección original (Gómez-Jáuregui et al., 2011).

Se dice que un vértice tiene valencia v cuando en él confluyen v aristas del mismo plano. Si tras sufrir una Manipulación de Rot-Umbela se convierte en un polígono de u lados, su “valencia de umbela” será u . Para aquellos vértices en los que la valencia de vértice coincide con la valencia de umbela ($u=v$), como sucede en los nudos A y B de la Figura 5 ($u=v=4$), se dirá que tiene una “valencia de umbela natural”. El nodo C, de valencia 4, sufre una Rot-Umbela de valencia 3, por lo que se genera un triángulo en vez de un cuadrilátero como en los otros casos.

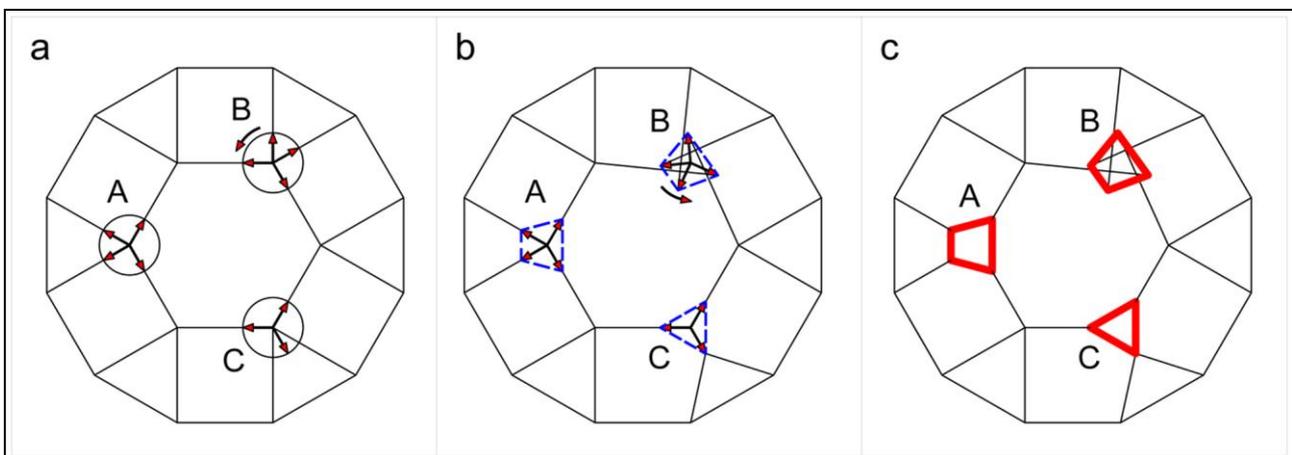


Figura 5. Manipulaciones de Rot-Umbela en un mosaico semirregular

Otro ejemplo, esta vez aplicado a MDC, es el que se ejecuta a la malla de la Figura 6.a: (4,6,12)-Ba1-Ta1, según nomenclatura de Gómez-Jáuregui et. al. (Accepted). Si se ejecuta la Rot-Umbela con valencia 3 ($u=3$) en las capa superior e inferior y a continuación se le aplica un determinado giro (en este caso 150°), se genera una MTDC en la que las barras están aisladas e inmersas en una red continua de elementos traccionados (Figura 6.b). La agrupación de barras, conformando trípodes tensegríticos, es similar a la que ya emplearon Snelson, Emmerich y Kono. Esta relevante circunstancia sirvió de impulso para colegir que podría haber una similitud apreciable y significativa entre estos tipos de mallas y dichos procesos constructivos.

