

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Óscar Gómez Fernández

Tensegridades plegables en la arquitectura efímera

Tensegridades plegables en la arquitectura efímera

Estudiante

Óscar Gómez Fernández

Tutor

Daniel Jeremy Fox Hornig

Departamento de Matemática Aplicada

Aula TFG 7

Javier Eduardo Gómez Pioz, coordinador

Pilar Horna Almazán, adjunto

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

Enero 2024

ÍNDICE

1. Introducción
2. Tenseguridad
 - 2.1. Definición
 - 2.2. Ejemplos
 - 2.3. ¿Por qué es tan importante diferenciar entre tensegridades “puras” y tensegridades “falsas” o de “nivel 2”?
 - 2.4. Ventajas y desventajas
3. Arquitectura efímera
 - 3.1. Definición
 - 3.2. Tipos
 - 3.3. Características
 - 3.4. Ejemplos
4. Unión de lo efímero y lo desplegable
 - 4.1. Tradicionalmente
 - 4.2. Actualmente
5. ¿Son las tensegridades plegables un buen sistema a la hora de conseguir espacios efímeros?
 - 5.1. Definición
 - 5.2. Materiales
 - 5.3. Características necesarias
 - 5.4. Características óptimas
6. Comparación con otras tipologías convencionales
7. Conclusiones
8. Índice de figuras
9. Bibliografía

1. Introducción

Las tensegridades, como tipología estructural, surgen a finales del siglo XX y, desde entonces, su avance en el mundo de la arquitectura ha sido cauto y pausado. Esto puede ser contradictorio ya que, a lo largo del trabajo, veremos desde un punto de vista teórico acompañado de ejemplos prácticos las múltiples ventajas y cualidades que hacen de las tensegridades un sistema estructural único y versátil.

Entonces, ¿por qué no se usan de forma recurrente las tensegridades en el contexto de la arquitectura?

Esto se debe, en parte, a la gran competencia que tienen los sistemas tensegríticos en el ámbito de la arquitectura ligera y la complejidad de algunas de sus características como el diseño a gran escala o el estado de auto-tensión.

Para acotar el contexto a la hora de estudiar las tensegridades nos adentraremos en la arquitectura efímera que, aunque se detallará más adelante, se trata de la arquitectura temporal, cuyo uso es limitado en el tiempo y tras el cual se destruye o traslada.

Este contexto es idóneo para analizar la función de las tensegridades ya que la arquitectura efímera se caracteriza por su condición de ligereza, versatilidad, flexibilidad, etc., ámbitos donde las tensegridades trabajan de forma efectiva. Además, para fusionar las tensegridades y la arquitectura efímera, partiremos de las tensegridades desde su forma más genérica para llegar al ámbito de las tensegridades plegables.

Las tensegridades plegables, como su nombre indica, pueden plegarse y desplegarse para poder transportarse fácilmente, lo que añade un nuevo reto a la tipología. Esta tiene que ser capaz de satisfacer características necesarias como rigidez, estabilidad, auto-tensión o equilibrio al desplegarse, plegarse y posteriormente volver a alcanzar estos estados al desplegarse de nuevo.

Para conseguir obtener una respuesta a esta pregunta nos basaremos principalmente en dos ámbitos de estudio:

- Por un lado, analizaremos las características de las tensegridades plegables y veremos si estas se adaptan a las características que debe tener una arquitectura efímera eficiente.
- Por otro lado, compararemos estas características de las tensegridades plegables con otras tipologías más usadas hoy en día tales como articuladas, textiles, modulares, etc., para intentar descubrir por qué unas se utilizan más que otras.

Con este estudio llegaremos a dos conclusiones principales:

- Las tensegridades son un sistema óptimo, único y versátil dentro de la arquitectura efímera, adaptándose a esta a la perfección, pero sin embargo vemos que no son una tipología muy desarrollada en el ámbito de la arquitectura.
- Encontraremos entonces, mediante una comparación con otras tipologías más usadas, los puntos débiles que hacen que las tensegridades no se usen tanto como cabría esperar.

Una vez planteado el objetivo del trabajo, empezaremos explicando los conceptos básicos; tensegridades, arquitectura efímera, sistemas estructurales desplegados y tensegridades desplegadas. Cuando estos conceptos estén claros pasaremos a relacionarlos entre sí como la unión de lo efímero y lo desplegable. Por último, llevaremos a cabo la comparación de las tensegridades desplegadas con otras tipologías más usadas para confirmar los inconvenientes de ciertas desventajas como el estado de auto-tensión o el diseño complejo.

2. Tensegridades

2.1 ¿Qué es una tensegridad?

Aunque su origen no está del todo claro y son tres personas las que reclaman su autoría (Richard Buckminster Fuller, David Georges Emmerich y Kenneth D. Snelson) podemos ubicar su creación a finales del siglo XX. Al igual que con su origen, pasa con su definición, cada persona que las ha estudiado ha ido dando su propia definición en función de su ámbito de estudio, interés o conocimiento.

Fuller describe su “propia creación” como: “an assemblage of tension and compression components arranged in a discontinuous compression system...”¹

Otra definición amplia y general del concepto es la de Anthony Pugh: “A tensegrity system is established when a set of discontinuous compressive components interacts with a set of continuous tensile components to define a stable volume in space.”²

Ahondando más en el concepto material de la tensegridad resulta interesante la definición que da Connelly Robert, matemático experto en geometría. Podemos definir tensegridad (o estructura tensegrítica) como un conjunto de elementos lineales y nodos donde los elementos principales son los siguientes: cable; elemento que solo trabaja a tensión (tiene una fuerza interna positiva); puntal; elemento que solo trabaja a compresión (tiene una fuerza interna negativa) y en algunos casos podemos encontrar barras que trabajan a compresión o tracción según la situación.

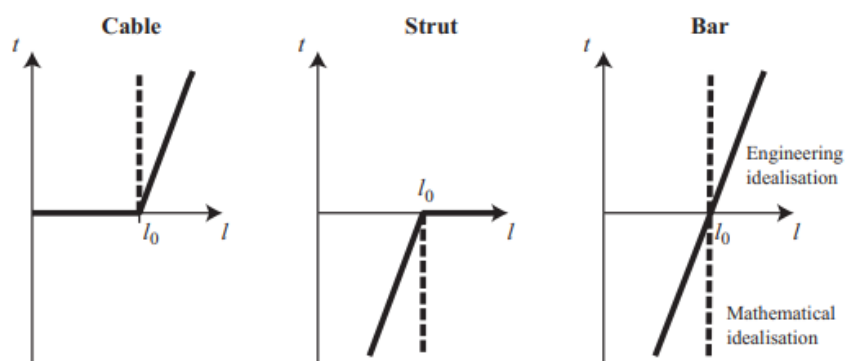


Fig 1. Relación gráfica entre la fuerza interna (t) y la variación de longitud de los distintos elementos. [01]

¹ Buckminster Fuller, Richard. “La tensegridad es un sistema estructural constituido por elementos de compresión discontinuos conectados por elementos de tensión continuos.”

² Pugh, A. “Un sistema tensegrítico se establece cuando un conjunto de elementos a compresión discontinuos interactúa con un conjunto de elementos a tracción continuos para definir un volumen estable en el espacio” *An Introduction to Tensegrity*. University of California Press. 1976

Connelly describe las ecuaciones que relacionan la fuerza interna con la longitud en cada uno de los elementos:

- cable $t = k (l - l_o)$ para $l \geq l_o$, $t = 0$ para $l \leq l_o$
- puntal $t = -k (l - l_o)$ para $l \leq l_o$, $t = 0$ para $l \geq l_o$
- barra $t = k (l - l_o)$ para todo l

En todos los elementos la resultante de la fuerza interna es la variación de la longitud por la constante k (parámetro de rigidez del material). Sin embargo esta se comporta de forma distinta según el elemento.

- En el cable la fuerza nos lleva a una longitud final mayor que la inicial al tratarse de un elemento que trabaja a tracción, con una constante k más baja y ser un elemento flexible.
- Para el puntal obtenemos una resultante negativa por el esfuerzo interno de la fuerza a compresión y a su vez una longitud final menor que la inicial al comprimir dicho elemento.
- En cuanto a las barras no obtenemos una variación de longitud sustancial al considerarse elementos muy rígidos.

Podemos encontrar otras definiciones interesantes y más técnicas de tensegridad tales como:

“ The natural model is to define a tensegrity as a finite graph G whose vertices $p = (p_1, \dots, p_n)$, the configuration, are points in some Euclidean space E_d with two types of edges labeled cables, corresponding to the strings, and struts, corresponding to the sticks. The whole tensegrity is denoted as $G(p)$. The cables are constrained not to get longer, while the struts are constrained not to get shorter ” ³

“ Self-stressing structures consist of bars and cables assembled in such a way that the bars remain isolated in a continuum of cables. All these elements must be spaced rigidly and at the same time interlocked by the prestressing resulting from the internal stressing of cables without the need for external bearings and anchorage. The whole is maintained firmly like a self supporting structure, whence the term self-stressing.” ⁴

³ “ Una tensegridad es un conjunto ordenado finito de puntos en un espacio euclídeo, con una determinada configuración, de los cuales ciertos pares de esos puntos, llamados cables, están obligados a no separarse; y el resto de pares de esos puntos, llamados barras, están obligados a no unirse.” Connelly Robert, (1998). *Mathematics and tensegrity*.

⁴ “ Las estructuras auto tensadas están formadas por barras y cables ensamblados de tal manera que las barras queden aisladas en un continuo de cables. Todos estos elementos deben estar espaciados rigidamente y al mismo tiempo entrelazados por el pretensado resultante del tesado interno de los cables sin necesidad de apoyos y anclajes externos. El conjunto se mantiene firmemente como una estructura autoportante, de ahí el término self-stressing ”Emmerich, D. (1963). *Constructions de réseaux autotendants*.

Basándonos en esta última definición, por ser la más completa y englobar parcial o totalmente a las demás, podemos ver algunos ejemplos de construcciones y saber si son o no tensegridades.

2.2. Ejemplos

Puente Kurilpa, Australia, 2009

El puente de Kurilpa se sitúa en Australia, en la ciudad de Brisbane. Se trata de un puente peatonal que une las zonas del Banco del Sur, la zona céntrica de la ciudad y el distrito central de negocios. El diseño del puente fue obra del estudio australiano de arquitectura Cox Rayner y la estructura fue resuelta por la empresa de ingeniería Arup. La estructura cubre un total de 470 metros de largo con un ancho de 6.5 metros.

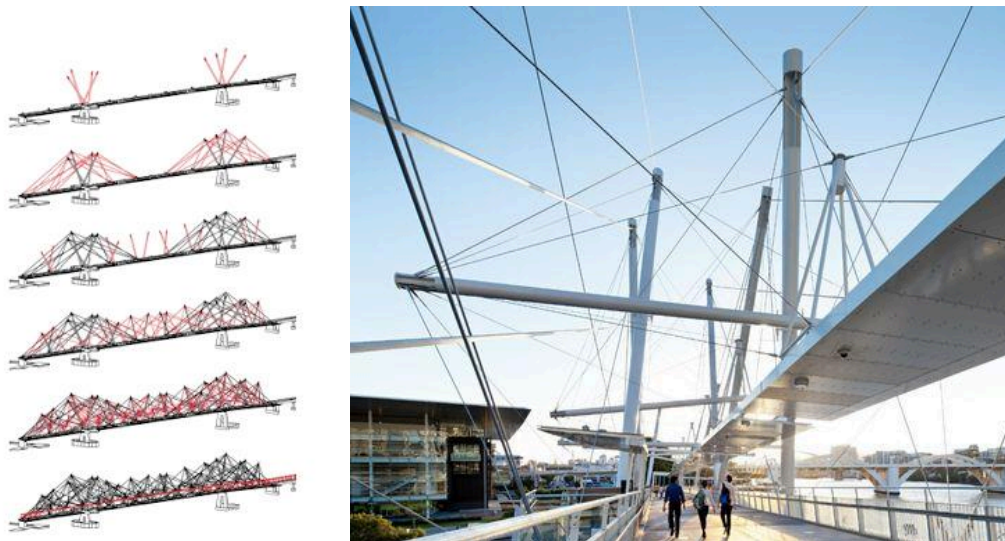


Fig 2 y 3. Croquis del proceso constructivo del puente junto con una imagen real de su interior [13]

Aunque a primera vista podría parecer un ejemplo de tensegridad nos encontramos ante una denominada “falsa tensegridad” ya que no se adapta las descripciones antes dadas.

El puente se construye como un puente convencional y una vez este se termina se añade la parte superior de mástiles y tensores para sujetar la cubierta de la pasarela peatonal y dar rigidez al conjunto del sistema. A su vez, el “suelo firme” por el que se camina, es un elemento continuo a lo largo del puente formado por un volumen macizo de hormigón armado con una función estructural importante que absorbe los esfuerzos de compresión localizada y flexión. En este caso los elementos comprimidos (mástiles) se encuentran anclados a la estructura del puente por lo que estaríamos ante una tipología atirantada más que tensegrítica.

Pabellón MOOM, Japón, 2014

Este pabellón es una construcción temporal experimental. La realizó el arquitecto Kazujiro Kojima junto a un grupo de estudiantes de la Universidad de Ciencias de Tokio. El objetivo del proyecto se basaba en estudiar el potencial de las estructuras membrana y se propuso una tipología “autoportante” utilizando el principio de la tensegridad.

En este ejemplo, los elementos continuos que trabajan a flexión normalmente conformados por cables, se sustituyen por una membrana continua que alberga en su interior los elementos aislados en compresión, barras. La estructura consiguió albergar en su interior una superficie de 146 metros cuadrados y la principal cualidad que se perseguía a la hora de crear este proyecto era la ligereza y rápido montaje.

Sin embargo, tampoco termina de ser una estructura tensegrítica a pesar de su parecido. La estructura se compone de unas barras que trabajan a compresión y no se tocan entre sí sino que están suspendidas en una red de tensores que “cosen” toda la estructura. La característica que falla a la hora de clasificarlo como tensegridad es que el perímetro se encuentra anclado al suelo, lo que le proporciona un apoyo no propio de las tensegridades.

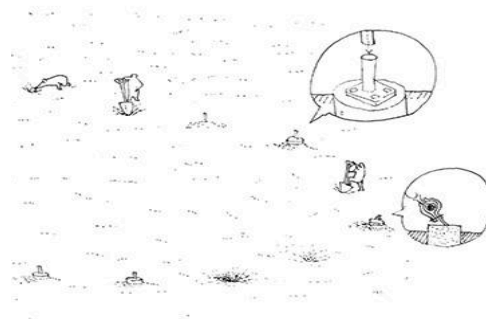


Fig 4 y 5. Fotografía exterior del pabellón junto a una imagen del proceso constructivo que detalla los anclajes [16] [17]

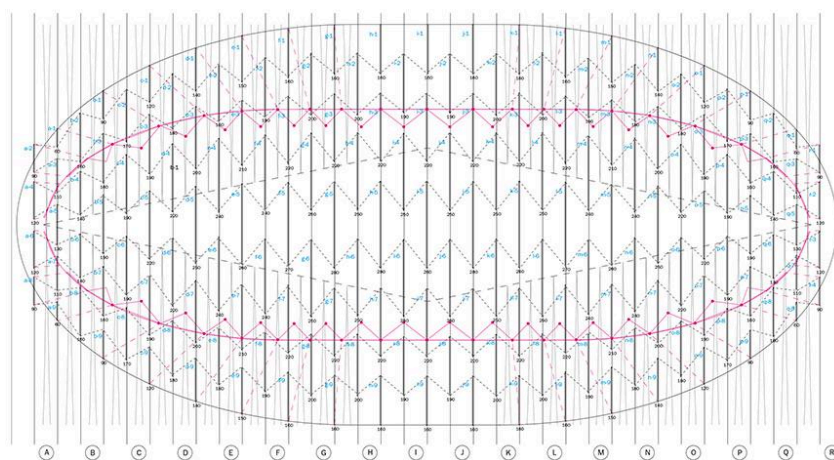


Fig 6. Croquis de la posición de todos los elementos en conjunto [17]

Tensegrity Tower of Rostock, Alemania, 2003

Se considera la estructura basada en el principio tensegrítico más alta hasta la fecha con una altura de 62,3 metros y un símbolo de la ciudad de Rostock. La estructura fue diseñada por el estudio Architekten von Gerkan, Marg y Socios. La torre se basa en la unión de seis módulos simples (a) de 8,3 metros de altura cada uno.

Esta torre pierde la condición de tensegridad en el momento en que se ancla al suelo pero aún así es interesante analizar sus características olvidándonos del anclaje por un momento

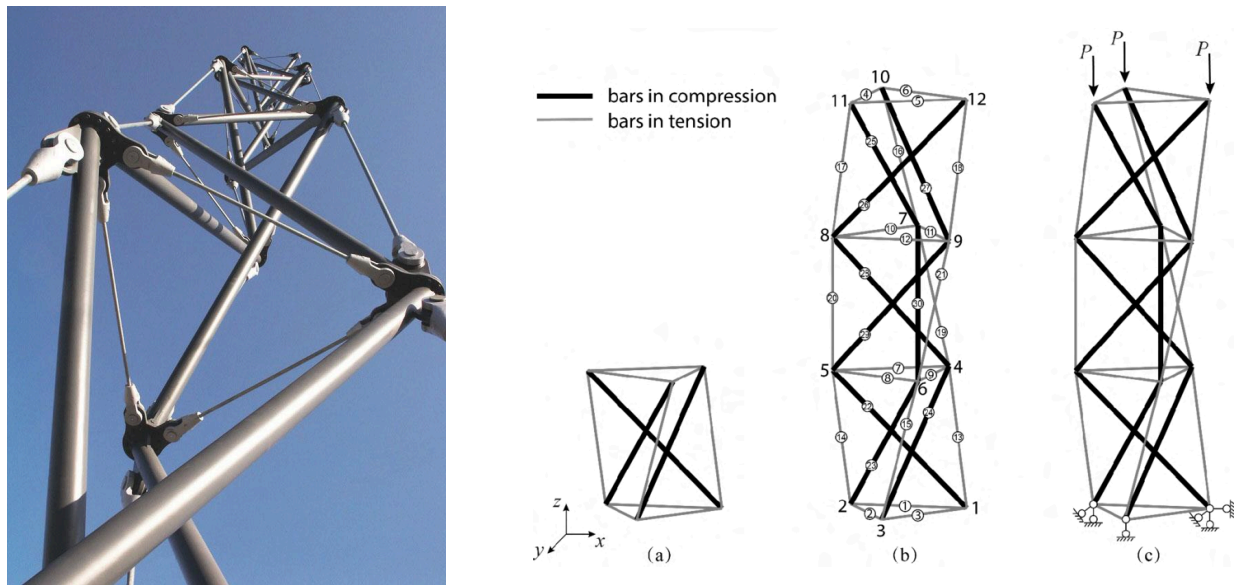


Fig 7 y 8. Fotografía inferior de la estructura junto con un croquis de los distintos elementos y su composición en el conjunto final de la torre [18][19]

El módulo (a) es un conjunto tensegrítico con 3 elementos comprimidos aislados dentro de una red tensada pero, ¿la figura (c) es una tensegridad?

Al apilar varios módulos nos damos cuenta de que los elementos comprimidos entran en contacto los unos con los otros, por lo que no sería una tensegridad, sin embargo, podemos considerar una nueva organización. En este caso podemos observar el conjunto nuevamente como 3 grandes elementos continuos comprimidos (la unión de las barras de los distintos módulos (a) se podría considerar como una gran barra articulada comprimida) unidos entre sí por una red tensada en la que no entran en contacto, por lo que sí podría serlo.

Una forma “simple” de conseguir una estructura tensegrítica pura también hubiera sido girar los módulos a la vez que se superponían unos sobre otros, de este modo, las barras del módulo superior hubieran apoyado en los cables tensados del módulo inferior. Esta opción sería más exigente a la hora de la ejecución y el cálculo por lo que se supondría “menos cómoda”

Needle Tower, Estados Unidos, 1968

Esta escultura diseñada por el escultor Kenneth Snelson forma parte de una exposición artística en el Museo y Jardín de Esculturas Hirshhorn en Washington DC. La estructura tiene un total de 26,5 metros y fue construida en 1968.

Este caso sí que es una tensegridad “pura” que se adapta fielmente a las definiciones y que nos sirve de comparación con la torre anterior. Un conjunto de tubos de aluminio en compresión aislados entre sí y unidos por cables de acero inoxidable en tensión. A diferencia de la Torre de Rostock, los elementos comprimidos no se tocan entre sí, trabajan de forma aislada lo que proporciona un mayor impacto visual al espectador.

