



Tensegridad y Arquitectura

Ruichen Tang

Trabajo Fin de Grado

Tensegridad y Arquitectura

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid,

Universidad Politécnica de Madrid,

[Autor]: Ruichen Tang

[Tutor]: Mariano Vázquez Espí

[Fecha]: 11 Junio 2018

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. ¿QUÉ ES LA TENSEGRIDAD?.....	3
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	3
2. HISTORIAS.....	3
2.1. ORIGEN.....	4
2.2. DEFINICIONES.....	5
2.3. EVOLUCIÓN.....	7
2.4. APLICACIÓN A ARQUITECTURA EN SIGLO XX.....	9
3. CONCEPTOS BÁSICOS.....	10
3.1. RELACIONES ENTRE TENSEGRIDAD COMO ESTRUCTURA PREESFORZADA.....	10
3.2. GEOMETRÍA Y ESTABILIDAD.....	11
3.3. MECANISMO DE AUTO-ESTRÉS.....	13
4. TIPOLOGÍA.....	13
4.1. NOMENCLATURA.....	13
4.2. CÉLULAS ELEMENTALES.....	15
4.2.1. CÉLULA ESFÉRICA.....	15
4.2.2. CÉLULA ESTELAR.....	19
4.3. ASAMBLEAS.....	20
4.3.1. VIGAS.....	20
4.3.2. CUADRÍCULAS.....	20
4.3.3. SISTEMA DE CURVATURA.....	21
4.3.4. CONGLOMERACIONES.....	23
4.3.5. SUPERFICIES MENBRANAS.....	23
5. APLICACIONES.....	24
5.1. EJEMPLOS ACTUALES.....	24
5.1.1. PABELLONES.....	25
5.1.2. TORRES (SOPORTES).....	28
5.1.3. PUENTES.....	30
5.1.4. ESTRUCTURAS DE TECHO.....	32
5.1.5. PLATAFORMAS.....	34
5.2. PRINCIPIOS DE LOS PROYECTOS ACTUALES.....	36
5.2.1. ESTRUCTURA GENERAL DE TENSEGRIDAD PURA.....	36
5.2.2. ESTRUCTURA GENERAL DE TENSEGRIDAD FALSA.....	38
5.2.3. ESTRUCTURA PARCIAL DE TENSEGRIDAD PURA.....	40
5.2.4. ESTRUCTURA PARCIAL DE TENSEGRIDAD FALSA.....	43
6. CRÍTICA Y ANÁLISIS.....	43
6.1. ¿ARQUITECTURA DE TENSEGRIDAD O ARQUITECTURA PARECIDA A TENSEGRIDAD?.....	43
6.2. VALIDAD Y POTENCIAL.....	44

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ¿QUÉ ES LA TENSEGRIDAD?

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

El término Tensegridad, proveniente del inglés Tensegrity es un término acuñado por Buckminster Fuller como contracción de “tensional integrity (integridad tensada)”

Varias definiciones han sido establecidas por diferentes expertos, que han intentado de explicarlo de la manera más simple posible, sugiere que la tensegridad es un principio estructural basado en el uso de componentes aislados en compresión dentro de redes de tensión, de tal manera que los elementos comprimidos (por lo general barras o puntales) no se tocan entre sí y los miembros tensados (generalmente cables) delinean el sistema espacialmente.

1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

- Revisar la historia y el desarrollo de tensegridad según un eje tiempo y señalando los autores expertos (capítulo 2).
- Definir las características estructurales y los conceptos fundamentales de los llamados compresión discontinua y tensión continua, describiendo sus propiedades, destacando las ventajas e indicando también sus defectos (capítulo 3).
- Establecer una definición clara de tensegridad y establecer una clasificación general para estos sistemas, sobre la tipología de células elementales y ensamblajes (capítulo 4).
- Investigar la aplicación de tensegridad en las obras actuales, clasificar los sistemas que se emplea y principios de función. Compararles y analizarlas cualitativamente para inspirar los arquitectos que quieren aprovecharla (capítulo 5).
- Resumir el uso actual de la tensegridad en la arquitectura u otros tipos de obras, destacar sus ventajas y desventajas sobre las estructuras tradicionales para atestiguar la viabilidad de su potencial (capítulo 6).