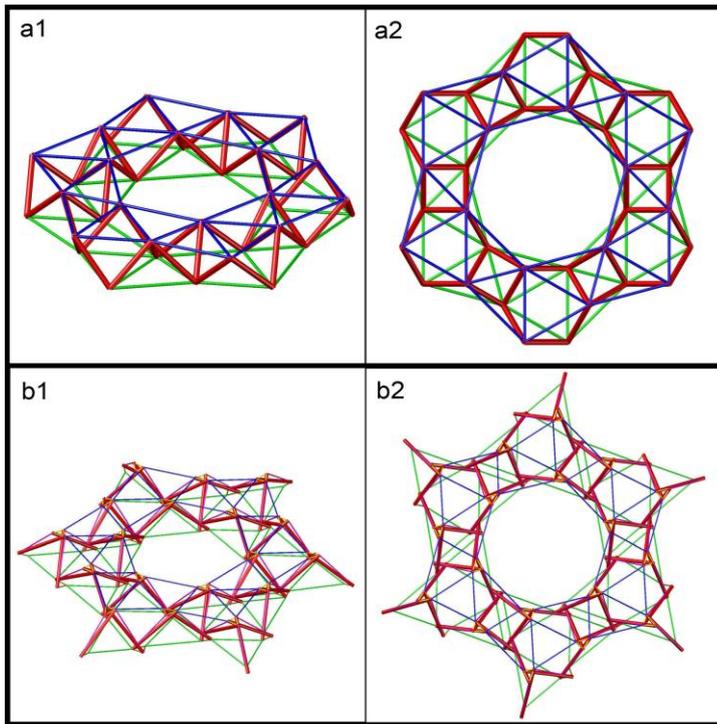


Figura 6. a) MDC (4,6,12)-Ba1-Ta1 2) Manipulación de Rot-Umbela (u=3) aplicada a sus dos capas

Así, diferentes mallas convencionales y tensegríticas han sido sometidas a Rot-Umbela para comprobar si eran capaces de generar otras MTDC. Como primer hito, se consiguieron resultados satisfactorios a partir de una malla de Le Ricolais. Aplicando una Rot-Umbela de $u=3$ con rotación media de 120° a ambas capas superior e inferior, el resultado final no es otro que la obtención de la MTDC de Kono et. al. Otro hallazgo importante se ha obtenido trabajando con la Space Deck o malla de semioctaedros (Gómez-Jáuregui, Submitted), a la que aplicándole en la capa superior una Manipulación de Rot-Umbela de valencia natural 4 ($v=u=4$) seguida por un giro de 145° en torno a cada vértice, se obtiene la misma malla tensegrítica de la Figura 3, compuesta por semicuboctaedros contiguos, con la que comenzó su

análisis de propuestas René Motro en los años 80.

Como se puede intuir, la geometría final depende de varios parámetros, a saber, radio de apertura de los vértices, ángulo de giro de los nuevos polígonos creados, estado de pretensado de la estructura, etc. Tanto en las tensegridades cilíndricas o prismáticas, como en las piramidales truncadas, existe un ángulo de giro (α) entre ambas bases que depende exclusivamente del número de barras de la estructura (n), según la fórmula $\alpha = 90^\circ - 180^\circ / n$. En las Manipulaciones de Rot-Umbela, como comentado previamente, también aparece un ángulo de giro dependiente de otros tantos factores, pero que no es el objetivo de este texto desarrollar ahora.

En definitiva, lo aquí mostrado apunta a que nuevas e interesantes configuraciones se pueden hallar eligiendo con tiento la malla espacial de origen y la Rot-Umbela adecuada, lo que permitiría generar un vasto catálogo de MTDC por explorar.

4. Ventajas y aplicaciones

No es arriesgado afirmar que una de las mayores propiedades que tienen las tensegridades son su intrínseca belleza y plasticidad. Decía Théophile Gautier que aquello que se hace útil deja de ser bello; y tomando esto como norma, las estructuras de compresión flotante deberían de carecer de aplicaciones. Son varios los expertos que así lo consideran, empezando por su inventor, Kenneth Snelson, que siempre ha mantenido esta postura desde su experiencia creativa. Comparten esta misma tesis incluso renombrados ingenieros que han dedicado ímprobos esfuerzos en su análisis, como Mike Schlaich, Arturo Ruiz de Villa o, incluso, Ariel Hanaor. Este último, en correspondencia personal con Biele (2010), afirmaba que hace falta coraje para reconocer que un tema al que le has dedicado buena parte de tu vida profesional tiene tan limitadas aplicaciones. Ahora bien, dejaba las puertas abiertas, como buena parte de los expertos en el tema, a soluciones tensegríticas en el espacio exterior, desplegadas o con fines estéticos.

Después de lo ya comentado, parece complicado pensar que merezca la pena emplear un mínimo de esfuerzo en una tipología estructural tan particular. No obstante, sigue habiendo numerosos profesionales de la ingeniería y la arquitectura que se empeñan en obtener resultados prácticos de estos sistemas constructivos. Intentan sacar provecho de sus propiedades más características, como son la ligereza, flexibilidad, eficiencia, facilidad de plegado, capacidad de absorber vibraciones, etc. Algunos estudios de arquitectura (ABDR, Lift Architects, Orambra, Blue Office Architecture, etc.) incorporan elementos tensegríticos cada vez más a menudo. Las propuestas de

MTDC son principalmente para la cubrición de espacios públicos, desde pequeñas marquesinas, hasta cubiertas de más luz integradas en centros de exposición, bibliotecas, museos, etc. También hay proyectos en los que estructuras tensegríticas planas se habilitan como paredes técnicas o muros de separación sin requerimientos de función portante.