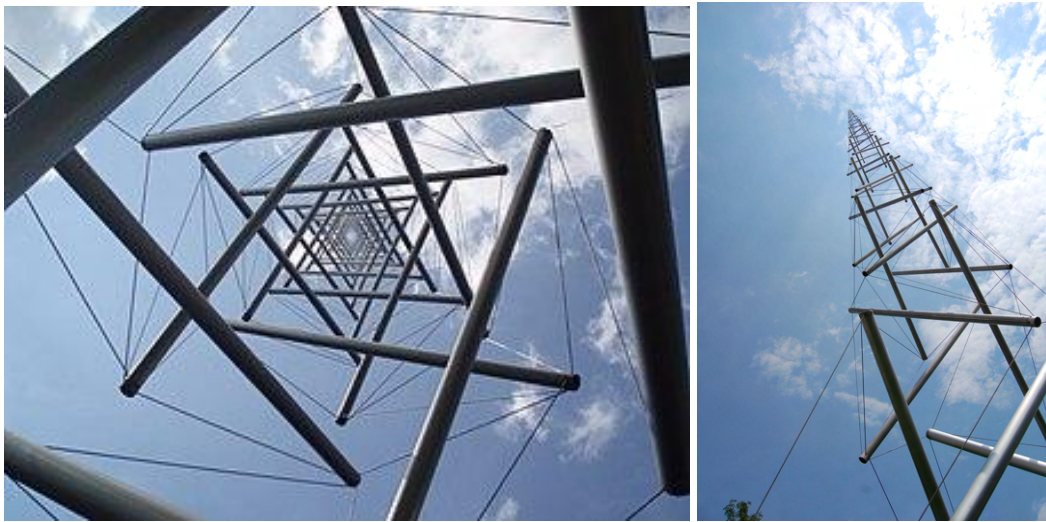


Fig 9 y 10. Fotografías actuales de distintas perspectivas de la torre [20]

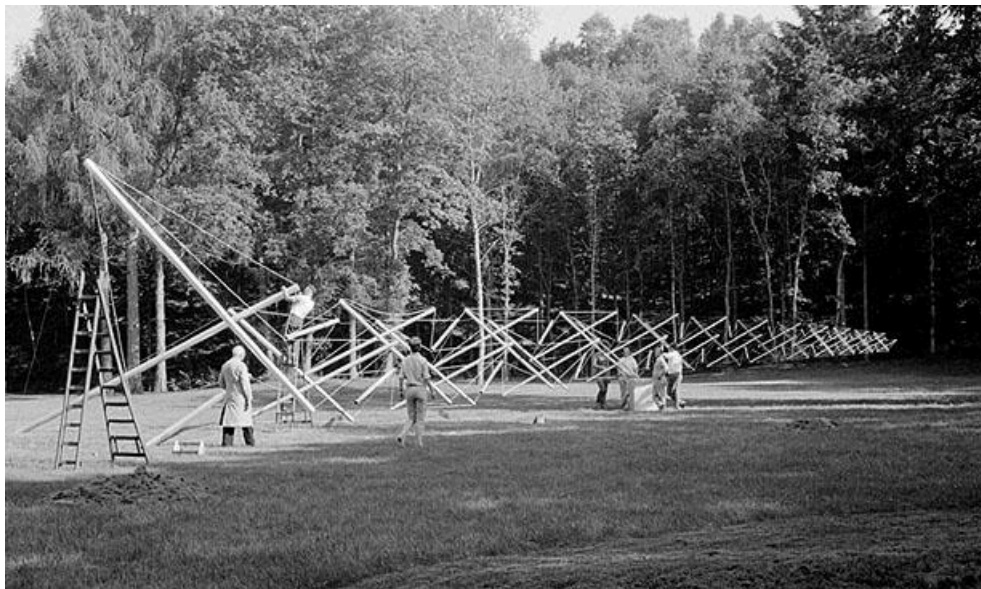


Fig 11. Fotografía durante su construcción en 1968 [20]

Viendo estos ejemplos, los cuales algunos se catalogan como tensegridades “puras” y otros como tensegridades “falsas” según su condición o alguna característica concreta como la necesidad de apoyos o la interacción entre sus elementos, nos podemos preguntar:

2.3. ¿por qué es tan importante diferenciar entre tensegridades “puras” y tensegridades “falsas” o de “nivel 2”?

Por la complejidad de su definición. Hemos visto anteriormente que no se recoge una definición única y precisa de lo que es una tensegridad. Según a quién escuchemos las definiciones son demasiado ambiguas o poco esclarecedoras. Vamos a coger de ejemplo de una de las definiciones más concretas de Emmerich

“ Las estructuras auto tensadas están formadas por barras y cables ensamblados de tal manera que las barras queden aisladas en un continuo de cables. Todos estos elementos deben estar espaciados rígidamente y al mismo tiempo entrelazados por el pretensado resultante del tesado interno de los cables sin necesidad de apoyos y anclajes externos. El conjunto se mantiene firmemente como una estructura autoportante, de ahí el término self-stressing ” Emmerich, D. (1963). *Constructions de réseaux autotendants*.

Veamos ahora qué pasaría si no distinguieramos entre las tensegridades donde los elementos comprimidos están aislados o no, como es el la Torre de Rostock, y la definición se ajustase para incluir a este ejemplo como tensegridad:

~~“ Las estructuras auto tensadas están formadas por barras y cables ensamblados de tal manera que las barras queden aisladas en un continuo de cables. Todos estos elementos deben estar espaciados rígidamente y al mismo tiempo entrelazados por el pretensado resultante del tesado interno de los cables sin necesidad de apoyos y anclajes externos. El conjunto se mantiene firmemente como una estructura autoportante, de ahí el término self-stressing ” Emmerich, D. (1963). *Constructions de réseaux autotendants*.~~

Ahora veamos qué ocurre si aceptásemos también la condición de tener apoyos o anclajes como era el caso del Pabellón de MOOM:

~~“ Las estructuras auto tensadas están formadas por barras y cables ensamblados de tal manera que las barras queden aisladas en un continuo de cables. Todos estos elementos deben estar espaciados rígidamente y al mismo tiempo entrelazados por el pretensado resultante del tesado interno de los cables sin necesidad de apoyos y anclajes externos. El conjunto se mantiene firmemente como una estructura autoportante, de ahí el término self-stressing ” Emmerich, D. (1963). *Constructions de réseaux autotendants*.~~

De este modo nos quedaríamos con una definición tal que:

“ Las estructuras auto tensadas están formadas por barras y cables, entrelazados por el pretensado resultante del tesado interno de los cables.”

Esta definición resultante se parece a las primeras definiciones dadas como la anteriormente mencionada de Fuller:

“ La tensegridad es un sistema estructural constituido por elementos de compresión discontinuos conectados por elementos de tensión continuos.”

Al eliminar tantas restricciones obtenemos una definición ambigua que puede llegar a ser confusa a la hora de determinar qué es una tensegridad. ¿Sería entonces, según la definición final de Emmerich, un puente atirantado una tensegridad? ¿Se consideraría como un conjunto de elementos comprimidos en contacto (vigas) dentro de un sistema tensado?

Del mismo modo, ¿sería un sistema de arriostramientos en un edificio una tensegridad? ¿Se consideraría como un conjunto de elementos en compresión unidos por cables en tensión?

Entendemos entonces que acotar el significado de tensegridad y clasificarlas como “puras” y “falsas” nos ayuda a entender el concepto para proceder, después, a estudiarlo.

Aclarada la diferencia entre tensegridad “pura” y “falsa” y el porqué esta diferenciación es importante, podemos hacer un recopilatorio de las características más generales de las tensegridades agrupándolas en ventajas, las cuales son atributos buenos que aportan una cualidad y desventajas, las cuales representan puntos débiles de dicha tipología.

2.4. Ventajas y desventajas

Desde su origen en el siglo XX, el uso y propiedades de las tensegridades se han explorado en distintos campos como la arquitectura, el arte o la ciencia. Estos estudios han dado pie a obtener unas cualidades y desventajas generales de las tensegridades como conceptos llevados a la realidad.

Ventajas

- Ligereza: los componentes que conforman las tensegridades no suelen ser pesados en comparación con otras tipologías convencionales⁵ (como hormigones, yesos, materiales cerámicos, metales pesados, etc.) Esto les proporciona una relativa facilidad en el montaje y transporte.
- Diseño/forma: permite diseñar estructuras con formas muy diversas y concretas. Esta gran variedad en el diseño de su forma le proporciona una gran adaptabilidad a distintas situaciones.
- Comportamiento estructural: la distribución general de las fuerzas proporciona una gran eficiencia en la solicitud y dimensión de sus elementos.
- Resistencia a perturbaciones: al trabajar como un elemento continuo general resiste con bastante eficiencia fuerzas externas como vientos o incluso sismos.

Desventajas

- Gran precisión: la disposición exacta de sus elementos es un carácter crucial, cualquier desplazamiento o desviación en la construcción de los mismos puede llegar a comprometer la integridad de la estructura.
- Durabilidad: requiere un gran mantenimiento a largo plazo sobre todo por parte de los elementos tensados que no pueden perder resistencia.
- Diseño complejo: a la hora de trabajar a gran escala las interacciones entre los elementos puede llegar a ser muy compleja y ser necesarios programas algorítmicos de cálculo.

⁵ La palabra “convencional” según la RAE: adj. Que resulta o se establece en virtud de precedentes o de costumbre. El uso de esta palabra en el contexto actual hace referencia a otras tipologías más usadas, es decir, se usa convencional como alegoría al uso frecuente y recurrente de una tipología estructural. Podríamos entonces sustituir la palabra “convencional” por “común” en este contexto.

- Exigencias en construcción: a menudo los materiales necesarios o las técnicas para poner la estructura en marcha pueden llegar a ser demasiado exigentes y/o costosos.
- Limitación de carga: se trata de una estructura ligera por lo que tiene unas limitaciones a la hora de soportar grandes cargas estructurales.

Una vez concretadas las tensegridades desde su origen, definición, ejemplos, tipos y características, podemos pasar entonces a analizar la arquitectura efímera y ver si las tensegridades se podrían adaptar o no a esta tipología arquitectónica.

3. Arquitectura efímera

3.1. Definición

efímero, ra

1. adj. Pasajero, de corta duración.

La arquitectura efímera es aquella que dura poco tiempo, que tiene un objetivo concreto, pero por encima de ese, es temporal. Las obras efímeras no durarán en el tiempo ya sea porque terminen con su objetivo inicial o porque se trasladen de un lugar a otro. Un ejemplo del uso de este tipo de arquitectura llegó con la globalización y se trata de las exposiciones universales en el siglo XIX donde cada país mostraba sus avances en tecnología, ciencia, arquitectura, etc.

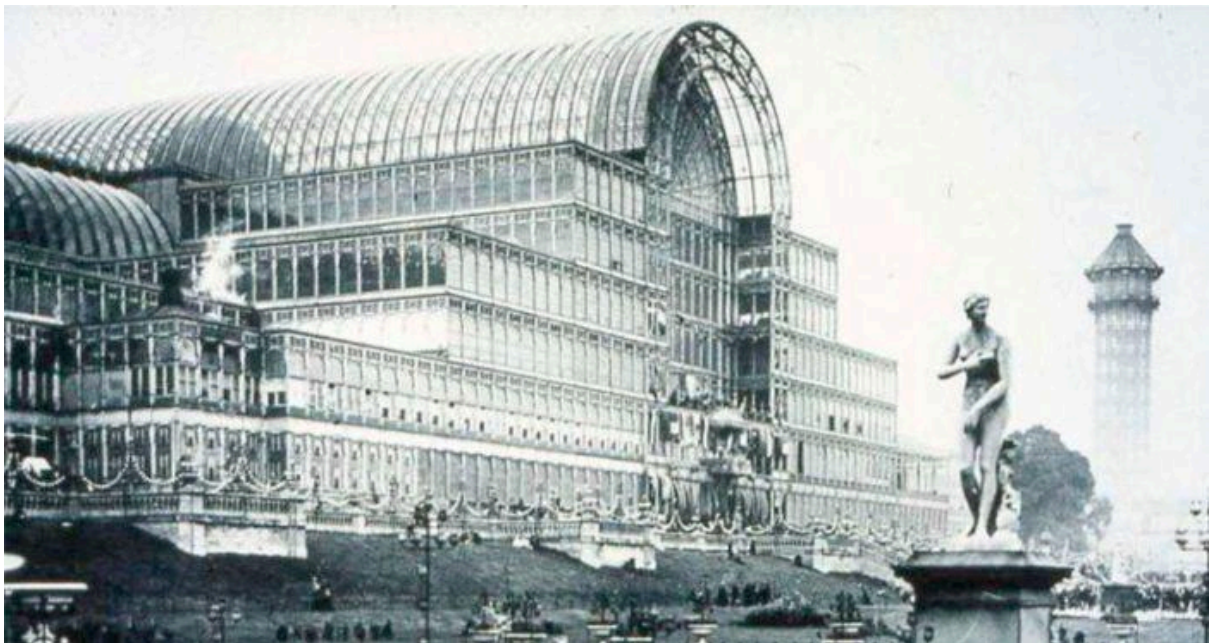


Fig 12. Palacio de Cristal, Joseph Paxton, Gran exposición Universal de Londres en 1851 [21]

Realmente podemos decir que la arquitectura efímera es tan antigua como lo es la propia humanidad cuando, en la prehistoria, los pueblos eran nómadas y tenían que estar moviéndose de un lugar a otro constantemente. Cuando no existía la ganadería y la agricultura ya se practicaba este tipo de arquitectura que se asentaba en un lugar hasta que se agotaban los recursos naturales de una zona concreta y esta se trasladaba o abandonaba.

Desde entonces la arquitectura efímera se ha seguido usando hasta nuestros días en diferentes contextos y de diferentes formas, desde el barroco con sus escenografías temporales de carácter social o religioso, la arquitectura conmemorativa como los arcos del triunfo o la

arquitectura divulgativa como las exposiciones universales. A continuación podemos ver un resumen pictográfico de los principales tipos de arquitectura efímera según su finalidad:

3.2. Tipos

Artístico



Fig 13. Portal de la Conciencia, Rojkind Arquitectos [22]

Cultural



Fig 14. Escenarios festival Tomorrowland [23]

Deportivo



Fig 15. Carpa evento deportivo en la plaza de toros de Bibio, Gijón [24]

Comercial



Fig 16. Puestos de mercado navideños en la Plaza Mayor de Madrid [25]

Emergencia / militar



Fig 17. Campamento estadounidense en Irak

Escenografía / decorados



Fig 18. Plató de televisión RTVE

3.3. Características

Entre las características de la arquitectura efímera hay tres que engloban la esencia de este tipo de arquitectura:

Temporalidad

La más evidente y global de todas, el carácter efímero de las estructuras da nombre a esta arquitectura.

Materiales ligeros

Se opta por materiales fáciles de transportar y manipular como madera, tela, fibras o elementos metálicos ligeros.

No se usan elementos que tengan un largo periodo de ejecución como cementos y hormigones

Una característica muy importante de este tipo de arquitectura es el uso de materiales reciclados por lo que se usarán aquellos que puedan tener varias vidas

Fácil montaje

Acompañada de la anterior característica es muy importante la rápida ejecución de los proyectos.

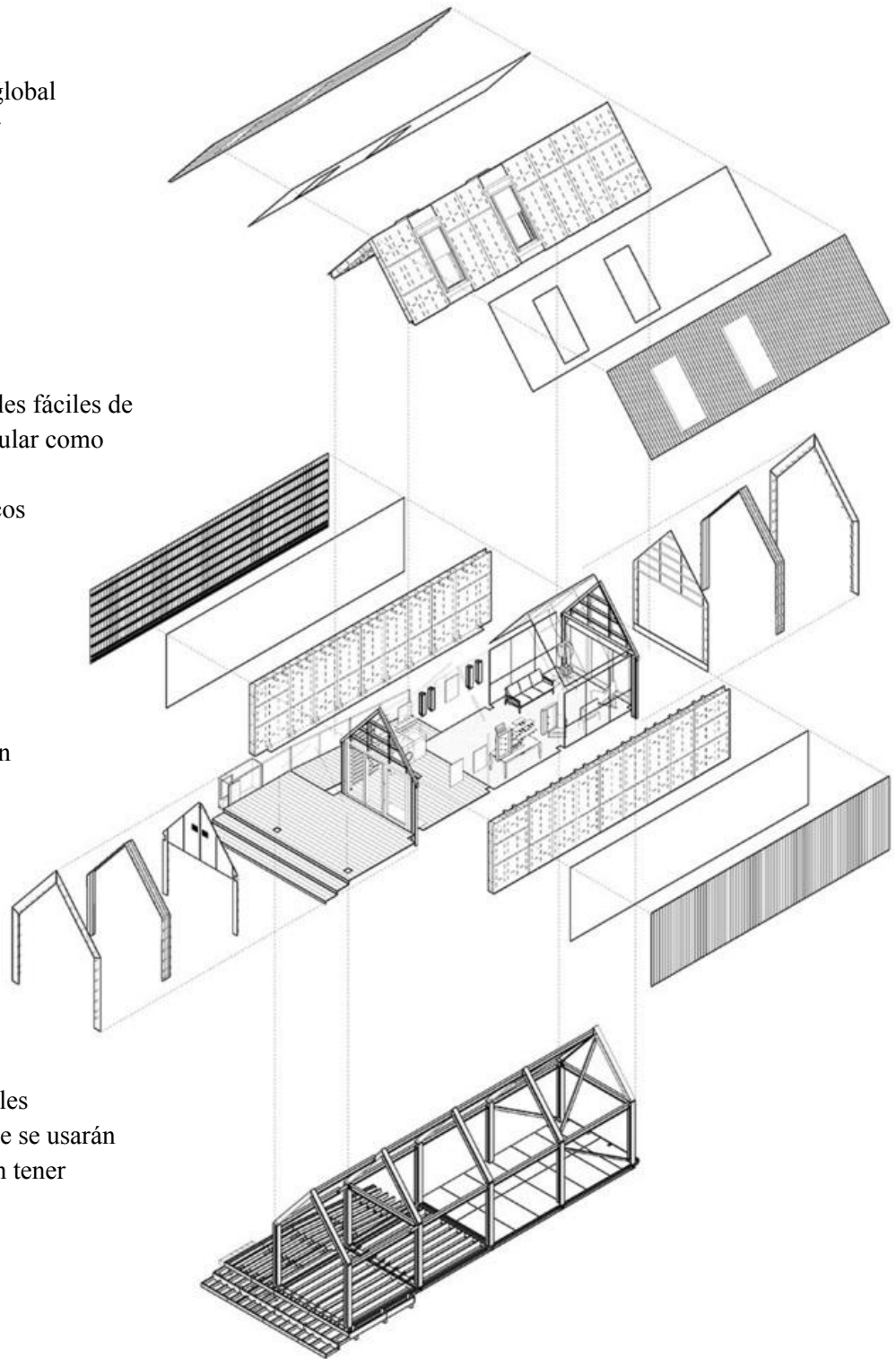


Fig 19. Croquis de un diagrama constructivo del estudio Arup.[28]

Como hemos visto en las diferentes tipologías la rapidez a la hora de crear los espacios es primordial ya que su uso se dará durante un periodo de tiempo concreto y, a menudo, breve. Con la llegada del siglo XXI la arquitectura efímera cobra un nuevo sentido debido a la concienciación humana frente a uno de sus mayores problemas: el cambio climático.

3.4. Ejemplos

Múltiples personas entienden la arquitectura efímera como una oportunidad de cambio que, apoyada en el reciclaje, hace entender la arquitectura como una herramienta circular. Un ejemplo de empresa que utiliza esta filosofía es RotorDc. Ellos mismos se definen como una cooperativa que organiza la reutilización de materiales de construcción.



Fig 20. Fase I de la transformación de un invernadero en un espacio de concierto para el festival Horst, Bruselas 2021 [28]



Fig 21. Fase II del mismo proceso de transformación [28]



Fig 22. Fase III del mismo proceso de transformación [28]

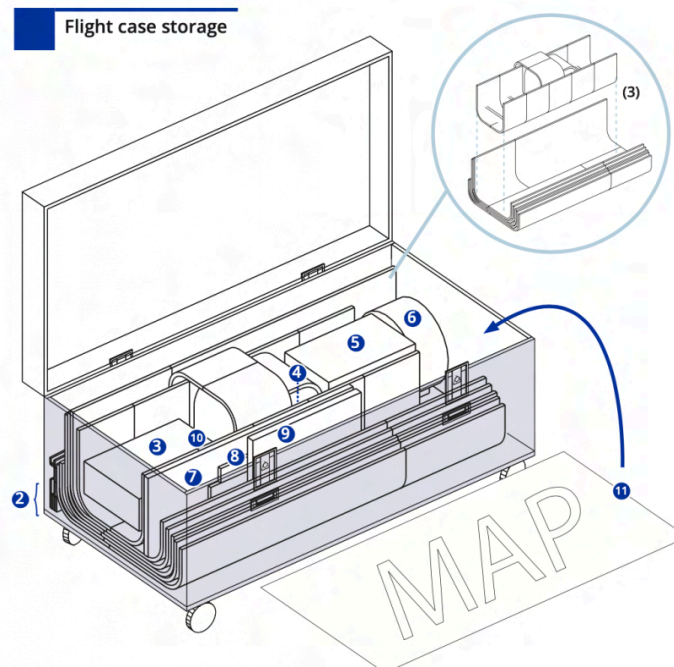


Fig 23. Fase final del proceso de transformación de un invernadero en un espacio de concierto para el festival Horst, Bruselas 2021 [28]

La economía circular dentro de la arquitectura permite reutilizar materiales de construcciones obsoletas para convertirlos en nuevos proyectos. Este *modus operandi* no solo es sostenible si no que genera una infinitud de posibilidades. Otro proyecto divulgativo de RotorDc es la exposición *99 por ciento*. Esta exposición no solo cuenta los beneficios del reciclaje de elementos de construcción si no que nos habla también de sus posibilidades, entre ellas, la versatilidad.