2. HISTORIAS

La tensegridad es un sistema nueva en desarrollo, que tiene una historia

aproximadamente 60 años. Hoy en día existen patentes de varios autores sobre dicho sistema#, las definiciones también son distintas por varios expertos. Pero sobre todo, la tensegridad suele tener una figura maravillosa y ligera, dando impresión de un grupo de puntales aislados flotando en aire.

2.1.ORIGEN

El origen de tensegridad es controvertido, Richard Buckminster Fuller y Kenneth Snelson son generalmente considerado como inventores de la tensegridad. También, David Georges Emmerich, un experto de tensegridad, había reclamado que el primer sistema proto-tensegridad llamado "Gleichgewichtkonstruktion" fue inventado por Kalr Iganso en 1920, cuyo trabajo fue presentado en una exposición en Moscú en 1921.

El punto más controvertido ha sido la disputa personal, que dura más que treinta años, entre Fuller (Massachusetts, 1895-1983) y Snelson (Oregón, 1927).

Fuller comenzó a desarrollar su visión en la década de 1920, en un momento en que muchos exploraban nuevas direcciones en el diseño y la arquitectura. Pero fue su alumno, el escultor Kenneth Snelson, quien, en 1948, creó la primera estructura que se definió como una "tensegridad". Como explica Snelson, él logró la escultura llamada "X- column" (Fig.2-1) de nueva figura que nadie habían desdeñado, utilizando dos puntales de madera en forma de X suspendidos en el aire por un cable de nylon. Snelson la presentó a su profesor y Fuller él se dio cuenta de que la era el modelo que está explorando. Snelson captó las características definitorias de la tensegridad:

1. **Tensión penetrante y una separación de elementos rígidos:** los puntales resistentes a la compresión no se tocan sino que se levantan individualmente, cada uno abrazado e interconectado por un sistema de cables continuamente tensos, una condición que Snelson y Fuller llamaron "tensión continua, compresión discontinua".
2. **Estable:** la escultura de Snelson es notablemente estable, a pesar de su uso mínimo de elementos rígidos. Esta estabilidad se debe al hecho de que los componentes de tracción y compresión están, en todo momento, en equilibrio mecánico.
3. **Pretensado:** el equilibrio mecánico resulta de la forma en que los componentes de compresión y tracción interactúan para resaltar la naturaleza esencial de cada uno: los cables se acoplan en ambos extremos de los puntales, mientras que los puntales empujan y estiran los cables. El resultado es que cada elemento de tensegridad ya está estrasado, los elementos de compresión ya están comprimidos, los elementos de tensión están tensados, de una condición conocida como "auto-tensión" o "pretensión".
4. **Elástico:** mientras se estabilizan mediante pretensado, las estructuras de tensegridad también responden exquisitamente a la perturbación externa. Sus componentes se reorientan inmediatamente cuando la estructura está deformada, y lo hacen de forma reversible y sin romperse.

5. **Globalmente integrado:** debido a que los componentes están tan íntimamente interconectados, todos sienten lo que uno siente, produciendo una estructura verdaderamente holística.
6. **Modular:** aunque completa por sí misma, una estructura de tensegridad se puede combinar con otras estructuras similares para formar un sistema de tensegridad más grande. En estos sistemas, las unidades de tensegridad individuales pueden interrumpirse sin comprometer la integridad general del sistema.
7. **Jerárquico:** estructuras de tensegridad más pequeñas pueden funcionar como componentes de compresión o tensión en un sistema de tensegridad más grande, que a su vez puede realizar una función similar en sistemas aún más grandes.



Fig. 2 - 1

Al principio, Fuller mencionó a Snelson como el autor del descubrimiento, después de un tiempo Fuller comenzó a considerarlo que la tensegridad es suya y dejó que la gente pensara que fue su invención.

2.2.DEFINICIONES

Al igual que sus orígenes, la definición de tensegridad también es controvertida. Es también muy difícil de dar una definición inequívoca.

Fuller describió el principio de tensegridad como "Islas de compresiones dentro del mar de tensiones". Según su descripción, René Motro cree que muchos objetos pueden considerarse como tensegridad, un balón u otras cosas infladas con envoltorios tensados.

De acuerdo con el eje del tiempo, se disponen las descripciones de varios autores en

siguientes párrafos.