Pero sin embargo, donde más posibilidades y potencial están demostrando tener, junto con otras tipologías, como por ejemplo las estructuras lineales (mástiles, torres, etc.), es en el campo aeroespacial y robótico, donde las propiedades de ligereza y desplegado son esenciales. También se están incorporando a proyectos de ingeniería civil, en pequeñas pasarelas desplegables o apuntando maneras en grandes puentes pseudotensegríticos, como el Kurilpa Bridge de Brisbane.

BIBLIOGRAFÍA

- Biele, F.H., 2010. Alternate suspension system for space shuttle avionics shelf. Masters Thesis. California State University.
- Burkhardt, R., 2008a. A practical guide to tensegrity design , 2nd ed., Cambridge (USA).
- Burkhardt, R., 2008b. Snelson's Planar Pieces. Available at: <http://www.trip.net/~bobwb/ts/synergetics/photos/planar.html> [Accessed January 26, 2011].
- Emmerich, D.G., 1964. Construction de réseaux autotendants. French Patent FP1377290.
- Emmerich, D.G., 1988. Structures tendues et autotendantes, Ecole d'architecture de Paris la Villette, Paris.
- Gancedo Lamadrid, E., 1988. Estudio de propiedades métricas de las radiaciones centrales en poliedros convexos. PhD Thesis. Universidad de Cantabria, Santander.
- Gómez-Jáuregui, V., 2009. Controversial origins of Tensegrity. In: Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings/Alberto Domingo and Carlos Lázaro, eds. Editorial de la Universitat Politècnica de Valencia.
- Gómez-Jáuregui, V., Submitted. Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela. Inf Constr.
- Gómez-Jáuregui, V., 2007. Tensegridad : Estructuras tensegríticas en ciencia y arte, Universidad de Cantabria, Santander.
- Gómez-Jáuregui, V., Arias, R., Otero, C. and Manchado, C., 2011. New configurations for double-layer tensegrity grids. Structural Engineers World Congress 2011. Como (Italy).
- Gómez-Jáuregui, V., Otero, C., Arias, R. and Manchado, C., Accepted. Generation and nomenclature of tessellations and double-layer grids. J Struct Eng-ASCE.
- Hanaor, A., 1994. Geometrically rigid double-layer tensegrity grids. Int J Space Struct, 9(4), pp.227-238.
- Hanaor, A., 1987. Preliminary investigation of double-layer tensegrities. In: Proceedings of International Conference on the Design and Construction of Non-conventional Structures. Civil-Comp Press., Edinburgh, Scotland.
- Hanaor, Ariel, 1991. Double-layer tensegrity grids: static load response. II: experimental study. J Struct Eng, 117(6), pp.1675-1684.
- Heartney, E., 2009. Kenneth Snelson : forces made visible, Hard Press Editions; In association with Hudson Hills Press, Lenox MA; Manchester VT.
- Knuth, D.E., 1973. Computer science and mathematics. Am Sci, 61(6), p.709.
- Kono, Y., Choong, K.K., Shimada, T. and Kunieda, H., 1999. An experimental investigation of a type of double-layer tensegrity grids. J Int Assoc Shell Spatial Struct, 40(130), pp.103-111.
- Motro, R., 2003. Tensegrity : Structural systems for the future, Kogan Page Science, London (UK).
- Motro, R., 1987. Tensegrity systems for double layer space structures. In: Proceedings of International Conference on the Design and Construction of Non-conventional Structures. Civil-Comp Press., Edinburgh, Scotland.
- Pugh, A., 1976. An introduction to tensegrity, University of California Press, Berkeley.
- Raducanu, V., 2001. Architecture et système constructif: Case de systèmes se tenségrité. PhD Thesis. Université de Montpellier II, Montpellier.
- Skelton, R. and de Oliveira, M.C., 2009. Tensegrity systems, Springer, Dordrecht; London.
- Wang, B., 2004. Free-standing tension structures: From tensegrity systems to cable-strut systems, Spon Press, London; New York.