Fig 24. Exposición 99 por ciento proyecto divulgativo de RotorDc en estado desplegado [14]



A menudo los proyectos de esta empresa se trasladan de un lugar a otro y vienen acompañados de su propio “manual de instrucciones” para que cualquier persona pueda desplegarlos en cualquier lugar.

Este ejemplo es uno de tanto donde la arquitectura efímera forma parte de la economía circular mediante el plegado y desplegado de la obra.

La versatilidad de este tipo de arquitectura hace que sea una opción muy potente a día de hoy. Es capaz de satisfacer las necesidades de una ocasión en un determinado lugar y posteriormente se recoge para poder hacer lo mismo en otro momento.

Fig 25. Exposición 99 por ciento proyecto divulgativo de RotorDc en estado plegado [14]

4. Unión de lo efímero y lo desplegable

Podemos diferenciar entonces, a grandes rasgos, entre dos tipos de arquitectura efímera: la que se construye con la idea de ser demolida o eliminada en un periodo de tiempo y la que se construye para posteriormente conservarse y volver a construirse en otro lugar. Esta tipología de arquitectura efímera desplegable se ha puesto en valor con la llegada de la conciencia por el cambio climático y la economía circular pero no es nueva, se tienen registros de este tipo de construcciones y mecanismo desde hace tiempo:

4.1. Tradicionalmente

Silla plegable egipcia



Fig 26 y 27. Fotografías de sillas plegables reales del antiguo egipto [29]

Uno de los primeros ejemplos registrados de este concepto se remonta al Antiguo Egipto. Este trataba de sillas plegables de “tijera” que se remataban en el asiento con una pieza rígida o con un soporte de piel curtida. Este concepto, que se remonta 5000 años a.C, se sigue utilizando a día de hoy ya sea en sillas, mesas u otros sistemas. Las sillas eran un elemento plegable justificado, por la necesidad de sentarte en diferentes lugares era útil hacerlas plegables para transportarlas, pero no eran el único. El *uol* era el predecesor de la almohada y los antiguos egipcios también se basaron en este principio de plegado para hacerlos más transportables y así poder usarlos fácilmente en varios ámbitos.



Fig 28. Fotografía de un uol egipcio [29]

Tipi

Otro ejemplo de vivienda tradicional antigua son los tipis característicos de la población nativa americana de los Estados Unidos. Una estructura con forma de cono formada por varios troncos o elementos rígidos unidos por un extremo que se anclan en el suelo de forma circular o poliédrica por el otro.



Fig 29. Fotografía de una recreación de un tipi original [30]



Fig 30 y 31. Fotografías de una estructura de tipi sin recubrimiento y un zoom de la unión superior de sus elementos [31]

Estas estructuras también eran móviles y de fácil montaje lo que permitía a los nativos desanclar la parte inferior del suelo, unir todos los extremos y conseguir tener toda la estructura plegada sin necesidad de desmontarla.

Yurta

La yurta es otro ejemplo de vivienda tradicional más sofisticada, era la vivienda típica de las poblaciones nómadas del centro de Asia que se desplazaban a lo largo del continente y que se remonta al año 600 a.C



Fig 32. Fotografía de una yurta tradicional cubierta con pieles junto a una familia de Mongolia [15]

La estructura principal es un armazón de listones de madera entrelazados. Se trata de una estructura autoportante que se recubre con pieles para conseguir un volumen cerrado. La estructura es perimetral a modo de “carpa” que no necesita de apoyos intermedios lo que facilita su plegado y desplegado para su posterior transporte.



Fig 33. Fotografía del armazón descubierto de la estructura de una yurta [15]

Esta estructura permitía un despliegue rápido y eficaz de forma sencilla por lo que cualquier persona podía colaborar en su construcción.



Fig 34. Fotografías del time-lapse de la construcción de una yurta tradicional [15]

Esta tipología es tan eficiente y cómoda que ha seguido desarrollándose hasta nuestros días. Con la masificación de las ciudades y la llegada de episodios como la pandemia de *covid-19* del año 2020, la población ha puesto en valor la posibilidad de poder desplazarse a otros entornos más naturales y hacerlo de una forma rápida y ligera. Muchas empresas se han visto beneficiadas por esto a la hora de vender sus productos como las autocaravanas, las furgonetas o en este caso, las empresas de casas prefabricadas, en especialmente de yurtas, que experimentaron un crecimiento significativo.



Fig 35. Ejemplo de la página web de la empresa Celtic Yurts destinada a vender estas viviendas [32]

4.2. Actualmente

Los métodos para conseguir estructuras plegables de carácter efímero se han ido sofisticando con el tiempo hasta nuestros días dando un abanico casi infinito de posibilidades. Algunos ejemplos son:

Estructuras articuladas



Fig 36. Proyecto Tiny House de viVood [33]

Las estructuras articuladas hacen uso de uniones móviles como bisagras, rótulas o demás conexiones lo que permite el plegado del sistema.

Es un sistema convencional, simple y cómodo.

Estructuras flexibles plegables

Fig 37. Habitación plegable IWI, Juan Ruiz y Amelia Tapia [34]

Las estructuras flexibles hacen uso de materiales ligeros y dúctiles tales como telas, plásticos, membranas, fibras o metales delgados.

El uso de estos materiales permite la deformación y plegado fácil de la estructura.



Estructuras origami

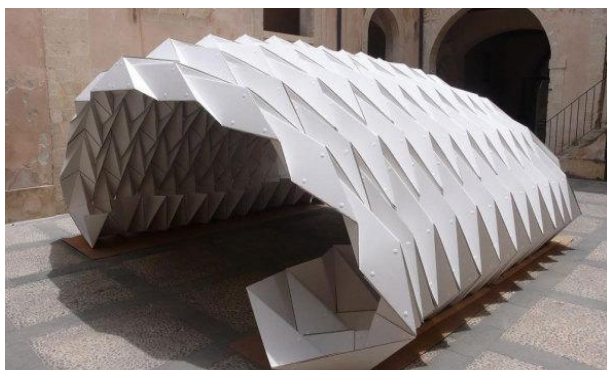


Fig 38. Cardboard Pavilion, Studio AION [35]

Basado en el arte japonés del origami se basa en el plegado de elementos dúctiles formando formas geométricas que, al desplegarse, forman un volumen. Con este principio se pueden conseguir elementos complejos a partir de otros más simples

Fig 39. 0-VOID, BASE studio [36]

Las estructuras neumáticas utilizan la presión ejercida por el aire o algún líquido para controlar el movimiento de la estructura.

De este modo, al estar bajo una presión nula el sistema se encuentra plegado.



También hay tipologías utilizadas de forma auxiliar para modificar partes de sistemas fijos

Sistemas telescópicos



Fig 40. Sistema telescópico apertura de nave [37]

El sistema telescópico se basa en una serie de piezas que se deslizan o encajan dentro de otras.

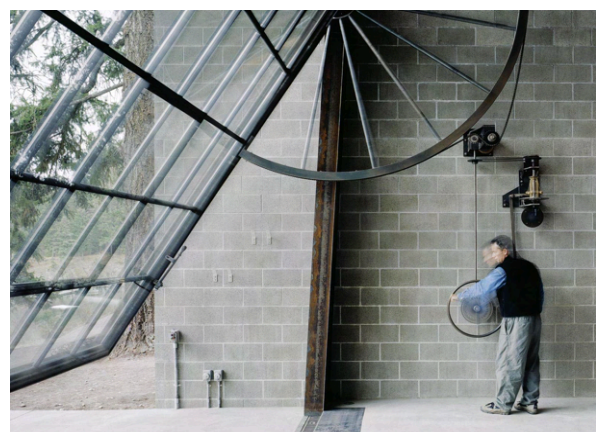
Este sistema permite la compactación de la estructura dentro de un mismo elemento y su posterior despliegue.

Sistemas de bloqueo

Fig 41. Sistema de polea para una envolvente [38]

El sistema de bloqueo - desbloqueo se basa en el movimiento de un elemento el cual se puede fijar bloqueando una posición concreta.

Así podemos partir de una posición plegada y llegar a una desplegada mediante el movimiento de un elemento



Teniendo en cuenta todo lo conocido sobre la arquitectura efímera y los sistemas plegables,

5. ¿son las tensegridades plegables un buen sistema a la hora de conseguir espacios efímeros?

5.1. Definición

Primero debemos conocer la definición de este tipo de tensegridades. Las tensegridades plegables son aquellas que, como su propio nombre indica, se pueden plegar y desplegar (y rigidizar) mediante la modificación de la longitud de alguno de sus elementos. También existe la opción de que una tensegridad plegable consiga su rigidez al ser desplegada mediante el añadido de algún nuevo elemento. Las opciones en la modificación de los elementos en cuanto a su longitud pueden ser:

- cables : cuando solo la longitud de los cables se modifica.
- puntal : cuando solo la longitud de los puntales se modifica.
- mixto : cuando ambos elementos anteriores son modificados.

De una forma más analítica, supongamos un conjunto finito de puntos tal que $p_i, i = 1, \dots, n$ en R^d descritos como:

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$$

para la posición inicial de los elementos de la tensegridad

y un conjunto finito de puntos tal que $q_i, i = 1, \dots, n$ en R^d descritos como:

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$$

para la posición final de los elementos de la tensegridad

Definimos un grafo $G = (V, E)$ de tensegridad donde V son los vértices o nodos $V = \{1, 2, \dots, n\}$ y donde E es el conjunto no ordenado de límites de la tensegridad, teniendo como elemento delimitador del contorno indistintamente un cable, barra o puntal. De este modo describimos la tensegridad como $G(p)$.

Con este sistema de referencia y teniendo en cuenta la definición inicial de los elementos de la tensegridad podemos denotarlos como:

$$|q_i - q_j| \leq |p_i - p_j|$$

para un cable teniendo en cuenta la rigidez del elemento. Su configuración final debe ser igual o menor que la inicial dado que no puede extenderse. Y:

$$|q_i - q_j| \geq |p_i - p_j|$$

Para un puntal teniendo en cuenta la rigidez del elemento. Su configuración final debe ser igual o mayor que la inicial dado que no puede encogerse.

A continuación comprobaremos si las tensegridades plegables se ajustan a las características que debe tener un sistema estructural efímero y a su vez veremos si las tensegridades pueden solucionar las necesidades que satisfacen otros sistemas efímeros plegables, pudiendo ser así, sustitutivas de los mismos

Las siguientes comprobaciones no serán analizadas sólo desde un marco teórico si no que irán acompañadas de ejemplos, algunas veces referencias y otras veces propios.

5.2 Materiales

Los materiales son el tema principal a la hora de diseñar y construir un espacio. Como hemos visto en los ejemplos contemporáneos de arquitectura efímera plegable, una característica muy importante es la elección de materiales para que estos sean fácilmente manipulables y transportables.

La elección de materiales dependerá a su vez de la escala del proyecto, cuanto más grande sea el volumen de la tensegridad y mayor sus sollicitaciones, sus materiales deben ir aumentando de escala con ella para conseguir un funcionamiento óptimo.

- Ecológico

Un valor muy importante de esta arquitectura es el reciclaje y la ecología, al ser sistemas que se desplazan y bajo el marco actual en el que nos encontramos de sobreuso de recursos naturales, es casi imperativo que el uso de los materiales para generar nueva arquitectura sea respetuoso con el medio ambiente y/o puedan disponer de varias vidas útiles.

Como vimos anteriormente las tensegridades pueden ser muy versátiles a la hora de elegir materiales siempre y cuando estos cumplan con unos requisitos mínimos de rigidez y ligereza. Un ejemplo del uso de materiales reciclados lo veremos en el caso práctico de estudio.

El material de las maquetas utilizadas en el trabajo partirá, en gran medida, de un palé de obra reciclado proveniente de una obra actual o restos de otros elementos de madera. Al estar dañados en algunas zonas, esto compromete su función principal de carga y han sido desechados. Normalmente acabarían en el contenedor de la obra pero al estar formados por madera, un elemento ligero y a la vez rígido, podemos usarlos para nuestro proyecto



Fig 42. Palé de obra

Tras desmontar las partes del palé y obtener los demás restos de madera, cortamos las secciones anchas según la dimensión de su canto para obtener secciones cuadradas.

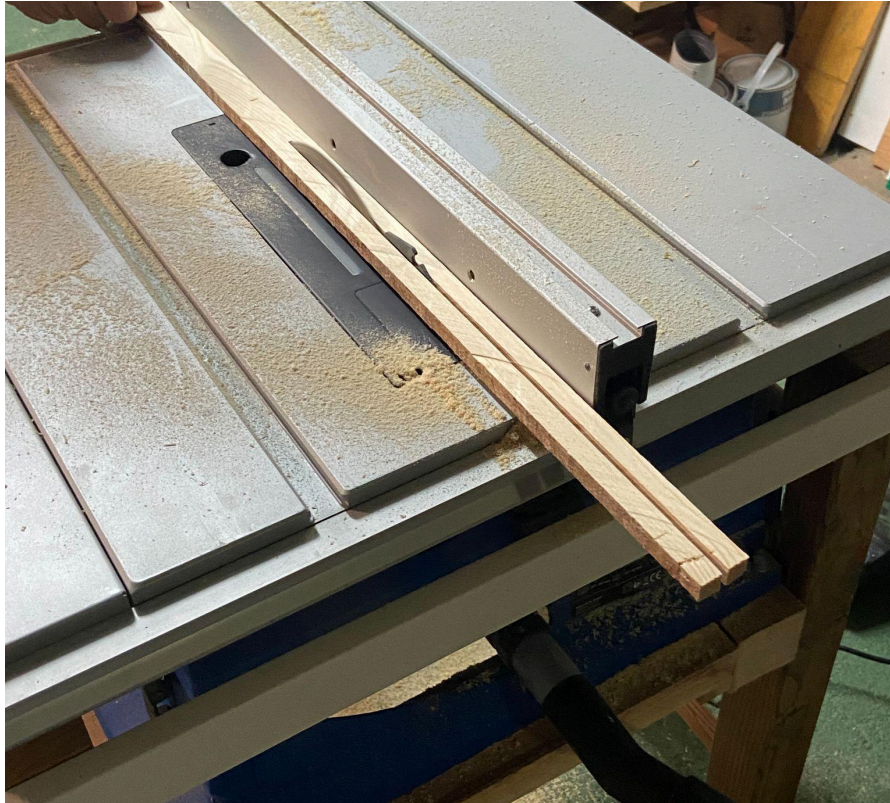


Fig 43. Fotografía propia del proceso de corte de los materiales

Acto seguido cortamos los listones obtenidos para conseguir un largo común a la hora de trabajar y que todas las barras sean lo más parecidas, dentro de que al provenir de elementos reciclados y ser madera no serán perfectamente iguales.



Fig 44. Fotografía propia del proceso de corte de los materiales (II)

- Ligereza / rigidez

Los materiales seleccionados deben poderse transportar y manipular fácilmente para conseguir un sistema eficiente, sin embargo, para un sistema que soporta cargas y parte de una situación de pretensado, los materiales no pueden ser demasiado endeble o ligeros. Esto nos lleva a una elección de materiales que se encuentre en un equilibrio entre la ligereza y la rigidez.

En los ejemplos estudiados anteriormente de tensegridades vemos como se hace uso de metales, maderas, cartones, fibras de carbono o plásticos, dependiendo de las necesidades del modelo a construir en función de sus requisitos estructurales.

Las tensegridades al ser un modelo versátil utilizado tanto en el arte como en la arquitectura, a pequeña y gran escala, dependiendo del modelo que queramos crear y su magnitud podremos jugar con un tipo de materiales u otros. En cuanto a la ligereza y rigidez de los materiales vemos que la tensegridad es un modelo que se adapta fácilmente



Fig 45. Fotografía propia de los materiales ya cortados

Los listones obtenidos son bastante ligeros. Son esbeltos pero no estarán solicitados en una única dirección por lo que es difícil calcular el factor de pandeo que pueden llegar a resistir por lo que lo comprobaremos empíricamente.

- Resistencia

Unido con el punto anterior, los materiales deben tener cierta resistencia para poder manipularse (plegarse y desplegarse) y aguantar las cargas que se soliciten, tanto los elementos a compresión (barras) como los elementos a tracción (cables)

Las barras deben aguantar una compresión en ambos sentidos sin deformarse o pandear para no comprometer la estructura mientras que los cables deben poder aguantar la tracción sin deformarse o partirse.



Fig 46. Fotografía propia del descarte de algunos materiales

Una vez puesto en marcha el proceso de construir la tensegridad, nos damos cuenta de que los nudos de la madera representan un gran punto de debilidad en la estructura, llevando estos incluso a romperse. Desechamos entonces los listones que tienen nudos muy pronunciados o en partes críticas como es el medio del listón

Por último podemos mencionar algunas características de una importancia más “secundaria” que podrían ser muy atractivas según el uso que se le conceda a la tensegridad:

- Aislante

Si nuestra tensegridad va a tener un espacio de uso interior como por ejemplo un refugio, nos interesa que los elementos que la componen sean aislantes térmica y/o acústicamente ya que el volumen que encierra la estructura va a requerir cierto confort.

Estos materiales aislantes no hacen alusión solo a los materiales propiamente constructivos sino también a los posteriores elementos de envolvente que terminan de crear el volumen del refugio.

- Durabilidad

Cuando hablamos de reciclar y reutilizar como un pilar fundamental de la arquitectura contemporánea, es importante aplicar medios para hacer este reciclaje útil. Podríamos utilizar materiales reciclados que, por su uso continuo o cualquier razón, acaben siendo desechados de nuevo en poco tiempo. Dicha situación habría contribuido al reciclaje pero no de la forma más eficiente posible.

No existen materiales que duren eternamente pero en nuestra mano está el poder tratarlos y cuidarlos para que duren lo máximo posible. Es con esto que evitaremos utilizar materiales fácilmente deteriorables como ciertos tipos de plástico y debemos optar por fibras, metales o maderas tratadas que consigan generar un menor impacto en el medio ambiente.

5.3 Características necesarias

Para poder comprender la naturaleza de las tensegridades y más concretamente de las tensegridades plegables tenemos que tener claros algunos conceptos previos.

Estos conceptos son estrictamente necesarios para que una tensegridad, al desplegarse, pueda desempeñar su función de forma correcta y eficiente. Se deben cumplir todos y cada uno de ellos y complementarse.

- Autotensión

El sistema consigue rigidez por sí mismo, sin ser necesario estar aplicando una fuerza externa que se la aporte. Para poder comprender dicha situación podemos utilizar la analogía del balón de fútbol.

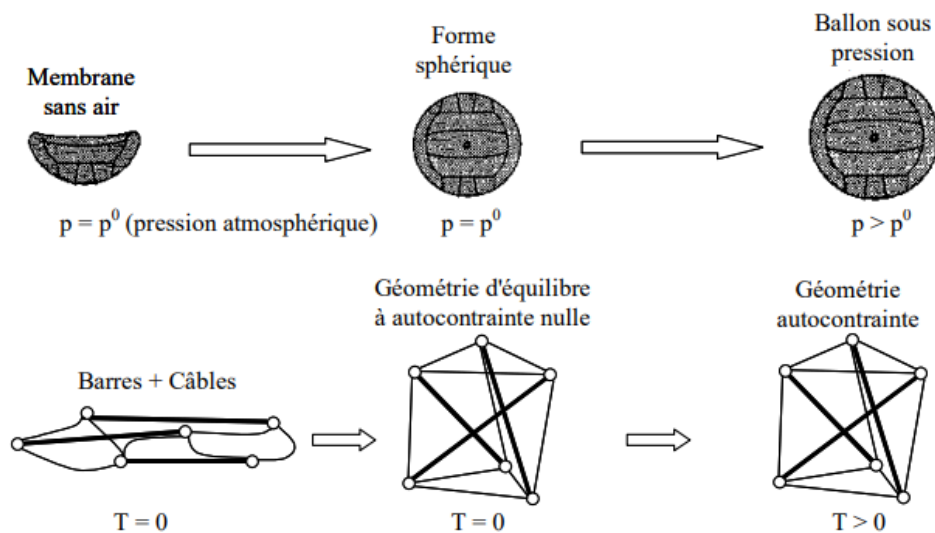


Fig 47. Esquema de la analogía del balón. [08]

- Situación 1 : el balón se encuentra desinflado ya que el aire que contiene es menor de el aire que es capaz de albergar. Lo mismo pasa con la tensegridad, tiene una tensión nula por lo que carece de forma.

- Situación 2 : el balón está lleno, con una presión igual que la atmosférica, ha conseguido su forma pero es susceptible de deformaciones al no prestar rigidez. De la misma forma, la tensegridad obtiene su forma pero al no estar tensada no presta rigidez.

- Situación 3 : el balón tiene mayor presión que la atmosférica y es rígido, aguanta las fuerzas exteriores y no se deforma. De igual modo la tensegridad se encuentra tensada por lo que es fuerte y no se deforma, puede soportar fuerzas externas ya que, al estar tensada, los elementos reparten las cargas por todo el conjunto.