(1962) Fuller primero registró una patente de una estructura de tensegridad, describió:

"una pluralidad de columnas de compresión discontinuas dispuestas en grupos de tres columnas no conjuntivas conectadas por elementos de tensión que forman triángulos de tensión"

(1965) Snelson también registró una patente para su invención de tensegridad, describió en su patente:

La presente invención se refiere a un armazón estructural y más particularmente a una estructura nueva y mejorada de miembros alargados que se colocan por separado en tensión o en compresión para formar un enrejado, los miembros de compresión se separan entre sí y los miembros de tensión se interconectan. para formar una red de tensión continua ".

(1975) Algunos años más tarde, Fuller escribió una explicación extendida en su libro "Synergetics":

"Tensegridad describe un principio de relación estructural en el que la forma estructural está garantizada por los comportamientos tensionales del sistema terminantemente cerrados y comprehensivamente continuos, y no por los comportamientos discontinuos y exclusivamente locales del miembro compresional"

(1976) Anthony Pugh propuso una descripción de tensegridad que es más acordada por otros especialistas:

"Se establece un sistema de tensegridad cuando un conjunto de componentes de compresión discontinuos interactúa con un conjunto de componentes de tensión continua para definir un volumen estable en el espacio ".

(1998) Bin Bing Wang describió:

"Los sistemas de tensegridad son redes de cable articuladas independientes en las que un sistema conectado de cables se somete a un sistema de puntales desconectados y extensamente, a cualquier red de cable articulada independiente compuesta de unidades de construcción que satisfagan la definición mencionada".

(2004) Snelson explica adicionalmente con su descripción previas:

"Tensegrity describe un sistema estructural cerrado compuesto de un conjunto de tres o más puntales de compresión alargados dentro de una red de tendones de tensión, las

partes combinadas se apoyan mutuamente de tal manera que los puntales no se tocan entre sí, sino que presionan hacia fuera contra puntos nodales en la red de tensión para formar una unidad de tensión y compresión firme, triangulada, pretensada."

(2004) En el mismo año, René Motro publicó su libro "Tensegrity Structural System for the Future", en que propuso sus definiciones sobre tensegridad en 2 clase: **definición basado en patentes** y **definición extendida** :

Definición basado patentes: Los sistemas de tensegridad son sistemas reticulares espaciales en un estado de estrés propio. Todos sus elementos tienen una fibra media recta y son de tamaño equivalente. Los elementos tensores no tienen rigidez en la compresión y constituyen un conjunto continuo. Los elementos comprimidos constituyen un conjunto discontinuo. Cada nodo recibe un solo elemento comprimido .

Definición entendida: El sistema de Tensegrity es un sistema en un estado autoequilibrado estable que comprende un conjunto discontinuo de componentes comprimidos dentro de un continuo de componentes tensados.

2.3.EVOLUCIÓN

Independientemente de Fuller y Snelson quién sea el "padre de tensegridad", Snelson, como escultor y artista, es la persona que presenta la tensegridad a la vista de público con sus esculturas. Snelson trabajaba con la tensegridad como una parte esencial de sus esculturas, enfocó su trabajo en el aspecto escultural y estético (Fig.2-2), desarrollando sus esculturas hasta que se murió (2016) y no había investigado en profundidad la tensegridad en aspecto de mecánica y física.



Fig. 2 - 2

A diferencia de Snelson, Fuller y Emmerich intentaban estudiando las diferentes tipologías posibles de tensegridad, principalmente sistemas esféricos y unidimensionales, con el fin de aplicarse en arquitectura, debido a fondo de arquitecto e ingeniero.

En 1961, Fuller creó una familia tensegridad con caras verticales laterales de tres, cuatro, cinco y seis cada uno, también descubrió la “six-islanded-strut icosahedron Tensegrity” (octaedro expandido) (Fig.2-3)

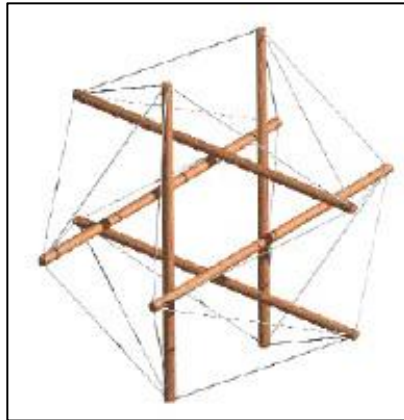


Fig. 2 - 3

Él siguió buscando nuevos diseños de tensegridad para aplicaciones y construcción. Hizo varios intentos diseñar cúpulas de tensegridad geodésica (Fig.2-4), aunque dicha cúpula no cuenta con suficiente rigidez y estabilidad. Algunos años después, en EXPO 67, Fuller construyó otra cúpula llamada “Montreal bubble”, manifestando su idea de que cubrir la ciudad con una cúpula de tensegridad, aunque la estructura de dicho proyecto no tiene que ver con tensegridad.