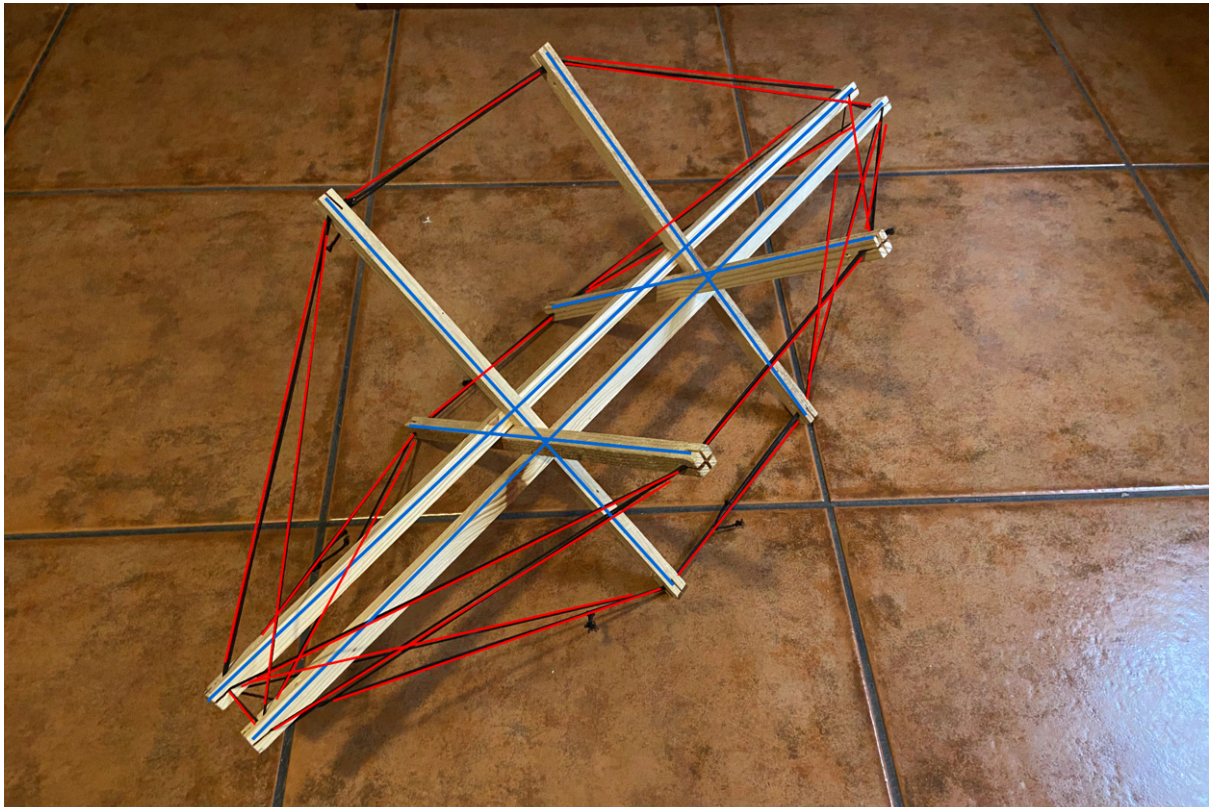


Fig 48. Tensegridad propia de seis barras

Dentro de la característica de auto-tensión vemos a continuación un esquema de las fuerzas internas de la tensegridad.

- *Las líneas azules son las barras que se encuentran separadas entre sí y trabajando única y exclusivamente a compresión.*
- *Las líneas rojas son los cables que forman una red única que trabaja a tracción y que contiene a todas las barras.*



Fig 49. Detalle en zoom de la tensegridad propia anterior (Fig 48)

La tensegridad se encuentra tensionada sin ninguna fuerza actuando sobre ella, en su estado de reposo y equilibrio se encuentra esta tensión que es la fuerza que le otorga rigidez y estabilidad. En la imagen de la derecha podemos ver como las barras no se tocan entre sí aunque la perspectiva anterior diese a entender lo contrario.

- Rigidez

Se conoce la rigidez como la capacidad de los elementos de una estructura de aguantar los esfuerzos a los que se somete a dicha estructura sin perder su forma (deformarse) y mantener sus uniones.

Analíticamente podemos expresar la rigidez de un cuerpo como el comportamiento del material en relación a la fuerza aplicada sobre el mismo con la ley de Hooke.

$$F = k \cdot \delta$$

Donde:

- F es la fuerza aplicada.
- k es la constante de rigidez (o constante elástica) del material o del sistema.
- δ es la deformación producida en el material o sistema debido a la aplicación de la fuerza.

La constante k es propia de cada material y cuando mayor sea, menor deformación experimentará el elemento, será más rígido. Del mismo modo, cuanto menor sea el valor de k, más flexible y deformable es el material. La ley de Hooke nos sirve para calcular la deformación en elementos con comportamiento elástico, cuando nos encontramos en situaciones de elementos con comportamientos no lineales será necesario recurrir a formas de análisis más complejas.

De esta forma, cualquier configuración nueva del sistema (q) que sea lo suficientemente cercana a la inicial (p) y que cumpla sus restricciones es equivalente a la misma, el sistema no se ha deformado.

La tensegridad consigue la capacidad de rigidez por la disposición de sus elementos y la interacción entre los mismos. Una característica importante a la hora de aguantar dichos esfuerzos a los que se somete la estructura es el pretensado de sus elementos a tracción (cables). Como hemos podido comprobar en la analogía del balón, la estructura se encuentra en una situación de tensión antes de sufrir ninguna fuerza exterior.

Es decir, a medida que aumenta el peso sobre la estructura, aumenta la tensión de sus elementos y mayor es su resistencia y rigidez, por lo que se comportan mejor a mayores cargas. La resistencia va aumentando hasta llegar al estado último (colapso) que se produce cuando los elementos rígidos a compresión pandean o cuando los elementos a tracción ceden.



Fig 50. Demostración de la carga soportada por la tensegridad propia (Fig 48)

- Estabilidad

Podemos definir estabilidad como la propiedad que tiene la estructura de volver al equilibrio tras sufrir una perturbación. Podemos diferenciar entre dos tipos de estabilidad según el comportamiento de la estructura.

La estabilidad única

Se da cuando el sistema no tiene grados de libertad, es decir, gráficamente su solución es un punto. Aplicado al espacio real, podríamos decir que obtenemos esta estabilidad cuando la posición de reposo ante la perturbación es única y el sistema tiende a volver a la misma. Este punto de reposo es el más eficiente energéticamente hablando y donde se satisfacen, además, las ecuaciones referidas al equilibrio de fuerzas (Primera Ley Fundamental de Newton) ⁶

Podemos ver una representación gráfica con un ejemplo simple. Una media esfera que dentro alberga una bola en reposo:

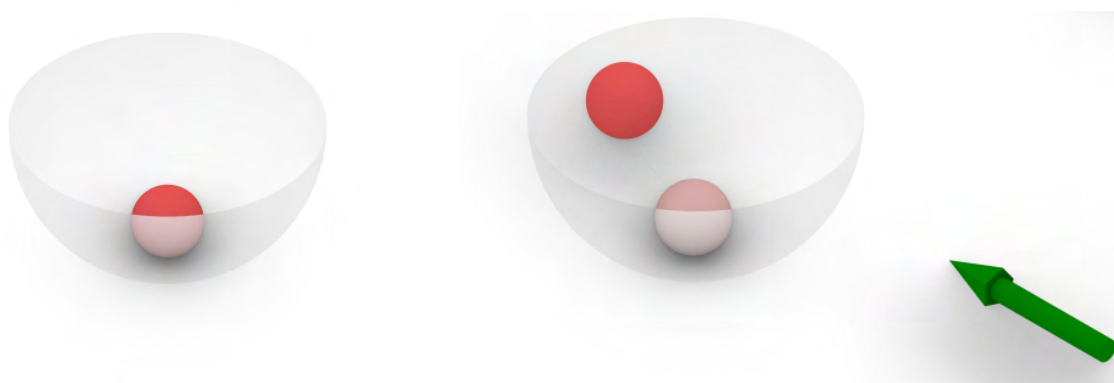


Fig 51 y 52. Imágenes de elaboración propia a partir del concepto gráfico de estabilidad única

En la primera imagen la bola roja se encuentra en reposo dentro del punto más bajo de la media esfera. En la segunda imagen una fuerza horizontal actúa sobre el sistema y hace que la bola roja se desplace por las paredes de la esfera. En este caso, dicha fuerza horizontal podría tener cualquier dirección e intensidad (suponiendo que esta es una representación parcial donde la media esfera sería una esfera entera, la fuerza entonces podría tener cualquier dirección e intensidad a lo largo de los 360° del espacio)

⁶ La primera parte de la Primera Ley Fundamental de Newton establece que “En ausencia de fuerzas externas, un objeto en reposo permanece en reposo y un objeto en movimiento continúa moviéndose con velocidad constante en línea recta. Esta ley establece el concepto de inercia, que es la tendencia de los objetos a resistir cambios en su estado de movimiento.”

La trayectoria de la bola al desplazarse depende de donde actúe la fuerza externa y la intensidad de la misma, sin embargo, por la mencionada Ley Fundamental de Newton, la posición final de la bola sería exactamente la misma que la inicial.



Fig 53 y 54. Imágenes de elaboración propia a partir del concepto gráfico de estabilidad única (II)

Entonces la esfera exterior representa el sistema de ecuaciones posición de la tensegridad mientras que la bola roja representa la solución. De este modo vemos que sea cual sea la fuerza externa que actúe sobre el sistema, la solución siempre será la misma al no disponer de grados de libertad.

Aplicamos ahora el mismo concepto a un modelo de tensegridad:

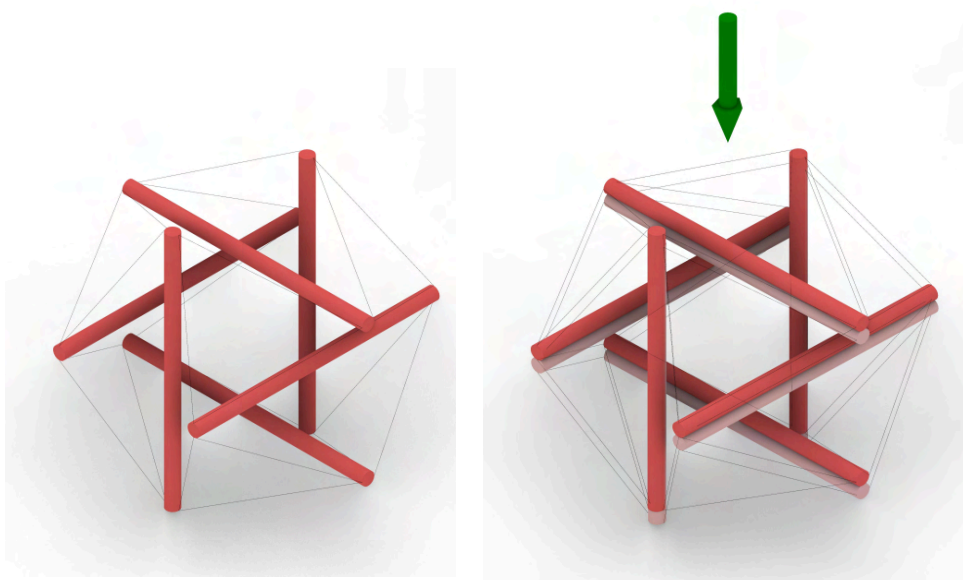


Fig 55 y 56. Imágenes de elaboración propia aplicando el anterior concepto sobre un modelo básico de tensegridad

Podemos aplicar entonces esta teoría a un modelo de tensegridad básico de seis barras. Una tensegridad tendrá una estabilidad única cuando tras una perturbación externa la solución de su nuevo equilibrio sea la misma que lo era antes de dicha perturbación. En la segunda imagen vemos la situación deformada de la tensegridad con una fuerza superior actuando sobre ella (modelo rosa claro) cuando esta fuerza desaparezca, si la tensegridad vuelve a su equilibrio de la imagen primera, será estable en este aspecto. Veamos un ejemplo real:

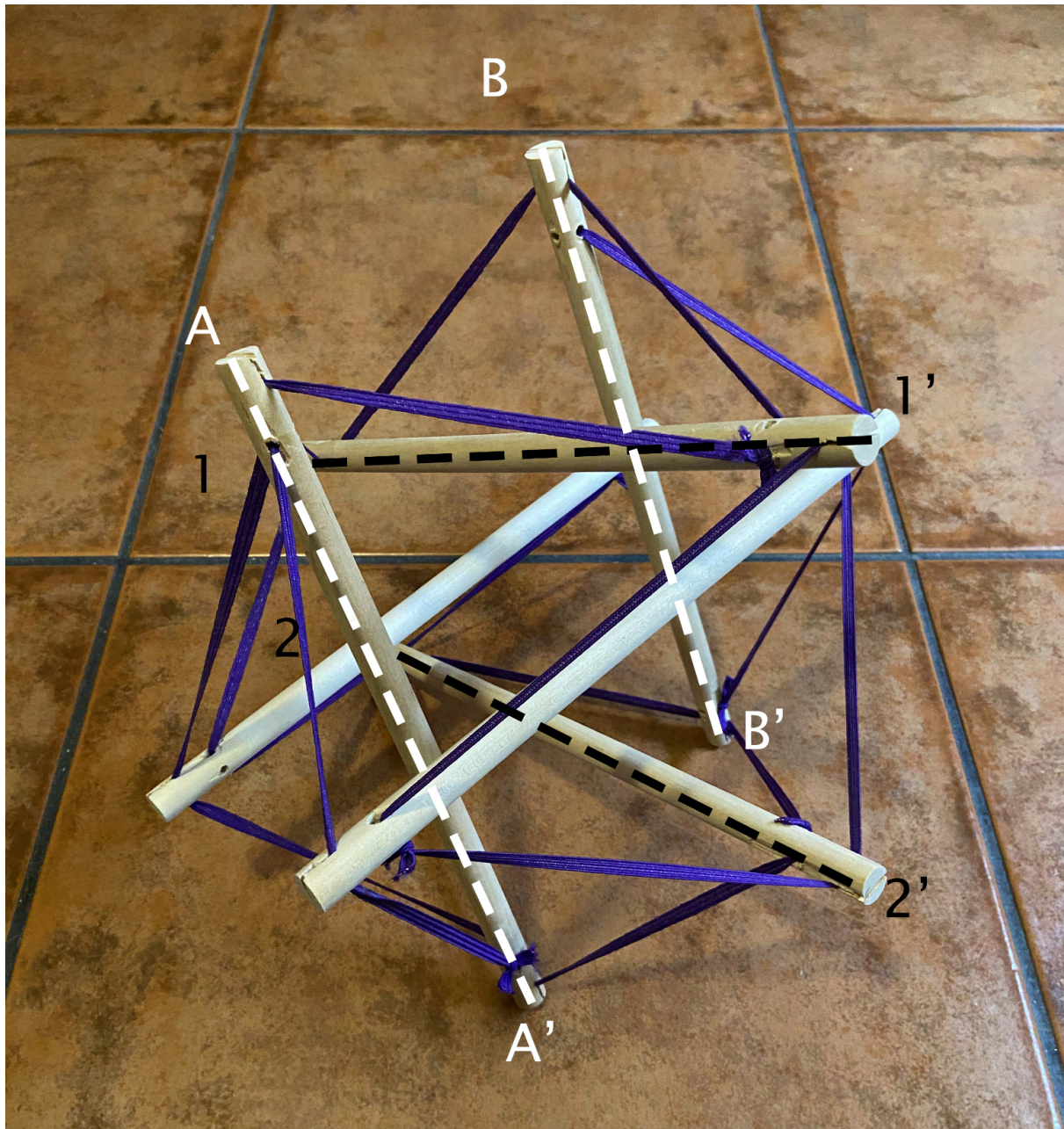


Fig 57. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se aplica el concepto anterior de estabilidad única antes de la perturbación (equilibrio = reposo)

La tensegridad se encuentra en equilibrio sin ninguna fuerza externa sobre ella

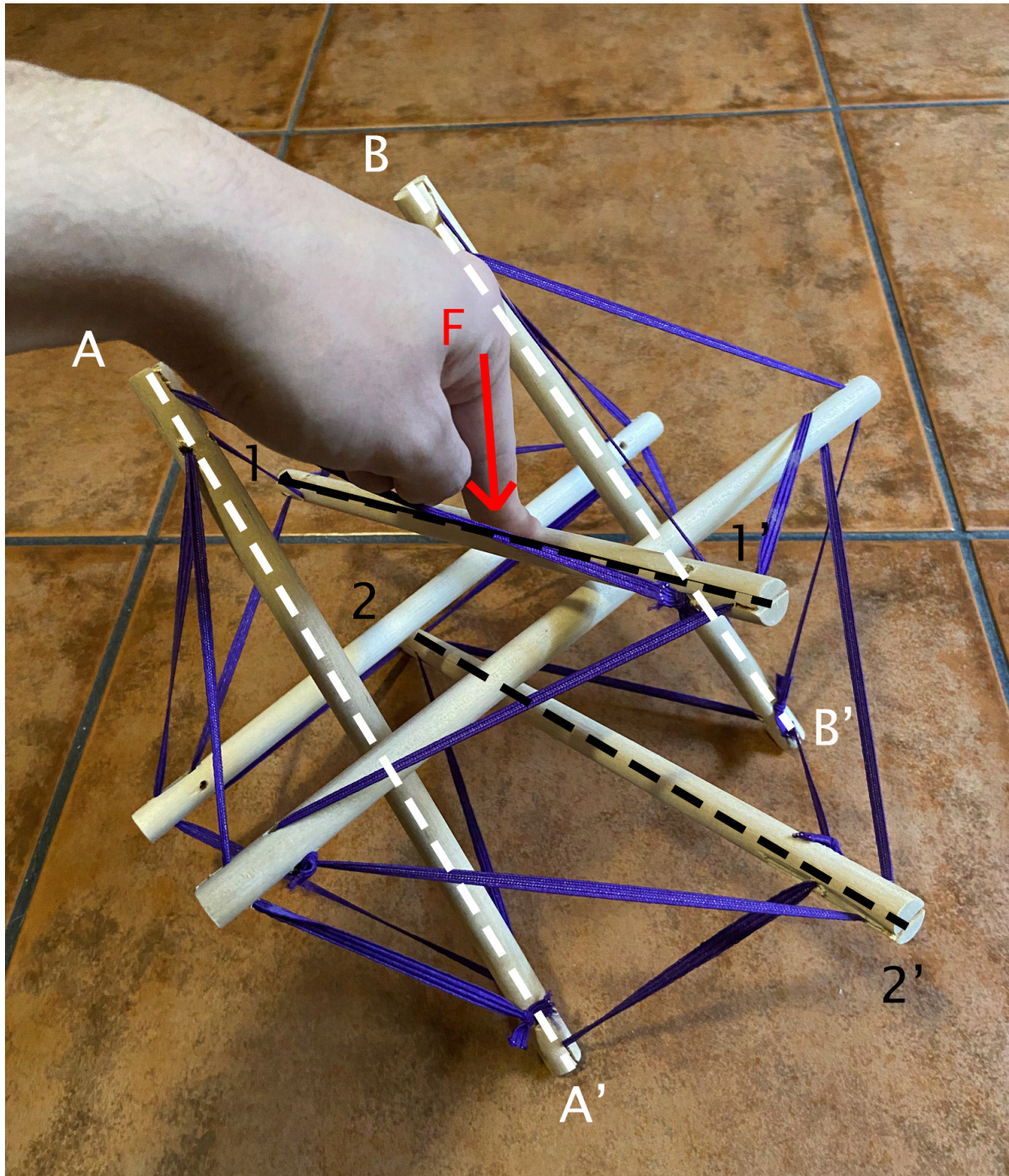


Fig 58. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se aplica el concepto anterior de estabilidad única durante la perturbación (desequilibrio = no reposo)

Aplicamos una fuerza vertical actuando sobre la tensegridad que la saca de su equilibrio inicial de modo que esta se deforma ligeramente desplazándose en la dirección de dicha fuerza para resistirla. La tensión que ejercen los cables sobre la estructura de barras aumenta para conseguir un nuevo equilibrio.

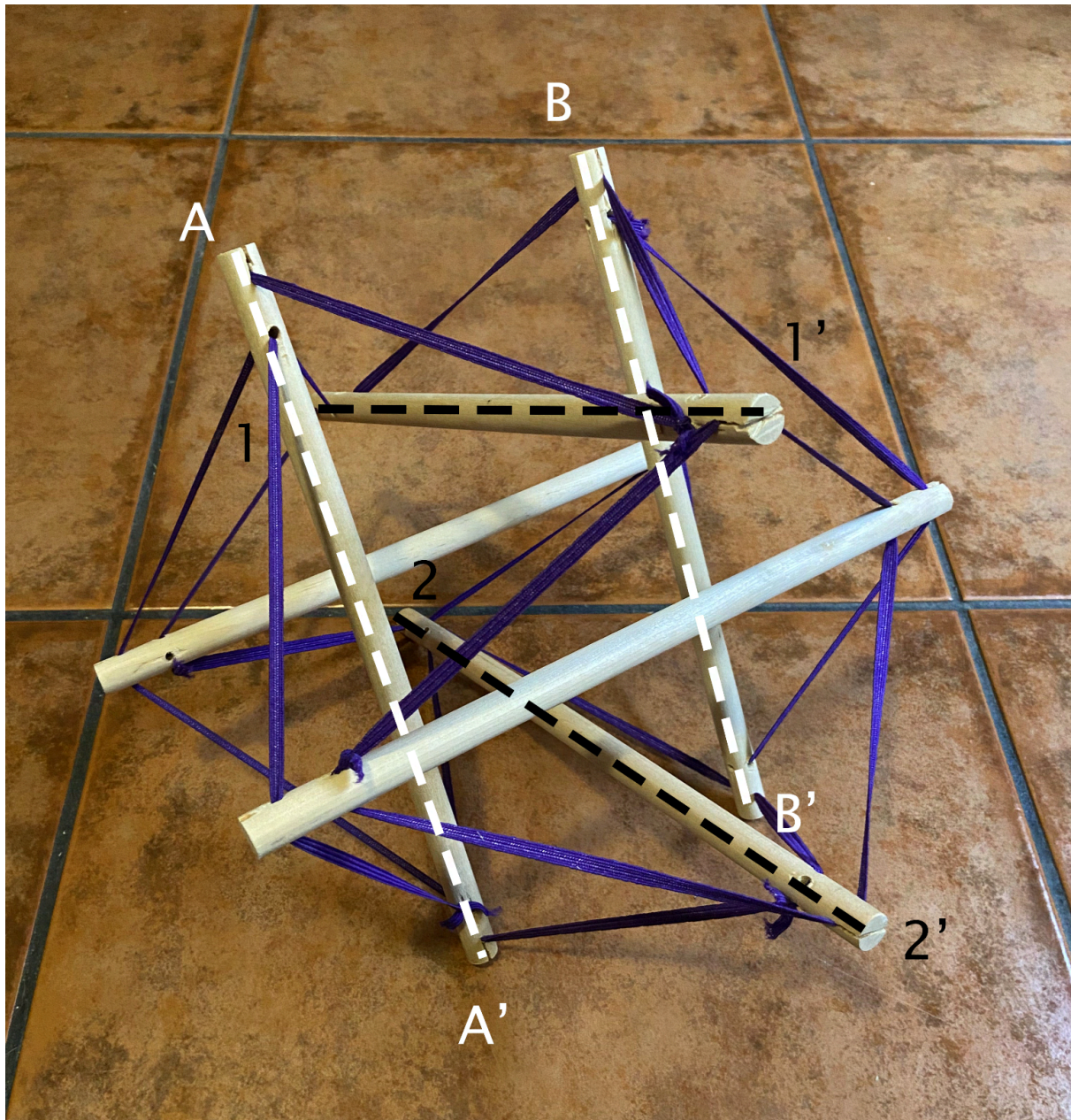


Fig 59. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se aplica el concepto anterior de estabilidad única tras la perturbación (vuelta a su equilibrio inicial = reposo)

Al desaparecer la fuerza vertical la tensegridad recupera su posición de equilibrio inicial gracias a la fuerza tensional de sus cables. La posición de equilibrio final es la misma que la inicial antes de la fuerza.

Estabilidad lineal o en trayectoria

Se da cuando el sistema que define la tensegridad tiene un grado de libertad. Un sistema se considera globalmente estable si las soluciones tienden a converger a una solución estable independientemente de las condiciones iniciales. Es decir, cuando las soluciones posibles satisfacen de nuevo un sistema de equilibrio. El nombre de esta estabilidad se debe a que todas estas posibles soluciones no son arbitrarias si no que son equivalentes y se relacionan entre ellas mediante un elemento lineal ya sea una recta o una curva. El elemento lineal de posibles soluciones es fruto del grado de libertad.

Veámoslo de nuevo con un ejemplo gráfico simple, en este caso, una bola dentro de medio cilindro tumbado.



Fig 60 y 61. Imágenes de elaboración propia a partir del concepto gráfico de estabilidad lineal

La primera imagen muestra la bola roja en el punto más bajo del cilindro en un estado de reposo. En este caso y a diferencia de la esfera, no es irrelevante la situación de la fuerza actuante si no que esta es muy determinante. En la segunda imagen vemos una fuerza horizontal actuando que crea una trayectoria concreta en el movimiento de la bola.

Para que ocurriese lo mismo que en la situación de la esfera y que la bola acabe en una posición final exactamente igual que la inicial sólo podría suceder si la fuerza horizontal es exactamente perpendicular al borde del cilindro y estuviese centrada con el eje central de la bola, despreciando cualquier perturbación externa o debida al material, en un espacio perfecto.

En una situación distinta, la mayoría de los casos, la bola experimenta una trayectoria curva a lo largo del volumen vacío del cilindro hasta que encuentra una nueva posición de equilibrio en reposo.

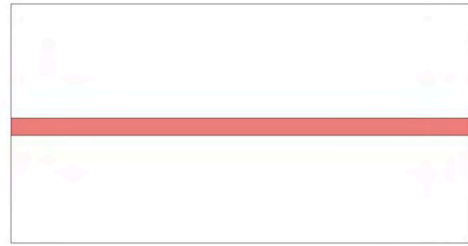
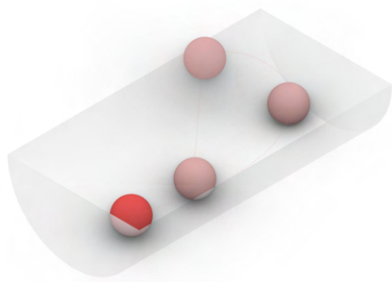


Fig 62 y 63. Imágenes de elaboración propia a partir del concepto gráfico de estabilidad lineal (II)

La bola alcanza su posición final en el mismo eje donde se encontraba su posición inicial pero distanciada del punto origen concreto. Es decir, en este caso la solución del sistema de ecuaciones posiciones es una recta.

Volvamos entonces a aplicar este concepto a la misma tensegridad de seis barras

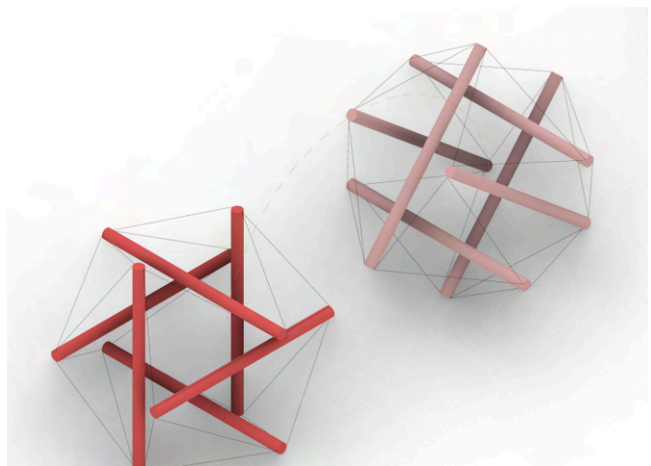
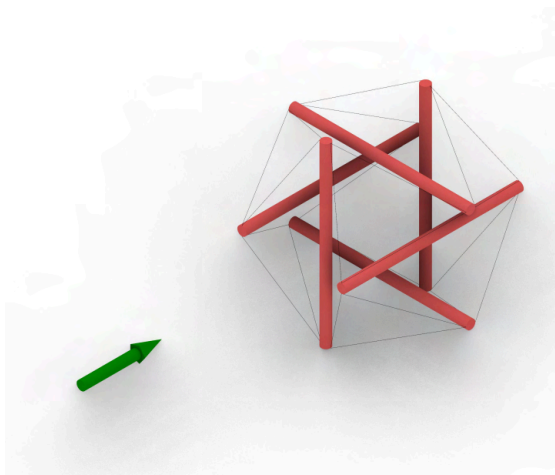


Fig 64 y 65. Imágenes de elaboración propia aplicando el anterior concepto sobre un modelo básico de tensegridad

La fuerza horizontal en este caso es mayor y consigue volcar a la tensegridad haciendo que rote 90 grados sobre uno de sus lados.

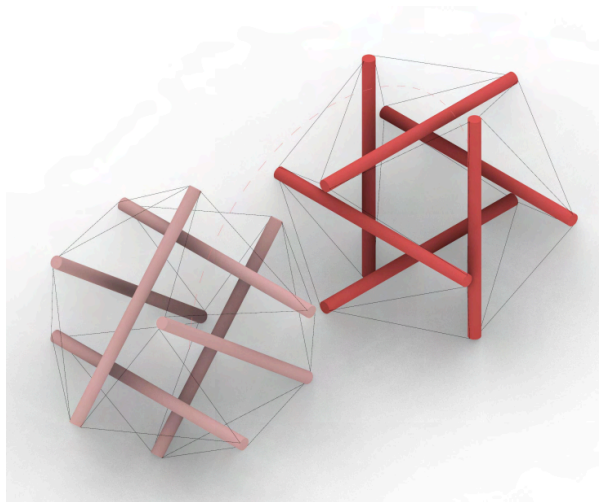


Fig 66. Imagen de elaboración propia aplicando el anterior concepto sobre un modelo básico de tensegridad (II)

Suponemos que la fuerza no es suficientemente intensa para provocar varios giros y tras el anteriormente mencionado giro de 90 grados se detiene. La tensegridad alcanza entonces una nueva posición de equilibrio estable que se diferencia de su posición inicial.

Sin embargo, si escribiéramos la matriz posición de los elementos de la tensegridad y viéramos su variación respecto al espacio tridimensional, veríamos que la solución final e inicial de equilibrio son distintas pero no arbitrarias entre sí, si no que estas serían equivalentes dado que todos los elementos de la tensegridad se han desplazado en base al mismo movimiento.

Es así entonces como una tensegridad sería estable linealmente, con un abanico de opciones finales equivalentes a sus posiciones de equilibrio iniciales tras una fuerza externa. Esta característica será mencionada posteriormente dado que proporciona a la tensegridad una ventaja de versatilidad en cuanto a su posición, sin tener una posición concreta “correcta” o “de pie” si no que se puede apoyar de forma eficiente sobre cualquier parte de su volumen.

Veamos este caso en un ejemplo real:

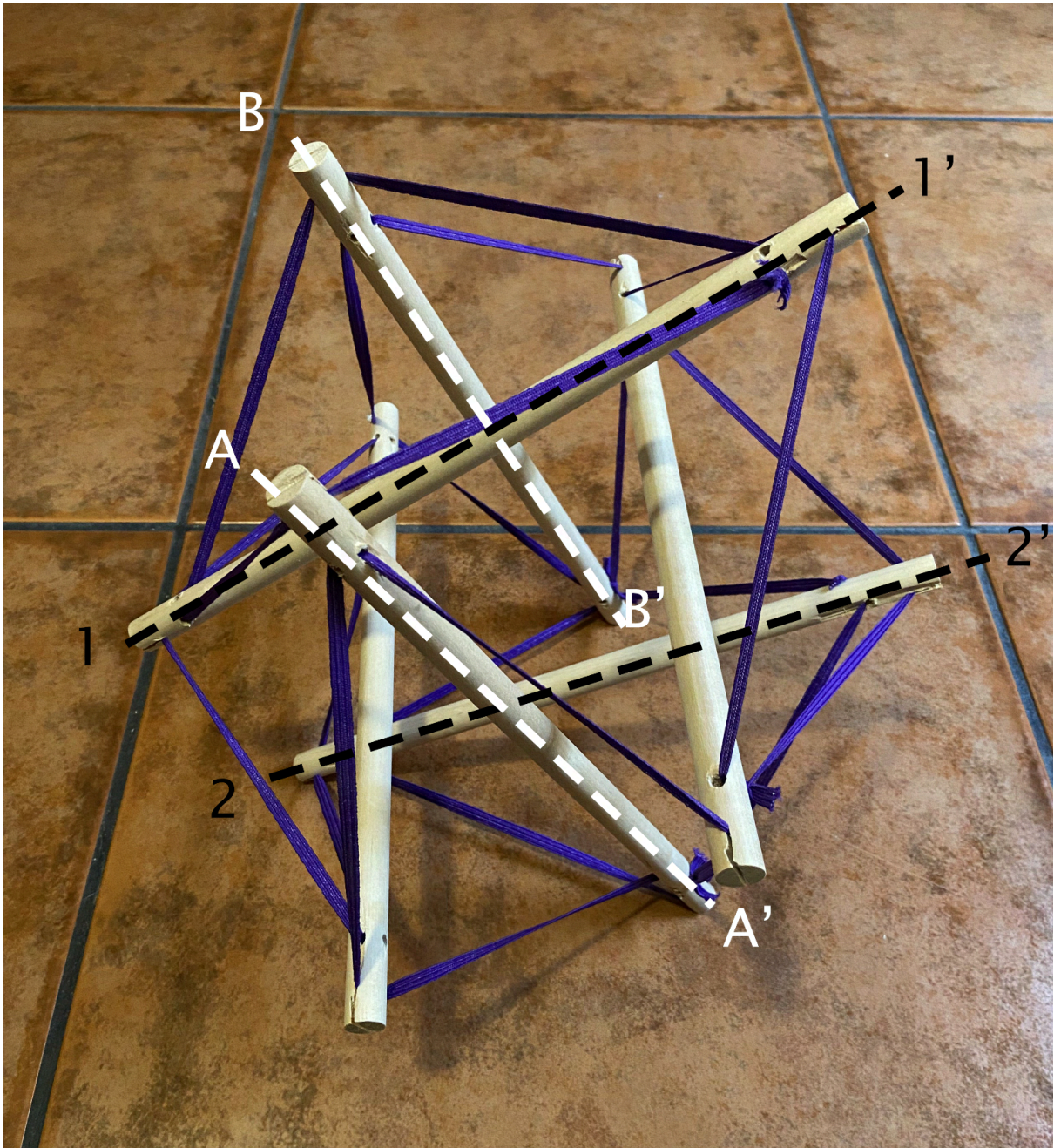


Fig 67. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se le aplica el concepto anterior de estabilidad lineal antes de la perturbación (equilibrio = reposo)

La tensegridad se encuentra en equilibrio sin ninguna fuerza externa sobre ella

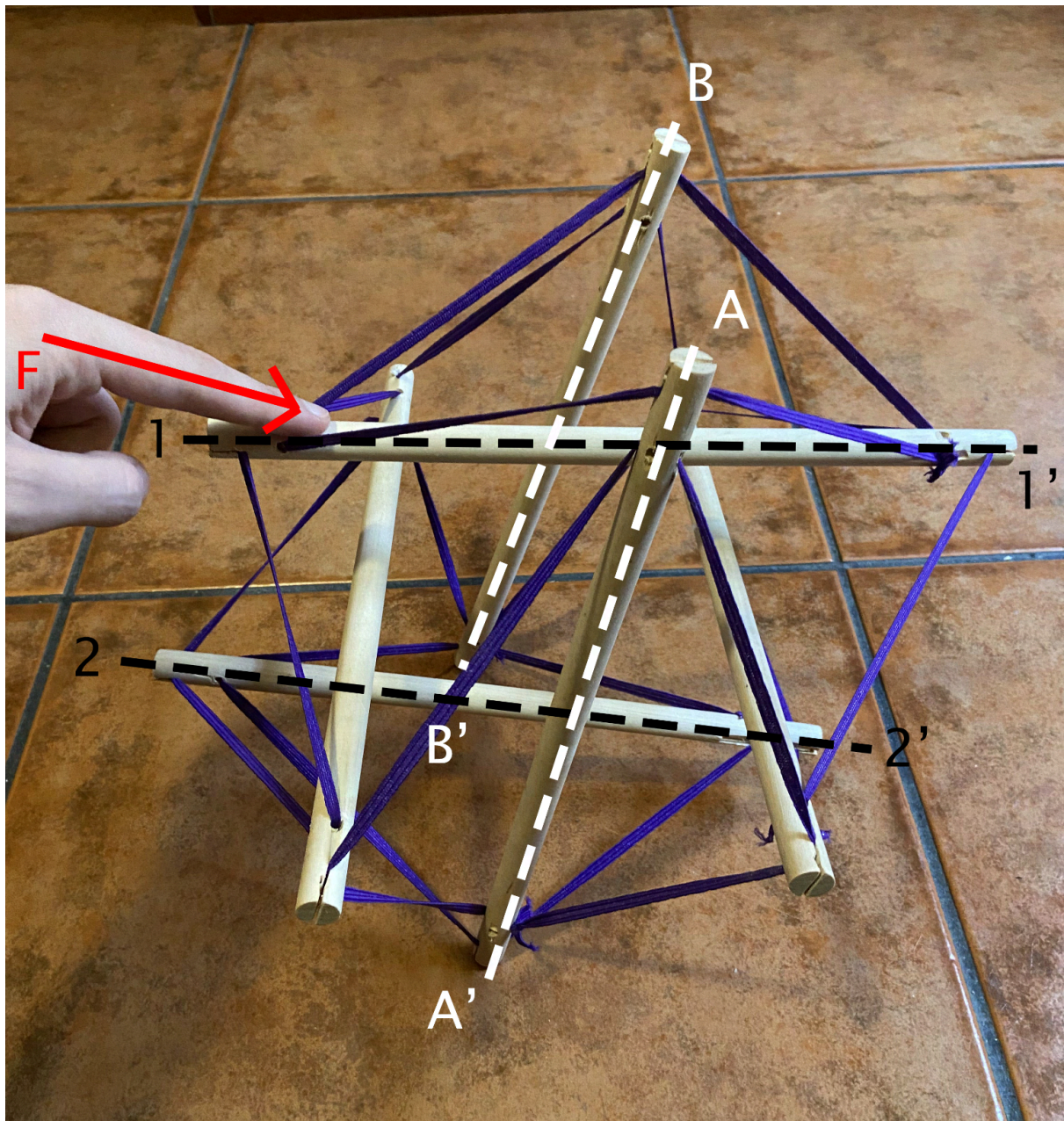


Fig 68. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se le aplica el concepto anterior de estabilidad lineal durante de la perturbación (desequilibrio = no reposo)

Una fuerza, en este caso horizontal, actúa sobre la tensegridad que se encontraba en equilibrio. Debido a la dirección de la fuerza, la tensegridad experimenta un giro hacia la dirección de la fuerza.

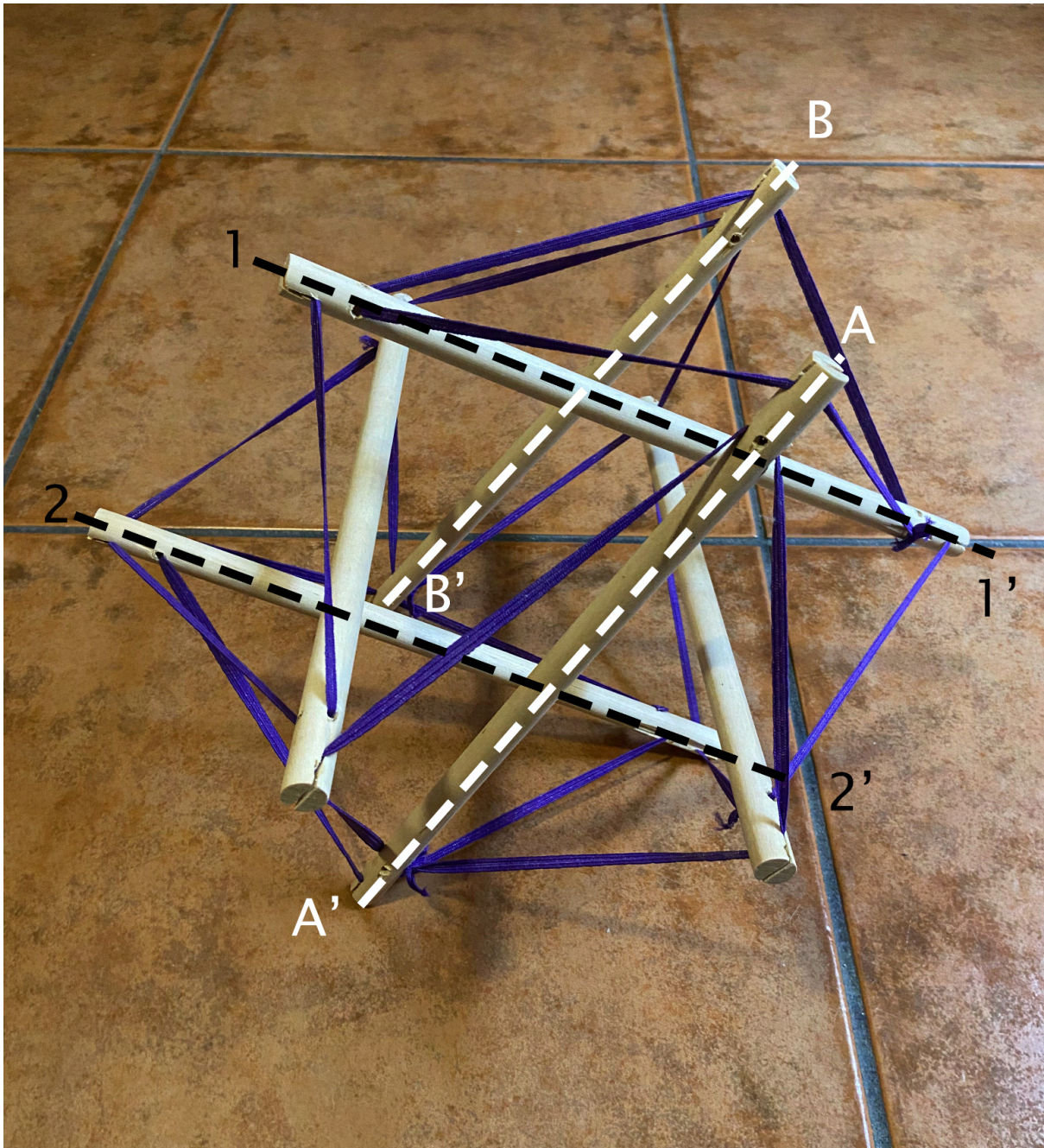


Fig 69. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se le aplica el concepto anterior de estabilidad lineal tras de la perturbación (nuevo equilibrio = reposo)

La tensegridad finaliza el giro y cae apoyada sobre otro de sus lados encontrándose ahora en un nuevo equilibrio. La posición de equilibrio final y la inicial no son la misma pero son ambas igual de válidas.