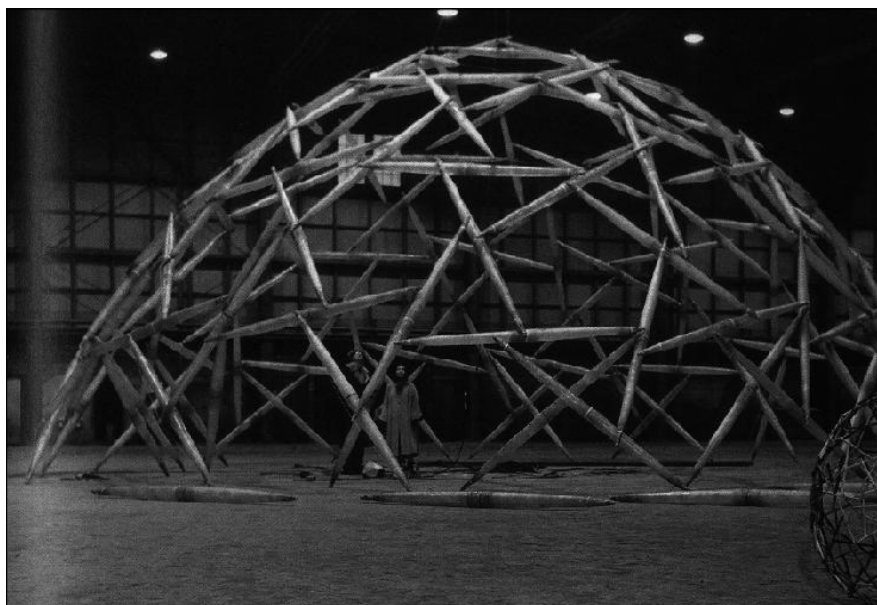


Fig. 2 - 4

René Motro, probablemente uno de los especialistas más importantes en tensegridad en la actualidad, publicó sus estudios en 1973, desde el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad de Montpellier (Francia), sobre el tema “Topologie des structures discrètes.

Incidence sur leur comportement mécanique. Autotendant Icosaédrique”. A partir de ese año, se convirtió en uno de los laboratorios de investigación más importantes de investigación de tensegridad.

Anthony Pugh en 1976, publicó un texto llamado “Introducción a tensegridad” que introduce tipología, clasificación y nomenclatura de tensegridad. La nomenclatura de Pugh se explicará en el capítulo 4

Ariel Hanaor en 1987, definió las principales ensamblajes bidimensionales de las células elementales autoequilibradas con su propuesta de una cúpula metálica de tensegridad.

Connelly y Back en 1998, intentaban encontrar un apropiado tridimensional para generalización de tensegridad, utilizando las herramientas matemáticas y capacidades de ordenadores, han elaborado un catálogo completo de tensegridades con tipos prescritos detallados de estabilidad y simetría, incluidos algunos que nunca antes se habían visto.

Shu Yang y Cornel Sultan en 2015, publicaron una tesis sobre características mecánicas de sistema tensegridad membrana, estudiaban la tensión interna de membranas de sistemas de tensegridad “simplex” y de sistemas más complicados

Además de las investigaciones físicas, mecánicas y matemáticas de la esencia de tensegridad, arquitectos e ingenieros la habían aplicado en algunos proyectos. Se presenta los trabajos precedentes en el capítulo 2.4 y ejemplos actuales modernos en siglo XXI en el capítulo 5.1.

2.4.APLICACIÓN A ARQUITECTURA EN SIGLO XX

Al tratarse de un término propuesto en siglo XX, la investigación de tensegridad no tiene una historia larga. El descubrimiento de tensegridad empezó en 1948, la investigación de tensegridad fue promovida por ingenieros y arquitectos para descubrir un tipo de estructura que puede maximizar las ventajas de la estructura de tensión. De modo que, la gente nunca se detuvo para encontrar la posibilidad de la aplicación de tensegridad a arquitectura.