- Equilibrio de fuerzas

A la hora de conseguir una tensegridad plegable es importante conocer cómo se comportará al modificar sus elementos y cómo obtener una estabilidad de la estructura tras haber sido desplegada, lo que implicara algún giro, traslación, etc. Como cualquier sistema estructural estable se necesita encontrar el equilibrio de fuerzas para que el sistema esté en reposo. Lo veremos con un ejemplo simple:

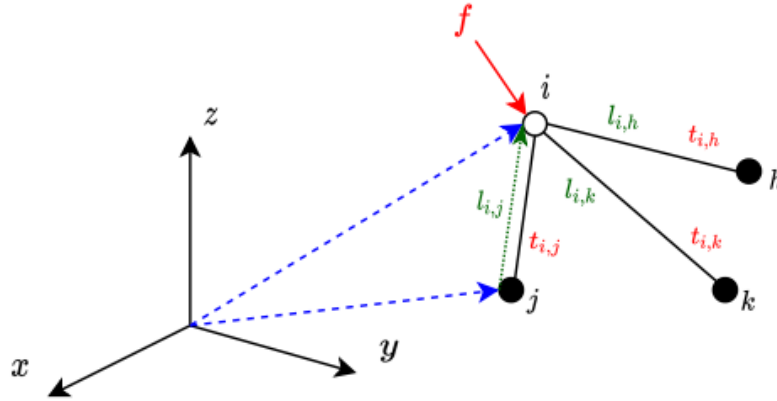


Fig 70. Imagen ejemplo del equilibrio de fuerzas en un sistema de cuatro nodos y tres barras. [09]

Supongamos una estructura formada por un nodo i unido a otros tres nodos h, j, k mediante unos elementos lineales como cables o barras. Estos elementos lineales tienen su longitud l y su tensión interna t . Por último suponemos que en el nodo i se aplica una fuerza externa f para mover y/o modificar el sistema.

Suponiendo que el sistema es ideal y despreciando los pesos de los elementos, podríamos describir el equilibrio en el nodo i como:

$$\vec{t}_{i,j} + \vec{t}_{i,k} + \vec{t}_{i,h} + \vec{f} = \vec{0}$$

donde la t es la fuerza interna de cada elemento lineal. Si sabemos las coordenadas de cada nodo podemos obtener la dirección de las fuerzas internas de los elementos lineales pero no su magnitud. Podemos obtener la representación de la fuerza interna de uno de estos miembros normalizando la tensión interna de dicho elemento por su longitud. Aquí tendríamos un ejemplo del miembro que une el nodo i, j

$$\{t_{j,i}\} = \frac{t_{i,j}}{l_{i,j}} \begin{Bmatrix} x_i - x_j \\ y_i - y_j \\ z_i - z_j \end{Bmatrix}$$

y a su vez siendo la representación del equilibrio en el nodo i :

$$\frac{t_{i,j}}{l_{i,j}} \begin{Bmatrix} x_i - x_j \\ y_i - y_j \\ z_i - z_j \end{Bmatrix} + \frac{t_{i,k}}{l_{i,k}} \begin{Bmatrix} x_i - x_k \\ y_i - y_k \\ z_i - z_k \end{Bmatrix} + \frac{t_{i,h}}{l_{i,h}} \begin{Bmatrix} x_i - x_h \\ y_i - y_h \\ z_i - z_h \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

donde t es la fuerza interna en cada elemento lineal, l la longitud de dicho elemento y x, y, z las coordenadas de cada nodo. El resultado de dividir la fuerza interna de cada miembro por su longitud nos da la densidad de fuerza de cada elemento.

Podemos entonces denotar la ecuación de equilibrio general de la tensegridad como:

$$\begin{bmatrix} \dots & 0 & \dots \\ \dots & \vdots & \dots \\ \dots & x_i - x_j & \dots \\ \dots & y_i - y_j & \dots \\ \dots & z_i - z_j & \dots \\ \dots & 0 & \dots \\ \dots & \vdots & \dots \\ \dots & -(x_i - x_j) & \dots \\ \dots & -(y_i - y_j) & \dots \\ \dots & -(z_i - z_j) & \dots \\ \dots & 0 & \dots \\ \dots & \vdots & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vdots \\ q_{i,j} \\ \vdots \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vdots \\ f_{i,x} \\ f_{i,y} \\ f_{i,z} \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

En la matriz principal cada columna corresponde a un miembro lineal (barra o cable) con su signo correspondiente (positivo en compresión y negativo en tracción) mientras que las filas son las condiciones para el equilibrio en cada nudo. Por cada nudo debe haber d filas, siendo d la dimensión del espacio.

En una estructura con n nodos y b elementos, la matriz general tendrá dn filas y b columnas. Si dichas ecuaciones de equilibrio se escriben para cada nodo obtendremos una ecuación general de la tensegridad.

$$\mathbf{A}\mathbf{q} = \mathbf{f}$$

Donde $[\mathbf{A}] \in R^{dn \times b}$ es la matriz de equilibrio, $\{\mathbf{q}\} \in R^b$ es el vector densidad de fuerza de cada elemento lineal y $\{\mathbf{f}\} \in R^{dn}$ es el vector de las fuerzas externas.

Dado que una tensegridad debe ser estable y rígida por sí misma sin necesidad de fuerzas exteriores, se debe cumplir que:

$$\mathbf{A}\mathbf{q} = \mathbf{0}$$

Vamos a ver un ejemplo de tensegridad que se convierte en plegable y cómo afecta esto a sus condiciones de rigidez, autotension y equilibrio de fuerzas.

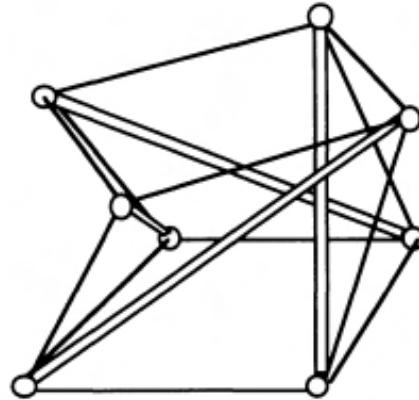


Fig 71. Ejemplo gráfico de una tensegridad plegable formada por cuatro barras y ocho nodos [05]

Existen dos escenarios: aplicar una fuerza vertical hacia abajo para plegar la tensegridad o una fuerza vertical hacia arriba para conseguir una estructura tensa y rígida.

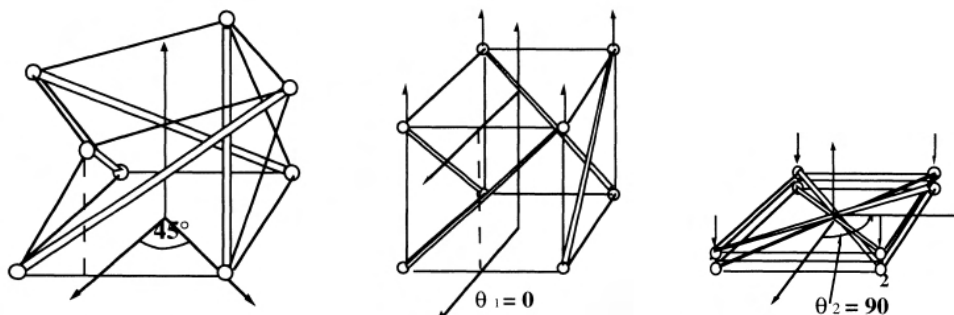


Fig 72. Ejemplo gráfico de la anterior tensegridad (Fig 71) en sus distintas fases de plegado [05]

Situación 1 : la tensegridad se encuentra en su estado de reposo, el ángulo de rotación entre el cuadrado que forman sus nodos superiores es 45 respecto al inferior.

Situación 2 : la tensegridad recibe una fuerza exterior hacia arriba lo que consigue una forma de cubo y mayor rigidez, el ángulo entre sus cuadrados es 0.

Situación 3 : la tensegridad recibe una fuerza exterior hacia abajo que la pliega por completo, el ángulo entre sus cuadrados es 90 .

Las situaciones 2 y 3 son más inestables que la 1, al haber llegado ahí mediante fuerzas externas que al desaparecer, volverían a dejar a la tensegridad en el estado de situación 1 que es la situación de reposo. Como dijo Connolly, la ecuación que modifica una tensegridad es

$Aq = f$ mientras que la ecuación que mantiene una tensegridad es un estado óptimo es la que no precisa de fuerzas externas para estar en equilibrio por lo que $Aq = 0$.

Cojamos como ejemplo el cambio de la tensegridad de la situación 1 a la situación 2. La matriz A describe la posición de los elementos de la tensegridad y la relación entre ellos, de modo que podemos conocer la posición inicial de los elementos y cuál queremos que sea la posición final. Por otro lado tenemos la q que definimos anteriormente como densidad de fuerza y que era igual a la fuerza interna de cada elemento entre su longitud. ($t_{i,k} / l_{i,k}$)

Sabemos que el producto entre esta matriz general A y la densidad de fuerza de los elementos q debe ser igual a 0 por lo que una forma de conseguirlo es modificando la longitud de los elementos, que es más sencillo que calcular una tensión interna por elemento concreta.

De este modo podemos partir de la premisa de mantener la longitud de las barras y jugar con la longitud de los cables, haciendo una representación del modelo en todas las situaciones nos damos cuenta de que en la situación inicial los cable verticales tienen la menor longitud de todas mientras que en las situaciones 2 y 3 los cables verticales miden lo mismo.

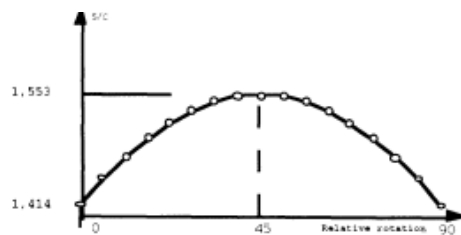


Fig 73. Gráfico de la relación de la relación entre s/c (cociente longitud barra/cable) y el ángulo entre los cuadrados formados por las barras superiores e inferiores en la tensegridad anterior (Fig 71) [05]

En esta imagen podemos ver como varía el cociente entre la longitud de los cables y las barras según cambia el ángulo entre los cuadrados de nodos superiores e inferiores viendo que estos coinciden cuando el ángulo es 0 (en la situación 2) y 90 (en la situación 3).

De este modo vemos que podemos aplicar una fuerza vertical para cambiar la configuración de la tensegridad y una vez conseguida la forma deseada, modificamos la longitud de los cables para conseguir que esa configuración sea permanente y volver a cargar de tensión a la estructura. Por ejemplo una vez obtenida la situación 2 de cubo, cambiando la longitud de los cables verticales, la tensegridad no podrá volver a su estado inicial de reposo dado que esos cables no se pueden encoger y estaremos ante una nueva situación de equilibrio.

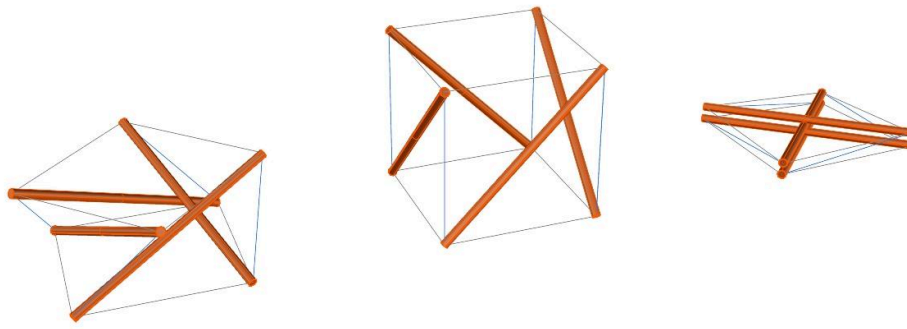


Fig 74. Representación propia de la anterior tensegridad (Fig 71) en sus distintas fases de plegado

Suponiendo que mantenemos la longitud de los cables horizontales que forman los cuadrados y de las barras, en cada situación obtenemos:

Situación 1 : longitud barras = 6 m / longitud cables verticales = 3,26

Situación 2 y 3 : longitud barras = 6 m / longitud cables verticales = 4,24

Con esta modificación en la longitud de los elementos conseguimos nuevas configuraciones en la tensegridad sin hacer uso de fuerzas externas permanentes.

5.4. Características óptimas

Una vez cumplidos los requisitos necesarios para conseguir una tensegridad funcional, nos encontramos otra serie de cualidades que hacen a una tensegridad desplegable eficiente, es decir, que tenga un mayor rendimiento y trabaje mejor:

- Diseño sencillo

A la hora de diseñar una tensegridad las posibilidades son infinitas, esto nos permite una increíble variedad de opciones. Podemos partir de simples estructuras con 2, 3 o 4 barras que nos permiten una manipulación fácil y directa a la vez que un cálculo sencillo.



Fig 75. Diseño simple de tensegridad de tres barras [39]

Sin embargo a medida que nos adentramos en el mundo de las tensegridades y vamos explorando sus posibilidades podemos llegar a estructuras muy complejas. La forma más fácil y usada de conseguir una estructura amplia basada en tensegridades es mediante la unión de varios módulos más sencillos. Este método nos resulta fácil cuando el número de módulos unidos es bajo.

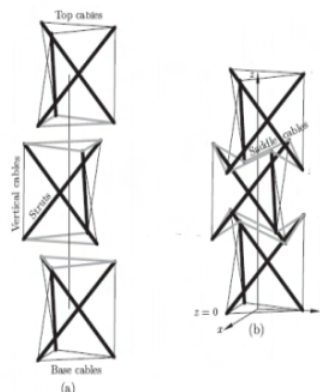


Fig 76. Imagen de modelo unión de módulos de tres barras [40]

A medida que la estructura va creciendo para poder usarse en un contexto mayor lo hace su complejidad, esto pasa tanto en tensegridades normales como en plegables. La conexión entre elementos se vuelve cada vez más sofisticada y aunque podemos hacer uso de programas algorítmicos de cálculo para obtener las ecuaciones que definen cualquier tensegridad, su construcción también se vuelve difícil y requiere un procedimiento meticuloso y a veces tedioso.

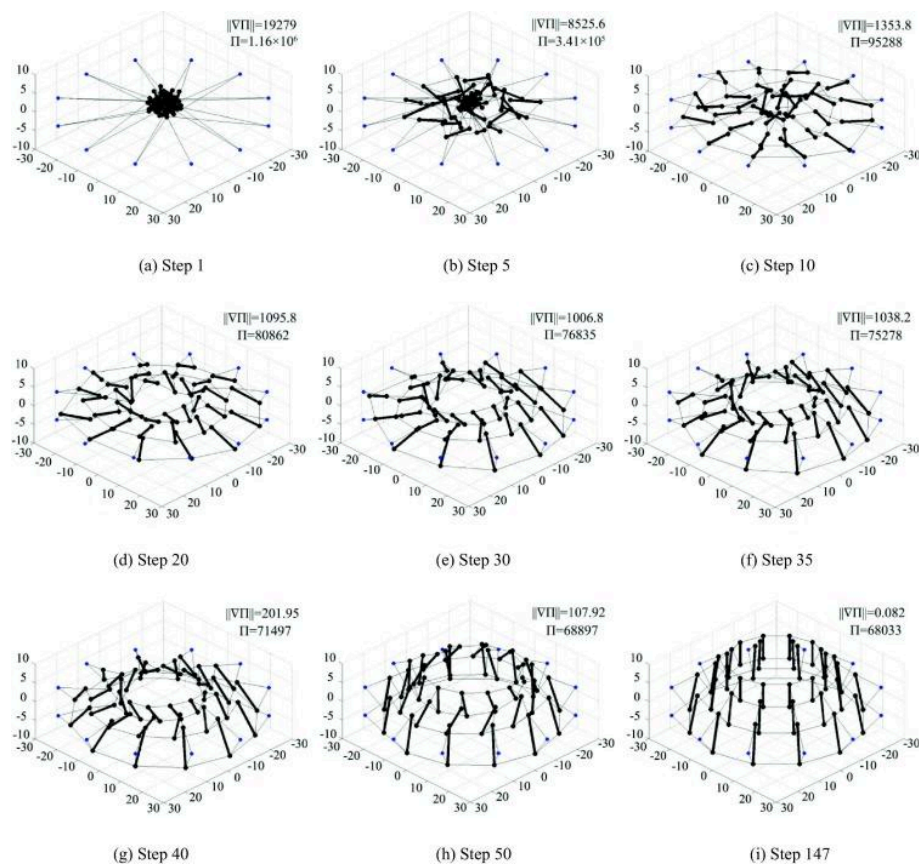


Fig 77. Ejemplo del proceso de montaje de una tensegridad compleja [41]

Esta última situación es la que deberíamos evitar.

Como vimos anteriormente, uno de los puntos fuertes de la arquitectura efímera era su facilidad en cuanto al manejo. Una estructura muy complicada de calcular y diseñar haría que el proceso de su construcción fuese igual de complejo por lo que requeriría de bastante tiempo y medios para su ejecución.

- Adaptabilidad

Como parte de la arquitectura efímera, se prevé que la estructura se monte y desmonte cambiando su ubicación constantemente, para esto es importante que la tensegridad se pueda adaptar al mayor número posible de medios

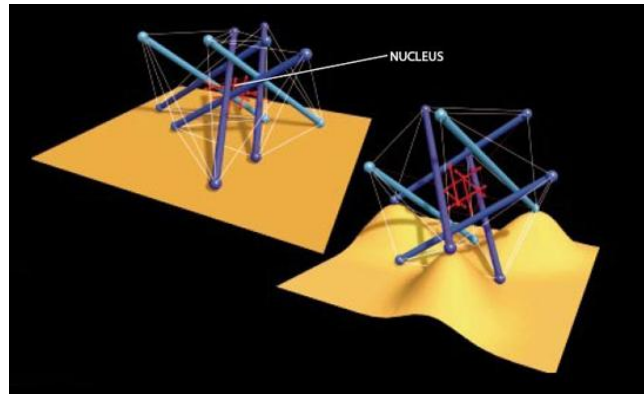


Fig 78. Representación de una misma tensegridad adaptándose a distintos relieves [42]

Algunas tensegridades tienen una cualidad que les hace fácilmente adaptables al medio y es que son triaxiales, es decir, no tienen una posición en la que estén “de pie” si no que funcionan exactamente igual independientemente del lado que apoyen sobre el suelo (como vimos en el ejemplo de la estabilidad lineal Fig 67 y Fig 69)

Esta característica es sin duda una cualidad a tener en cuenta a la hora de salvar algún obstáculo en el terreno o necesitar ocupar un espacio de una forma concreta.

Las tensegridades plegables consiguen su rigidez mediante la modificación de la longitud de algunos elementos, esto nos puede servir para conseguir una disposición distinta de los elementos según el perfil del plano de apoyo mediante estos cambios.

- Transporte

Esta característica va unida en gran medida a dos cualidades: la ligereza de los elementos que forman la tensegridad y a la compacidad de la tensegridad plegada.

Los elementos que componen la tensegridad debían ser ligeros para conseguir una estructura ligera y a la vez fácilmente desplegable. Como mencionamos anteriormente, los materiales como plásticos rígidos, fibras, metales ligeros o maderas permiten una manipulación fácil y eficiente. Estos materiales hacen que transportar la tensegridad pueda realizarse mediante medios sencillos como puede ser cargada por una persona o utilizando algún vehículo normativo.