Pero la investigación al principio no avanza sin problemas, como se mencionó anteriormente en el artículo, Fuller había imaginado inicialmente que si podía aprovechar al máximo la superioridad de tensegridad, sería posible construir una cúpula transparente que cubriera toda la ciudad. Él hizo varios intentos para diseñar cúpulas de tensegridad geodésica pero el resultado final no es satisfactorio, las estructuras carecían de estabilidad debido a la ausencia de triangulación. En el diseño del pabellón canadiense de EXPO 67, aunque construyó con éxito una cúpula geodésica, Fuller no aplicó sistema tensegridad en dicho proyecto.

El Estadio de Georgia de arquitecto David Geiger parece ser el único caso exitoso

(Fig.2-5), El estadio cuenta con una cúpula donde un grupo de vigas radiales de tensegridad se une a un anillo externo en compresión y converge a un anillo interno para unirlos a todos. La cúpula tiene un aspecto de que las vigas verticales radiales flotan en el aire, unido por cables. Pero algunas especialistas no creen que esto sea tensegridad. René Motro lo identifica como tensegridad falsa ya que tienen un miembro comprimido en el límite. Snelson tampoco no los considera como sistemas de compresión flotantes reales, comentó que tal cúpula no sea tensegridad, sino rueda de bicicleta.

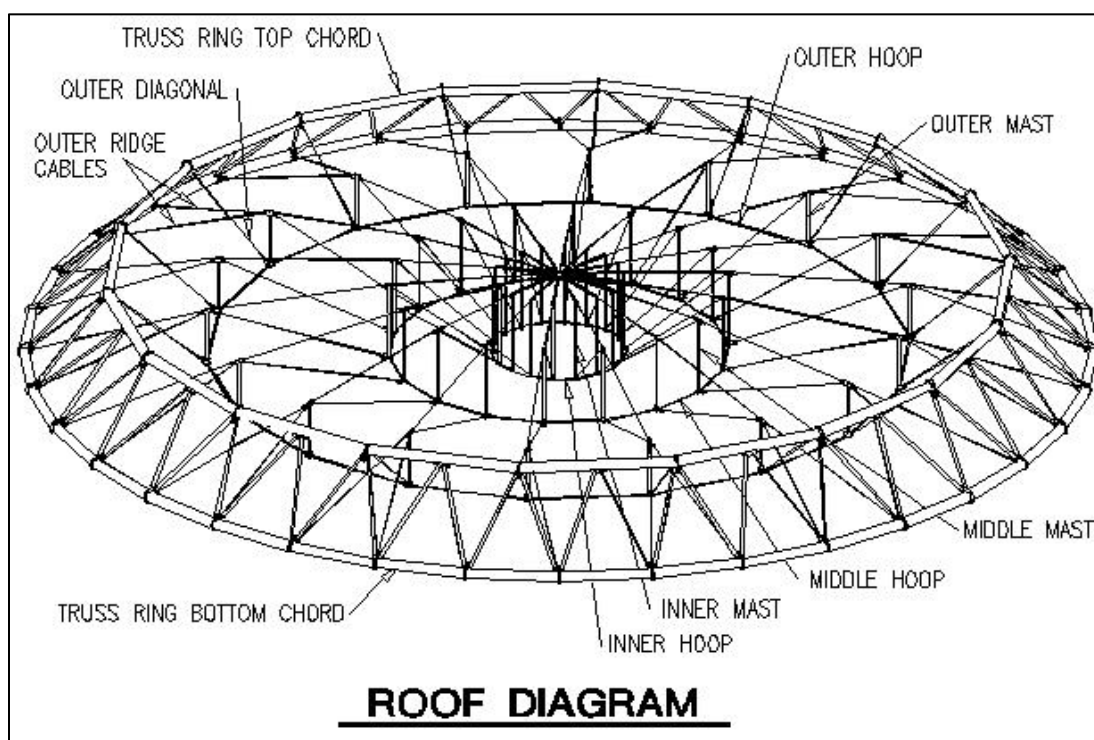


Fig. 2 - 5

3. CONCEPTOS BÁSICOS

Las características estéticas y mecánicas de los sistemas de tensegridad resultan de la continuidad del conjunto de componentes tensionados y de la discontinuidad del componente comprimido. La rigidez de los sistemas de tensegridad está condicionada por estados de estrés propio. Un sistema de tensegridad se puede reforzar solamente con geometría que es consistente con los criterios de equilibrio estático.

Se explica los mecanismos de tensegridad de siguiente párrafo.

3.1.RELACIONES ENTRE TENSEGRIDAD COMO ESTRUCTURA PREESFORZADA

La pretensión es un componente crítico de cualquier estructura de tensegridad independiente, es decir, una tensegridad que logra su cohesión estructural únicamente por la interacción de sus tendones y puntales, sin depender de andamios o anclajes externos.

Anthony Pugh en 1976, afirmó que si el auto-estrés es mayor en un sistema de tensegridad, su capacidad de carga también sea más alta. Sin embargo, otros expertos han demostrado a través de experimentos y cálculos que esta capacidad no siempre está relacionada positivamente con el auto-estrés.

Simon Guest en 2010, publicó un papel llamado “The Stiffness of Tensegrity Structures”, comprobó que para una tensegridad “estable”, el aumento de un bajo nivel de pretensado aumentará la rigidez; mientras que para un alto nivel de pretensado, un aumento adicional del pretensado puede reducir la rigidez e incluso conducir a una estructura con rigidez cero o negativa.

Guest escribió que el la rigidez “material” no puede contribuir en nada a la rigidez, y la rigidez se genera por completo a partir de la reorientación de los miembros ya estresados (Fig.3-1). Es decir, cuando una estructura está estresada, la pretensión de los componente afectará la rigidez del conjunto al cambiar la dirección de las deformaciones parciales.

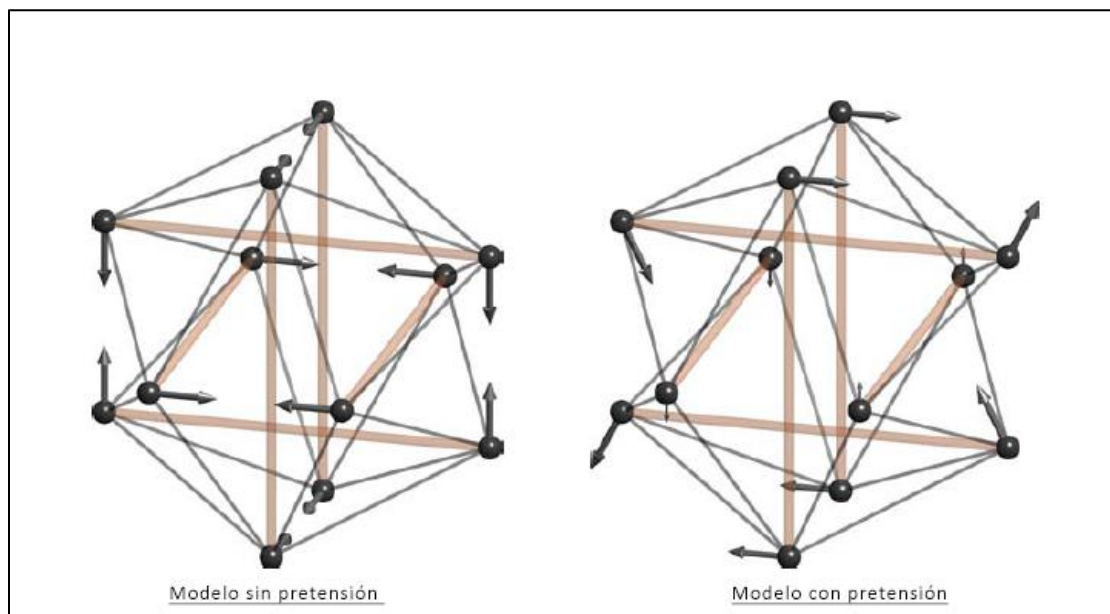


Fig. 3-1

3.2.GEOMETRÍA Y ESTABILIDAD

René Motro (2003) propuso una analogía de balón (Fig.3-2), comparando los estado de tensegridad con balones, debido a que un balón puede considerarse como un sistema de tensegridad, que consiste en componentes comprimidos (aire) y componentes tensados(membrana). los estados son:

- El balón no tiene forma, el volumen de aire inflado es menor que lo que el envoltente puede encerrar, corresponde a un sistema de tensegridad cuyos longitudes de componentes comprimidos son insuficientes, de modo que el sistema no tiene una

configuración definida, los nodos son libres sin fijado por los cables.