Otro aspecto importante para un transporte fácil de la tensegridad es la forma en la que esta se compacta donde podemos diferenciar dos opciones principales:

- Plegado en un plano. Cuando, sobre el plano, toda la estructura se cierra en torno a una línea

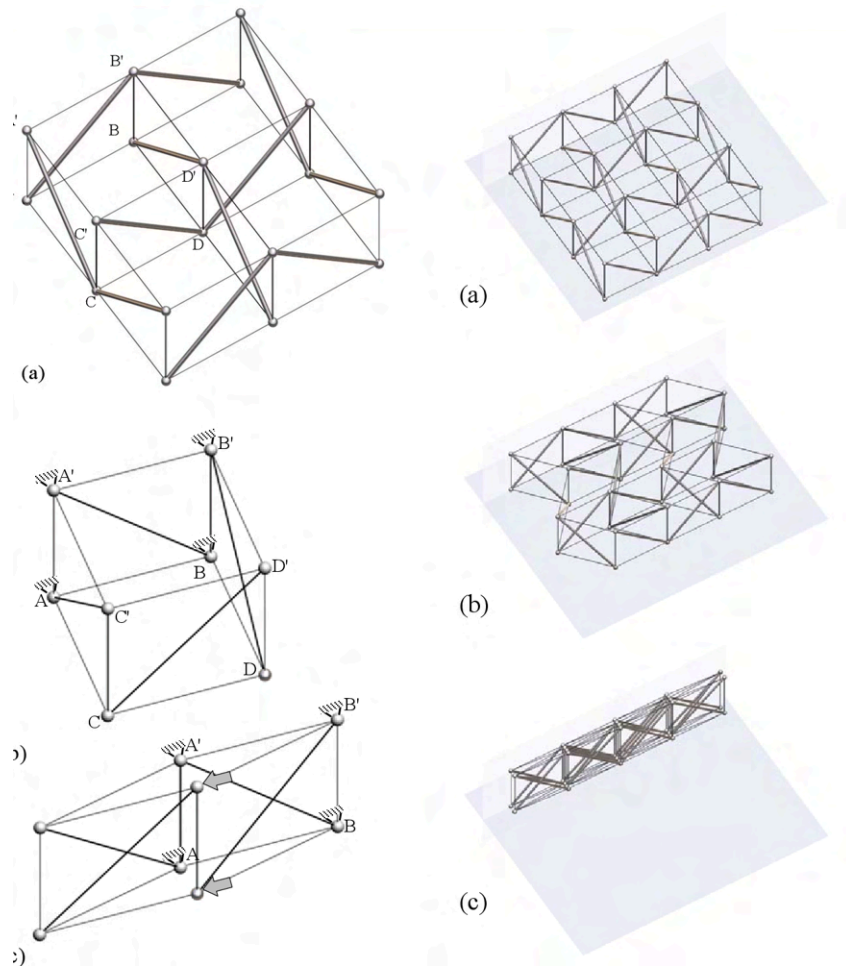
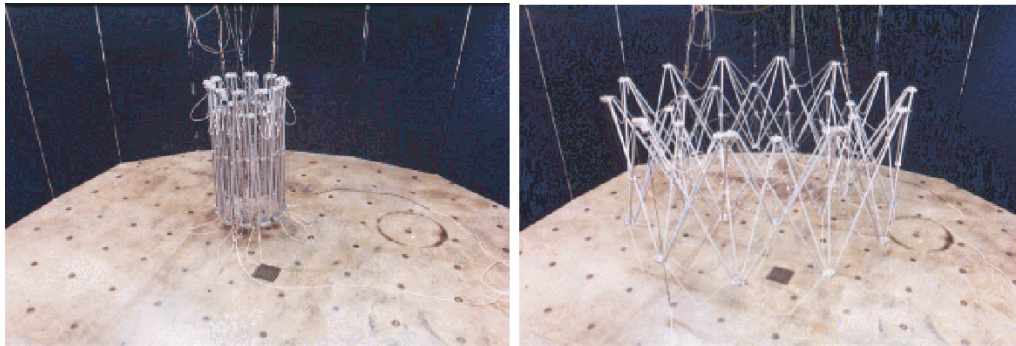


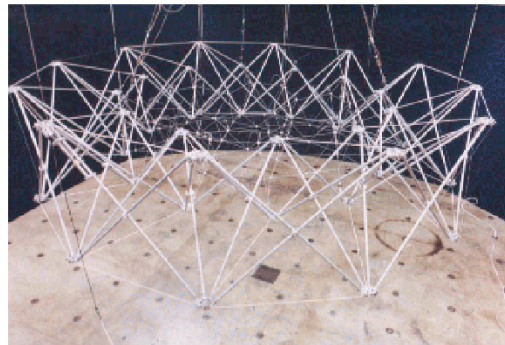
Fig 79. Representación de una tensegridad que se pliega sobre un plano [43]

- Plegado en eje: cuando, sobre el plano, toda la estructura se cierra en torno a un punto



(a)

(b)



(c)

Fig 80. Representación de una tensegridad que se pliega sobre un eje [43]

Siendo estas últimas más eficientes en el transporte en cuanto a dimensiones

- Durabilidad

Al igual que lo mencionado en los materiales, un buen uso de la arquitectura y sobre todo de la arquitectura reciclable es conseguir que esta dure en el tiempo lo máximo posible. Junto con el uso de materiales y un buen mantenimiento debemos conseguir que nuestras estructuras tengan una vida útil lo más larga posible.

Viendo estas características podemos concluir entonces que si una tensegridad plegable cumple las estrictamente necesarias y además se complementa con las opcionales, es un buen sistema de arquitectura efímera.

Materiales	
Ligereza	importante
Rigidez	imprescindible
Resistencia	imprescindible
Ecológico	importante
Aislante	opcional
Durabilidad	opcional
Características necesarias	
Autotensión	imprescindible
Rigidez	imprescindible
Estabilidad	imprescindible
Equilibrio de fuerzas	imprescindible
Características óptimas	
Diseño sencillo	importante
Adaptabilidad	importante
Transporte	importante
Durabilidad	opcional

imprescindible
 importante
 opcional

Fig 81. Tabla de elaboración propia resumen de la importancia de las características de una tensegridad plegable

Sin embargo, las tensegridades no están a la orden del día en el campo de la construcción. Desde su origen a finales del siglo XX se han utilizado a menudo en el campo del arte y en los últimos años hemos podido ver algo de avance en el campo de la ciencia. Entonces, si una tensegridad plegable puede ser un sistema óptimo en la construcción de espacios efímeros, ¿por qué no se usa tanto?

6. Comparación con otras tipologías convencionales

A continuación vamos a ver una comparación para una misma situación entre un sistema de tensegridad plegable y dos sistemas más extendidos en la arquitectura plegable como los sistemas articulados y los sistemas textiles. Estos son tres ejemplos sobre cada uno de los tipos a analizar que tienen una escala aproximada y que podrían ser utilizados antes las mismas necesidades.

Tipo 1: sistema articulado de elementos de madera ensamblados



Fig 82 y 83 . Fotografías de un sistema plegable articulado [33]

Tipo 2 : sistema desplegable de elementos textiles



Fig 84 y 85 . Fotografías de un sistema plegable con elementos textiles [44]

Tipo 3 : sistema de estructura tensegrítica con cubierta de lona textil

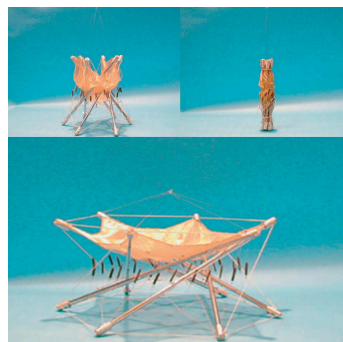


Fig 86 . Fotografía de un sistema plegable tensegrítico [45]

A continuación vamos a repasar los parámetros que hemos utilizado anteriormente para analizar la validez de las tensegridades plegables y los aplicaremos a las otras dos tipologías para compararlas.

Los ejemplos elegidos nos sirven de referencia aunque dentro de estas tipologías tan amplias distintos ejemplos podrían dar distintos parámetros dentro de una misma característica. Una breve descripción de los elementos seleccionados es:

- Tipo 1: Estructura formada por un gran marco de madera abatible que se pliega en un plano al que luego se van ensamblando los distintos elementos auxiliares como los cerramientos.
- Tipo 2: Estructura formada por el despliegue desde un volumen rectangular de dos alas formadas por elementos textiles que apoyan sobre dos elementos planos rígidos.
- Tipo 3: Estructura formada por una tensegridad que se pliega en eje y que forma un espacio circular en plano al desplegarse. Este ejemplo no está definido en la realidad por lo que una vez obtenida la estructura desplegada la habitabilidad del interior queda un poco libre.

1. Materiales

- Ligereza:

Tipo 1 : los elementos utilizados son maderas compactas que forman grandes elementos aislados. No son excesivamente pesados pero a la hora de tener una escala considerable los elementos necesitan ser llevados entre varias personas, al igual que el conjunto general de la estructura necesita de varias personas para poder desplegarse.

Tipo 2 : el conjunto de la estructura es ligera en una comparación relativa con otro volumen similar de elementos fijos. Los elementos auxiliares desplegables son bastante ligeros y fácilmente manipulables por una sola persona.

Tipo 3 : el conjunto de la estructura podría encontrarse entre los dos tipos anteriores en cuanto a ligereza dependiendo de los posteriores elementos de cerramiento a incluir.

- Rigidez

Tipo 1 : los elementos utilizados son lo suficientemente rígidos como para soportar la carga prevista sin problemas, es la ventaja que obtiene al usar elementos más “pesados”. Las maderas, yesos o metales que se utilizan tienen un constante k de rigidez (la cual vimos en la fórmula de rigidez de Hooke) mayor que elementos más ligeros como elementos textiles o plásticos.

Tipo 2 : los materiales de estructura son rígidos formados principalmente por metales aunque los elementos textiles no lo son tanto.

Tipo 3 : los materiales por sí mismos son rígidos y ganan rigidez al entrar en trabajo.

- Resistencia

Tipo 1: al ser elementos más pesados y rígidos obtienen también una mayor resistencia frente a fuerzas externas.

Tipo 2 : los elementos de estructura metálica son resistentes pero los textiles podrían sufrir daños más fácilmente frente a un exceso de cargas o un impacto externo.

Tipo 3 : los elementos de la tensegridad obtienen una tensión bastante elevada que les aporta resistencia y rigidez frente a cargas elevadas o perturbaciones.

- Ecológico

Tipo 1: al no disponer de ningún elemento poco convencional es fácil poder reutilizar elementos de construcciones posteriores para diseñar un nuevo proyecto de este tipo.

Tipo 2 : los elementos formados de materiales convencionales como la estructura metálica podrían ser relativamente fáciles de reutilizar mientras que los elementos textiles pueden complicarse a la hora de usarlos según sus solicitudes.

Tipo 3 : al igual que el tipo anterior, los elementos comprimidos barras pueden ser más fáciles de reutilizar al tratarse de madera o metales mientras que los elementos en tensión cables serían más difíciles de encontrar.

- Aislante

Tipo 1 : los elementos utilizados al ser de mayor dimensión, peso y rigidez obtienen un aislamiento íntegro mayor que los demás tipos y tampoco sería complicado añadir un método aislante externo a los mismos.

Tipo 2 : los elementos textiles no son los mejores a la hora de conseguir un aislamiento térmico y sonoro

Tipo 3 : el cerramiento de este proyecto no está definido y está abierto a posibilidades aunque por la geometría de los espacios definidos en el marco de la envolvente sería mucho más sencillo realizarlo con elementos textiles.

- Durabilidad

Tipo 1 : los elementos más rígidos y mejor aislados soportarán mejor el paso del tiempo y los imprevistos por lo que serán más duraderos

Tipo 2 : los elementos textiles del cerramiento eran más susceptibles a ser dañados por su falta de resistencia y rigidez.

Tipo 3 : los elementos rígidos se consideran lo suficientemente rígidos y resistentes para ser duraderos aunque los elementos a tensión, cables, pueden ser susceptibles de daño al tener que modificar constantemente su longitud al desplegarse o al presentarse.

Podemos concluir en esta categoría que el tipo 1 contiene elementos más pesados que los demás tipos pero a cambio consigue un mayor rendimiento en las demás subcategorías mientras que los tipos 2 y 3 suelen oscilar en la misma situación.

2. Características necesarias

Aunque estas características se pensaron en el marco de las tensegridades plegables, son extrapolables a las demás tipologías.

- Autotensión:

Tipo 1 : no compete hablar de auto-tensión en esta tipología al tratarse de un conjunto de elementos rígidos.

Tipo 2 : no se encuentra en un estado de auto-tensión ya que no es la forma en la que trabaja.

Tipo 3 : aunque el estado de auto-tensión favorece a esta tipología en cuanto a resistir esfuerzos, es verdad que esta situación requiere una “puesta en marcha” de la estructura más exigente que las anteriores.

El estado de auto-tensión es característico de las tensegridades pero al extrapolarlo a las demás categorías podemos hablar de la forma en la que trabajan. Las tensegridades

diferencian sus elementos dependiendo de la forma en la que trabajan y los sitúa en un estado de tensión previo a su uso. Esto consigue que no haya elementos que trabajen a tensión y compresión a la vez por lo que es una estructura que no tiene puntos débiles.

En las tipologías convencionales esto no ocurre, los elementos pueden tener una parte traccionada y otra comprimida a la vez lo que generaría tracciones indeseadas y posibles problemas. A su vez las articulaciones en las estructuras suelen ser puntos conflictivos que, ante una gran solicitud, podrían salir perjudicadas.

Es por esto que la auto-tensión es una característica difícil de valorar porque aunque aporta un sistema de trabajo novedoso a la estructura, es también un componente de riesgo. Al trabajar con elementos que están altamente tensionados, los fallos en la estructura y sus posibles accidentes tienden a ser mayores que los de una estructura convencional.

- Rigidez:

Tipo 1: al estar basado en elementos rígidos y que se encuentran ensamblados, el conjunto obtenido también es rígido.

Tipo 2 : la parte estructurante es bastante rígida aunque las partes textiles pueden no serlo tanto. Aunque se encuentran completamente desplegadas, alcanzando una tensión y rigidez, no se puede comparar a las de otro elemento formado por madera, metal, etc.

Tipo 3 : la rigidez que aporta el anteriormente mencionado estado de auto-tensión es óptima.

- Estabilidad:

Tipo 1 : unido a las anteriores cualidades, la estabilidad que consiguen los elementos pesados y rígidos es mayor que la que consigue un conjunto formado por otros elementos.

Tipo 2 : en cuanto a la estabilidad del conjunto podría conseguirse cierto estado competente

Tipo 3 : proveniente de la auto-tensión la tenseguridad es una tipología excelente en cuanto a la estabilidad incluso en situaciones de perturbaciones como sismos al trabajar con elementos en compresión aislados.

- Equilibrio de fuerzas:

Tipo 1 : fácilmente conseguible apoyándose en las articulaciones que despliegan el marco estructural principal.

Tipo 2 : fácilmente conseguible al desplegarse dado que los elementos textiles obtienen desplegarse mediante el peso propio de otro elemento más rígido.

Tipo 3 : puede volverse complicado al desplegar la estructura debido a que se hace mediante el cambio de la longitud de un elemento que trabaja a tensión o compresión lo que podría comprometer el estado de equilibrio de la estructura si no está perfectamente tensada al desplegarse.

3. Características óptimas

- Diseño sencillo

Tipo 1 : se puede partir de diseños muy básicos e irse complicando a medida que aumentan las dimensiones. Es la tipología más usada y donde más ejemplos podemos encontrar por lo que no es difícil partir de ellos para llegar a otros nuevos. Los volúmenes obtenidos no son complejos por lo que su ejecución tampoco lo será.

Tipo 2 : los elementos textiles pueden llegar a ser complicados en cuanto a su diseño y manipulación. Normalmente un elemento textil plegable tiene que tener un diseño que le permita comprimirse en un reducido espacio lo que puede comprometer su forma. A la vez esto se puede ver reflejado en su manipulación y ser difíciles de manejar en cuanto aumentan sus dimensiones.

Tipo 3 : es, sin lugar a dudas, el mayor punto débil de las tensegridades. Los proyectos tensegríticos a medida que aumentan su volumen se empiezan a hacer cada vez más complejos, incluso los grandes volúmenes que se basan en la unión de módulos simples empiezan a experimentar problemas en la interacción de estos módulos a gran escala.

En la actualidad se han empezado a desarrollar softwares que trabajan con algoritmos para diseñar este tipo de estructuras a gran escala. Esto repercute también en su ejecución material. Los sistemas tensegríticos son fácilmente desplegables una vez están ya conformados, pero a la hora de ensamblar todos los elementos es donde podemos ver más cantidad de problema.

Incluso la tensegridad más simple basada en dos o tres barras requiere cierto grado de meticulosidad a la hora de ensamblar los elementos entre sí que no es comparable con las tipologías 1 o 2. Esta característica puede llegar incluso a comprometer su

habitabilidad al tener una geometría de elementos complejas. Al ser una red tensada continua donde trabajan los elementos a compresión aislados hay que tener en cuenta a la hora de diseñar la estructura que los elementos constructivos deben dejar huecos transitables entre el exterior y el interior algo que, a menudo, no llega a suceder.

- Adaptabilidad.

Tipo 1: puede llegar a ser un inconveniente de los elementos rígidos convencionales por su poca flexibilidad en cuanto a la forma o el volumen, los elementos tan rígidos normalmente son difíciles de moldear o diseñar con formas complejas en cuanto a curvas o torsiones.

Tipo 2 : los elementos textiles son muy buenos en cuanto a las formas y volúmenes complejas por lo que pueden desarrollarse en función de una situación compleja y adaptarse mejor a la misma.

Tipo 3: al tratarse de una red de elementos que trabaja en forma conjunta resulta relativamente fácil poder disponer los elementos de forma que se adapten al terreno. A su vez, muchas tensegridades no tienen una única posición posible lo que podría ayudar también a su interacción con el medio.

- Transporte:

Tipo 1 : como hemos podido vislumbrar a lo largo del análisis, transportar elementos más pesados y rígidos puede ser más complicado. Este sistema está limitado a la hora de comprimirse dado que no tiene elementos flexibles o ligeros que permitan un volumen plegado reducido.

Tipo 2 : los elementos textiles son muy moldeables por lo que permiten ocupar un espacio muy pequeño una vez se pliegan y, por lo tanto, un transporte más eficiente y sencillo.

Tipo 3 : los cables son aún más compactables que los elementos textiles y por lo tanto pueden ocupar un espacio más reducido al plegarse, quedando prácticamente la estructura plegada con el volumen de las barras. Esto nos permite de nuevo un transporte más sencillo.

- Durabilidad:

Tipo 1: refleja la situación de durabilidad de sus elementos aislados y es un buen sistema en cuanto a perdurar en el tiempo por su alta rigidez y resistencia.

Tipo 2 : presenta un “punto débil” que es la integridad de los elementos textiles.

Tipo 3 : presenta un “punto débil” que es la resistencia de los cables tensados.

A partir de todas estas características y este análisis podemos entonces elaborar una tabla con los puntos fuertes y débiles de cada tipología.

La calificación de cada característica se realizará según la siguiente escala de colores:



	Tipo 1 (articulada)	Tipo 2 (textil)	Tipo 3 (tensegridad)
Ligereza	muy malo	bueno	muy bueno
Rigidez	muy bueno	medio	bueno
Resistencia	muy bueno	bueno	muy bueno
Ecológico	muy bueno	bueno	bueno
Aislante	muy bueno	malo	medio
Durabilidad	muy bueno	medio	bueno
Autotensión			situación especial
Rigidez	muy bueno	medio	bueno
Estabilidad	muy bueno	bueno	muy bueno
Equilibrio de fuerzas	muy bueno	muy bueno	bueno
Diseño sencillo	muy bueno	bueno	muy malo
Adaptabilidad	malo	bueno	bueno
Transporte	muy bueno	muy bueno	muy bueno
Durabilidad	muy bueno	medio	bueno

Fig 87 .Tabla de elaboración propia. Resumen del análisis comparativo de tres tipologías plegables (articulada, textil y tensegrítica)

7. Conclusiones

¿Qué conclusiones podemos sacar entonces de este trabajo?

Hemos visto en el anterior estudio que las tensegridades plegables son conceptos que pueden resultar efectivos a la hora de construir espacios efímeros, sin embargo a la hora de compararlas con otros sistemas más convencionales o establecidos nos damos cuenta de varias cosas.

Las tensegridades se empezaron a desarrollar a finales del siglo XX, dentro de un marco de desarrollo globalista generalizado muy potente donde todas las tecnologías se creaban y quedan obsoletas a los pocos años. La construcción y la arquitectura era también uno de estos campos donde los métodos de construcción se mejoraron casi a diario. Este marco contextual de evolución continua hizo que la “utilitas” se superpusiera a todos los demás aspectos en los diseños y productos siendo los más útiles los mejores y los que se siguieron desarrollando.

Las tensegridades tienen dos aspectos que hacen de ellas algo único y que según el punto de vista del espectador pueden ser algo bueno o algo incómodo.

Primero hablaremos del factor de auto-tensión. Como hemos visto a lo largo del trabajo, una estructura que se encuentra en un estado previo de tensión antes de su “puesta en marcha” la dota de un carácter especial frente a temas de rigidez, firmeza, estabilidad, etc. Esta característica de la estructura le permite solventar ciertos problemas de forma más directa que otras tipologías como pueden ser: el reparto generalizado de las cargas (lo que la convierte en una muy buena estructura frente a fuerzas externas repartidas o vibraciones como los sismos) la forma en la que trabajan sus elementos solo a tracción o compresión (lo que le permite no tener puntos débiles donde la estructura pueda colapsar fácilmente), etc.