- El balón toma su forma en cuanto el volumen de aire inflado es igual a lo que el envoltorio puede encerrar sin deformarse, corresponde a una tensegridad con todos los componentes de longitudes adecuados, la que puede referir se a “geometría de equilibrio de nulo auto-estrés”. En este estado, ninguno elemento está esforzado.
- El balón está soplado con un volumen de aire mayor que lo de envoltorio (es decir, la membrana se deforma y genera reacción al aire). En este caso, el aire está bajo presión y la membrana está bajo tensión, la presión de aire produce rigidez al balón. Corresponde una tensegridad pretensada, cuyo componente de compresión incrementa su longitud en cuanto el envoltorio está tensionado. La geometría se refiere a “geometría deformada por auto-estrés”

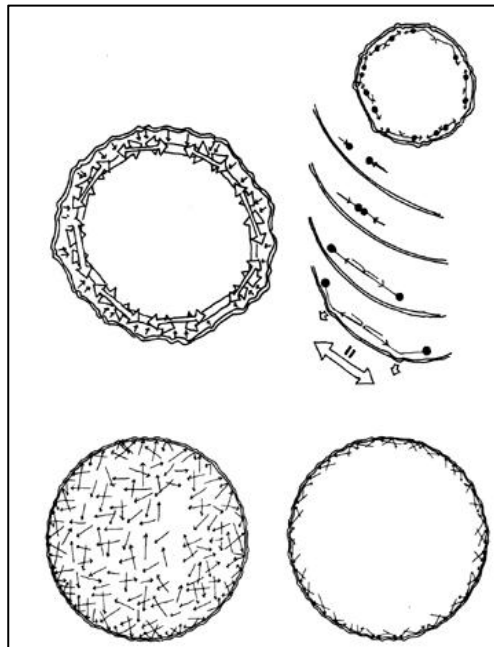


Fig. 3-2

Vale la pena señalar que, el mecanismo de incremento de rigidez de una estructura tensegridad se difiere a lo de balón. Como mencionado en capítulo 3.1, Simon Guest comprobó que la rigidez de una estructura de tensegridad no simple incrementar al aumentar la pretensión de los componentes tensados, sino que la rigidez se incrementa en bajo nivel de pretensado, mientras que se reduce bajo alto nivel de pretensado. En caso de balón, la rigidez siempre aumenta con la tensión de la membrana.

En conclusión, aunque la analogía de balón sea una buena manera de comprender los estados de tensegridad, el cambio en su rigidez no cumplió con la generalidad de lo de tensegridad.

3.3.MECANISMO DE AUTO-ESTRÉS

los sistemas de tensegridad requieren un proceso de búsqueda de formas para alcanzar estados de equilibrio de estrés. Es decir, al cambiar las longitudes de componentes de un sistema de tensegridad, La interacción entre los componentes producirá estrés. El proceso del llamado “búsqueda de forma” es el proceso del equilibrar de esfuerzos de los componentes.

René Motro especifica que los sistemas de tensegridad se encuentran en "estado de auto-equilibrio estable". Este estado describe el equilibrio de los nodos. Este auto-estrés es tridimensional, ya que la mayoría de los sistemas de tensegridad son sistemas espaciales.

El autor usa el programa de ordenador para simular un proceso de “búsqueda de forma” de tensegridad en saltamontes. Cuando se cambia la longitud relativa de elementos de tensión, el sistema de tensegridad produce una serie de deformaciones, incluyendo distorsión y compresión, en tal proceso el estrés entre los componentes se equilibra y finalmente mantiene un estado geométrico estable.