Sin embargo, esta característica no es fácil de conseguir y mantener en el ámbito más individual de las personas, en la escala humana. Por ejemplo, otro caso de estructura en auto-tensión son las vigas pretensadas. Estas vigas presentan un mayor rendimiento frente a las vigas de hormigón convencionales evidente, sin embargo, su uso conlleva un precio a pagar como el riesgo de su ejecución, la vida útil del pretensado, la fisuración o la transferencia de cargas. Estos elementos son aislados y se usan en obras mayores porque se entiende que los beneficios son mayores que los inconvenientes en algunas ocasiones pero el problema sería de otra envergadura si nos llevamos esta situación a toda la estructura como sería el caso de las tensegridades.

¿Una estructura sería rentable en términos económicos o cómoda en términos prácticos con estas características? Una estructura tensegrítica para el proyecto de una vivienda, por ejemplo, con las solicitudes de la misma, requeriría una ejecución en obra muy meticulosa, una puesta en marcha de la estructura muy precisa y una gestión de mantenimiento del pretensado que un modo de ejecución convencional no necesitaría.

Por esto, suponemos una escala menor, una arquitectura plegable que pueda ejecutarse fácilmente, que sea ligera y transportable, que intente suplir los “defectos” de una tensegridad al uso para conseguir una buena “utilitas” y poder entrar en el juego de las estructuras que se desarrollan y usan en el siglo XXI.

Una estructura plegable se construiría desde cero una única vez y luego solo tendría que plegarse y desplegarse. Eliminaríamos así el problema de tener que ensamblar todos los elementos de nuevo como podría ser otra tipología y preocuparnos, en primera instancia, de mantener el pretensado de los elementos tensados.

Es entonces esta característica de la auto-tensión lo que deja a la tensegridad un poco por detrás en el campo práctico con respecto a otras estructuras convencionales como las articuladas o las abatibles textiles con otros procedimientos mucho más familiares y directos. Aunque hay tipologías como la articulada, que vemos que soluciona muchos problemas de una forma más directa, otras como las textiles no se encuentran muy lejos de las posibilidades de las tensegridad, siendo estas últimas incluso más competentes en algunos ámbitos.

En el marco contextual actual vemos como las tensegridades se han ido quedando atrás en el campo de la construcción pero sin embargo se han seguido desarrollando en dos ámbitos concretos:

- El arte: una variedad de artistas han utilizado esta tipología en obras, sobre todo conceptuales, debido al carácter a veces “surrealista” de su estructura. La forma en la que los elementos comprimidos parecen flotar en una nube de cables tensados genera en el espectador una sensación curiosa que se aprovecha por el artista. El motivo por el que las tensegridades triunfan en el ámbito del arte es porque la “utilitas” queda en un segundo plano junto a la “firmitas” y se busca y aprecia la “venustas”.
- La ciencia: se han utilizado las tensegridades en varios ámbitos científicos donde alguna de sus cualidades, ha conseguido ser lo suficientemente importante como para sobreponerse a las restantes desventajas. Por ejemplo, la robótica. La NASA trabaja en un prototipo tensegrítico para enviar a otros planetas en misiones espaciales basándose en sus principios de ligereza y reparto generalizado de cargas por la estructura, afirman que un robot-tensegridad se puede plegar y transportar en un espacio muy reducido y al lanzarse sobre un suelo en un aterrizaje con una cierta potencia, puede soportar con mayor facilidad un impacto inicial que un sistema más rígido.

Es entonces cuando llegamos al segundo punto crítico en el desarrollo de las tensegridades, su diseño. Como hemos podido mencionar el diseño de las tensegridades es fácil y tangible a pequeña escala, pero se complica a medida que se requieren situaciones más concretas.

El modo en el que los elementos de la tensegridad trabajan requiere un conocimiento exhaustivo del comportamiento de los mismos y esto puede ser complicado cuando hay muchos elementos. Numerosos ingenieros, matemáticos y arquitectos han estudiado este comportamiento, como Robert Connelly y han demostrado cómo escribir las ecuaciones de la interacción entre los elementos de una tensegridad puede ser realmente difícil. Es por esto que en cuanto una tensegridad aumenta el número de elementos y por lo tanto, la relación y el comportamiento entre ellos, es necesario recurrir a programas de cálculo basados en algoritmos que planteen y solucionen dichas ecuaciones.

Estos problemas pueden surgir no solo cuando se aumenta el tamaño de la estructura si no también cuando se requieren geometrías muy específicas. Cuando el diseño conlleva una relación poco directa entre las longitudes de los elementos o la disposición de los mismos, el cálculo y previsión de los comportamientos se complica. Es por eso, que si medimos el valor de una estructura o construcción por su utilidad y por su relación esfuerzo/beneficio, tenemos que recurrir a tensegridades plegables con diseños simples y básicos que no supongan un sobre coste de producción muy elevado.

¿Quiere decir todo esto que las tensegridades son realmente un sistema constructivo deficiente?

No. A lo largo del trabajo hemos podido ver el gran abanico de posibilidades que tiene esta tipología constructiva y cómo se podrían aprovechar para generar espacios polivalentes y únicos. Las tensegridades no se han desarrollado en exceso en el mundo de la construcción porque existen otros métodos constructivos, con un cómputo general de beneficios parecidos o superiores, que tienen una ejecución y producción más directa.

El hecho de que, por este u otros motivos, las tensegridades no se hayan desarrollado en exceso, no quiere decir que sean un mal sistema. Las ventajas de las tensegridades son grandes y sus posibilidades aún pueden ser mayores si se aplican adecuadamente.

8. Índice de figuras.

- Fig 1. Relación gráfica entre la fuerza interna (t) y la variación de longitud [01]
- Fig 2 y 3. Croquis del proceso constructivo del puente junto con una imagen real de su interior [13]
- Fig 4 y 5. Fotografía exterior del pabellón junto a una imagen del proceso constructivo que detalla los anclajes [16] [17]
- Fig 6. Croquis de la posición de todos los elementos en conjunto [17]
- Fig 7 y 8. Fotografía inferior de la estructura junto con un croquis de los distintos elementos y su composición en el conjunto final de la torre [18][19]
- Fig 9 y 10. Fotografías actuales de distintas perspectivas de la torre [20]
- Fig 11. Fotografía durante su construcción en 1968 [20]
- Fig 12. Palacio de Cristal, Joseph Paxton, Gran exposición Universal de Londres. 1851 [21]
- Fig 13. Portal de la Conciencia, Rojkind Arquitectos [22]
- Fig 14. Escenarios festival Tomorrowland [23]
- Fig 15. Carpa evento deportivo en la plaza de toros de Bibio, Gijón [24]
- Fig 16. Puestos de mercado navideños en la Plaza Mayor de Madrid [25]
- Fig 17. Campamento estadounidense en Irak [26]
- Fig 18. Plató de televisión RTVE [27]
- Fig 19. Croquis de un diagrama constructivo del estudio Arup [28]
- Fig 20. Fase I de la transformación de un invernadero en un espacio de concierto para el festival Horst, Bruselas 2021[28]
- Fig 21. Fase II del mismo proceso de transformación [28]
- Fig 22. Fase III del mismo proceso de transformación [28]
- Fig 23. Fase final del proceso de transformación de un invernadero en un espacio de concierto para el festival Horst, Bruselas 2021 [28]
- Fig 24. Exposición 99 por ciento proyecto divulgativo de RotorDc en estado desplegado [14]
- Fig 25. Exposición 99 por ciento proyecto divulgativo de RotorDc en estado plegado [14]
- Fig 26 y 27. Fotografías de sillas plegables reales del antiguo egipto [29]
- Fig 28. Fotografía de un uol egipcio [29]
- Fig 29. Fotografía de una recreación de un tipi original [30]
- Fig 30 y 31. Fotografías de una estructura de tipi sin recubrimiento y un zoom de la unión superior de sus elementos [31]
- Fig 32. Fotografía de una yurta tradicional cubierta con pieles junto a una familia de Mongolia [15]
- Fig 33. Fotografía del armazón descubierto de la estructura de una yurta [15]
- Fig 34. Fotografías del time-lapse de la construcción de una yurta tradicional [15]
- Fig 35. Ejemplo de la página web de la empresa Celtic Yurts destinada a vender estas viviendas [32]
- Fig 36. Proyecto Tiny House de viVood [33]
- Fig 37. Habitación plegable IWI, Juan Ruiz y Amelia Tapia [34]
- Fig 38. Cardboard Pavilion, Studio AION [35]
- Fig 39. 0-VOID, BASE studio [36]

Fig 40. Sistema telescópico apertura de nave [37]

Fig 41. Sistema de polea para una envolvente [38]

Fig 42. Palé de obra

Fig 43. Fotografía propia del proceso de corte de los materiales

Fig 44. Fotografía propia del proceso de corte de los materiales (II)

Fig 45. Fotografía propia de los materiales ya cortados

Fig 46. Fotografía propia del descarte de algunos materiales

Fig 47. Esquema de la analogía del balón [08]

Fig 48. Tensegridad propia de seis barras

Fig 49. Detalle en zoom de la tensegridad propia anterior (Fig 48)

Fig 50. Demostración de la carga soportada por la tensegridad propia (Fig 48)

Fig 51 y 52. Imágenes de elaboración propia a partir del concepto gráfico de estabilidad única

Fig 53 y 54. Imágenes de elaboración propia a partir del concepto gráfico de estabilidad única (II)

Fig 55 y 56. Imágenes de elaboración propia aplicando el anterior concepto sobre un modelo básico de tensegridad

Fig 57. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se aplica el concepto anterior de estabilidad única antes de la perturbación (equilibrio = reposo)

Fig 58. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se aplica el concepto anterior de estabilidad única durante la perturbación (desequilibrio = no reposo)

Fig 59. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se aplica el concepto anterior de estabilidad única tras la perturbación (vuelta a su equilibrio inicial = reposo)

Fig 60 y 61. Imágenes de elaboración propia a partir del concepto gráfico de estabilidad (III)

Fig 62 y 63. Imágenes de elaboración propia a partir del concepto gráfico de estabilidad lineal (II)

Fig 64 y 65. Imágenes de elaboración propia aplicando el anterior concepto sobre un modelo básico de tensegridad

Fig 66. Imagen de elaboración propia aplicando el anterior concepto sobre un modelo básico de tensegridad (II)

Fig 67. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se le aplica el concepto anterior de estabilidad lineal antes de la perturbación (equilibrio = reposo)

Fig 68. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se le aplica el concepto anterior de estabilidad lineal durante de la perturbación (desequilibrio = no reposo)

Fig 69. Fotografía de una tensegridad modelo simple de seis barras de elaboración propia a la que se le aplica el concepto anterior de estabilidad lineal tras de la perturbación (nuevo equilibrio = reposo)

Fig 70. Imagen ejemplo del equilibrio de fuerzas en un sistema de cuatro nodos y tres barras [09]

Fig 71. Ejemplo gráfico de una tensegridad plegable formada por cuatro barras y ocho nodos [05]

Fig 72. Ejemplo gráfico de la anterior tensegridad (Fig 68) en sus distintas fases de plegado [05]

Fig 73. Gráfico de la relación de la relación entre s/c (cociente longitud barra/cable) y el ángulo entre los cuadrados formados por las barras superiores e inferiores en la tensegridad anterior (Fig 71) [05]

Fig 74. Representación propia de la anterior tensegridad (Fig 71) en sus distintas fases de plegado

Fig 75. Diseño simple de tensegridad de tres barras [39]

Fig 76. Imagen de modelo unión de módulos de tres barras [40]

Fig 77. Ejemplo del proceso de montaje de una tensegridad compleja [41]

Fig 78. Representación de una misma tensegridad adaptándose a distintos relieves [42]

Fig 79. Representación de una tensegridad que se pliega sobre un plano [43]

Fig 80. Representación de una tensegridad que se pliega sobre un eje [43]

Fig 81. Tabla de elaboración propia resumen de la importancia de las características de una tensegridad plegable

Fig 82 y 83 . Fotografías de un sistema plegable articulado [33]

Fig 84 y 85 . Fotografías de un sistema plegable con elementos textiles [44]

Fig 86 . Fotografía de un sistema plegable tensegrítico [45]

Fig 87 .Tabla de elaboración propia. Resumen del análisis comparativo de tres tipologías plegables (articulada, textil y tensegrítica)

9. Bibliografía

- [01] Connelly, R., y Guest, S. D. (2022). *Frameworks, tensegrities, and symmetry*. Cambridge University Press.
doi.org/10.1017/9780511843297
- [02] Miura, K., y Pellegrino, S. (2020). *Forms and concepts for lightweight structures*. Cambridge University Press.
doi.org/10.1017/9781139048569
- [03] Juan, S. H., y Tur, J. M. M. (2008). Tensegrity Frameworks: Static Analysis Review. *Mechanism and Machine Theory*, 43(7), 859-881.
doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2007.06.010
- [04] Merchan, C. H. H. (1987 Junio). *Deployable Structures*. Trabajo de Tesis. Massachusetts Institute of Technology.
<https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/14970/16973030-MIT.pdf?sequence=2>
- [05] Motro, R., y Bouderbala, M. (1996). Mobile tensegrity systems. *WIT Transactions on the Built Environment*, 24. Wit Press
<https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/24/9432>
- [06] Jáuregui, V. G. (2010). *Tensegrity structures and their application to architecture*. Universidad de Cantabria.
doi.org/10.22429/euc2020.037
- [07] Bouderbala, M., y Motro, R. (2000). Folding tensegrity systems. *Solid mechanics and its applications* (pp. 27-36).
doi.org/10.1007/978-94-015-9514-8_4
- [08] Quirant, J. (2014). *Conception de systèmes structuraux autocontraints, légers et pliables : de la théorie à la mise en œuvre*.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/LMGC/tel-00995350>
- [09] Jamal, O. (2021). *A study on Tensegrity Structure and their Applications to Space*. Trabajo de Máster. Universitat Politècnica de Catalunya.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/360891/TFM_Tensegrity_Jamal.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] Tibert, y Pellegrino, S. (2003). Review of Form-Finding Methods for Tensegrity Structures. *International Journal of Space Structures*, 18(4), 209-223.
doi.org/10.1260/026635103322987940

- [11] Connelly, R. (1998). Fundamental Materials Research. *Tensegrity structures: Why are they stable?* (pp. 47-54).
doi.org/10.1007/0-306-47089-6_3
- [12] Mayoral, J. L. (2022, abril 20). *Qué es la arquitectura efímera: el arte de lo evanescente*. GILMAR
<https://www.gilmar.es/blog/arquitectura-efimera/>
- [13] Tensegrity Wiki. (2011, noviembre 10). *Kurilpa Bridge analyzed*. Blogspot.
<http://tensegritywiki.blogspot.com/2011/11/kurilpa-bridge-analyzed.html>
- [14] Rotor Deconstruction scri. (2012). *Rotor deconstruction – reuse of building materials made easy*. RotorDc.
https://rotordc.com/?utm_medium=website&utm_source=archdaily.pe
- [15] Franco, J. T. (2017, septiembre 13). *Arquitectura vernácula: yurtas, viviendas nómades en Mongolia*. ArchDaily.
<https://www.archdaily.cl/cl/02-326671/arquitectura-vernacula-yurtas-viviendas-nomades-en-mongolia>
- [16] Viva, A. (2019, julio 29). *Pabellón MOOM - Kazuhiro Kojima*. Arquitectura Viva.
<https://arquitecturaviva.com/obras/pabellon-moom>
- [17] Farkade, J. (2019, junio 22). *DIGITAL MATTER - TENSE-ABLES – IAAC blog*. IAAC Blog.
<https://www.iaacblog.com/programs/digital-matter-tense-ables/>
- [18] SBP. (2023, diciembre 30). *Tower at the Fair of Rostock - SBP*.
<https://www.sbp.de/en/project/tower-at-the-fair-of-rostock/>
- [19] Wang, Y. y Senatore, G. (2020). Extended Integrated Force method for the analysis of prestress-stable statically and kinematically indeterminate structures. *International Journal of Solids and Structures*, 202, 798-815.
doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.05.029
- [20] Rq, C. (2013, noviembre 17). *Needle tower*. CIRCARQ.
<https://circarq.wordpress.com/2013/09/02/needle-tower/>
- [21] WikiArquitectura. (2020, octubre 17). *Crystal Palace - Ficha, fotos y planos*.
<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/crystal-palace/>

- [22] Rojkind studio. (2020, noviembre 1). *Portal of Awareness* | *Rojkind Arquitectos*.
Rojkind Arquitectos.
<https://rojkindarquitectos.com/work/portal-of-awareness/>
- [23] Wikipedia. (2024, enero 5). *Tomorrowland (Festival)*. Wikipedia, la enciclopedia libre.
[https://es.wikipedia.org/wiki/Tomorrowland_\(festival\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Tomorrowland_(festival))
- [24] Carpasterra. (2021, 21 julio). *Carpas para cubiertas deportivas*. Carpas Terra blog.
<https://www.carpasterra.com/blog/carpas-para-cubiertas-deportivas/>
- [25] Casbas, M. (2023, 10 noviembre). *Vuelve el mercado de Navidad de la Plaza Mayor*. Traveler.
<https://www.traveler.es/articulos/mercado-de-navidad-de-la-plaza-mayor-madrid-cuando-abre>
- [26] Novem. (2022). *Logistics & Construction*. NOVEM Solution a ZALI Global Company.
<https://www.novemsolution.com/project/logistics-construction/>
- [27] Rtve. (2019, abril 22). *Análisis del debate a cuatro* [Video]. RTVE.es.
<https://www.rtve.es/play/videos/especiales-informativos/especial-informativo-analisis-del-debate-cuatro/5159936/>
- [28] ARUP. (2016 septiembre). *Circular Economy in the Built Environment*.
https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/circular-economy-in-the-built-environment?utm_medium=website&utm_source=archdaily.pe
- [29] Blanco, R. D. E. (2018, julio 8). Historia Del Mueble. *El Mueble egipcio*
<https://danielblanco45.wixsite.com/historiadelmueble/post/el-mueble-egipcio>
- [30] Wheeler-Voegelin, E., Laubin, G., Vestal, S., y Laubin, R. (1958). The Indian Tipi. Its history, construction, and use. *Journal of American Folklore*, 71(280), 188.
doi.org/10.2307/537712
- [31] Big Hill Tipis. (2011).
<https://www.bighilltipis.co.uk/about-tipis/>
- [32] Yurtas Celtas. (2020).
<https://celticyurts.com/>
- [33] Franco, J. T. (2023, mayo 15). *Viviendo a pequeña escala: la arquitectura plegable del proyecto VIVoOD*. ArchDaily
<https://www.archdaily.cl/cl/02-348524/viviendo-a-pequena-escala-la-arquitectura-plegable-del-proyecto-vivood>

- [34] Zapico, B. (2023, marzo 10). *Habitáculo IWI / Juan Ruiz + Amelia Tapia*. ArchDaily.
<https://www.archdaily.cl/cl/997387/habitaculo-iwi-juan-ruiz-plus-amelia-tapia>
- [35] Alini, L. (2009, noviembre 16). AION. *Cardboard Pavilion. Costruire col cartone*. Divisare.
<https://divisare.com/projects/112669-aion-luigi-alini-cardboard-pavilion-costruire-col-cartone>
- [36] Team, A. (2023, diciembre 4). *Pabellón invertebrado» cuestiona la noción de la resistencia estructural asociada a la rigidez*. ArchDaily
<https://www.archdaily.cl/cl/900134/pabellon-invertebrado-cuestiona-la-nocion-de-la-resistencia-estructural-asociada-a-la-rigidez>
- [37] Doorme. (2022, octubre 25). Doorme Puertas Industriales.
<https://doorme.com/productos/corredera-industrial/>
- [38] Maiztegui, B. (2023, diciembre 20). *Poleas y engranajes: mecanismos manuales para transformar espacios*. ArchDaily
<https://www.archdaily.cl/cl/941737/poleas-y-engranajes-proyectos-con-mecanismos-manuales-para-transformar-los-espacios>
- [39] Wikiwand. (2012). *Tensegridad*.
<https://www.wikiwand.com/es/Tensegridad>
- [40] Romero, G, J. (2015 junio). *Soluciones estructurales con mallas de suspensión : pequeño pabellón desmontable*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Sevilla
- [41] Zhang, P, Zhou, J, y Chen, J. (2021). Composite Structures. *Form-finding of complex tensegrity structures using constrained optimization method*. 268.
doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113971
- [42] Jáuregui, V, G. (2018). Tensegridad.es
<http://www.tensegridad.es/>
- [43] Smaili, A, y Motro, R. (2007). *Foldable/Unfoldable curved tensegrity systems by finite mechanism activation*. HAL
<https://hal.science/hal-00559801>
- [44] CMAX. (2022). Innovation for Humanity. *System Foldable Housing Technology*.
<https://cmxsystem.com/>
- [45] Furuya, H. (1992). Concept of Deployable tensegrity Structures in Space Application. *International Journal of Space Structures*, 7(2), 143-151.
doi.org/10.1177/026635119200700207