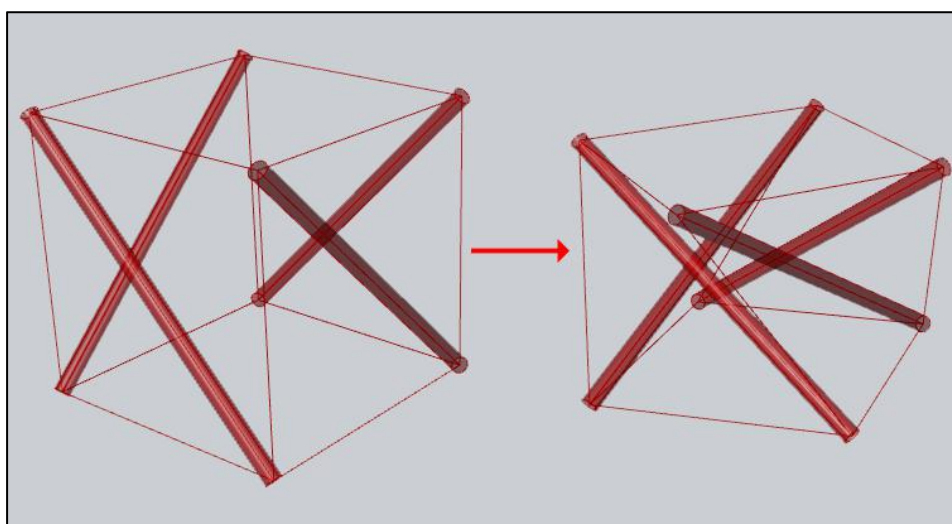


Fig. 3–3

4. TIPOLOGÍA

4.1.NOMENCLATURA

Algunos expertos han intentado crear una nomenclatura definitiva, que es clara y sistemática. Esto permitiría la categorización de “sistemas de compresión flotante ” y al mismo tiempo, proporcionaría suficiente información sobre ellos.

En la actualidad, las especialistas ha encontrado una pareja, que es muy lógica y similar, basada en la definición de la geometría mediante reglas básicas y sistemáticas. Williamson y Whitehouse emplean solo números, dos puntos y coma entre paréntesis,

mientras que Motro usa números y letras de manera intuitiva.

Williamson y Whitehouse considera una clase general de estructuras de tensegridad ($N, S; P_1, P_2, \dots, P_M$) que consisten en N miembros de compresión (puntales) y S miembros de tensión (cables). La estructura tiene M etapas con puntales de P_M por etapa. Como la figura (Fig.4-1), el "símplex" se nombra: 3,9;3

Motro los organiza siguiendo un código alfanumérico, explicando cada término con las iniciales seguidas de la cantidad de elementos, que se enumeran a continuación:

n = Nodos,

S = puntales o componentes comprimidos,

C = Cables o componentes de tracción,

R = sistema regular o I = sistema irregular según el caso,

SS = Sistema esférico (homeomórfico de una esfera) si este es el caso

Por ejemplo, el "símplex" de la misma figura (Fig.4-1), se expresaría como "n6-S3-C9-R-SS".

René Motro encuentra varias ventajas de este último en comparación con el primero. A veces es difícil hacer una distinción entre las diferentes etapas que componen un sistema continuo de compresión discontinua-tensión. Además, una variante de estos sistemas, propuesta por Kono y otros expertos, utiliza nodos donde solo se unen los cables, por lo que a veces es necesario definir explícitamente el número de nodos. Finalmente, en algunos casos es esencial saber si el sistema es regular e inscrito en una esfera (por ejemplo, para transformarlo en una cúpula) o si es irregular y no esférico.

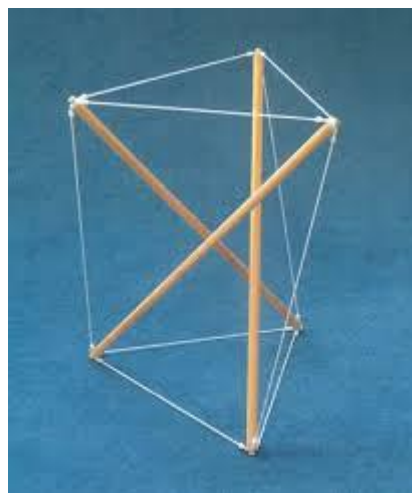


Fig. 4-1

4.2. CÉLULAS ELEMENTALES

Anthony Pugh (1976) fue la primera persona en mostrar un catálogo completo de sistemas de tensegridad. Es cierto que lo hizo casi exclusivamente relacionado con poliedros, pero sigue siendo muy útil. Primero, describió las figuras más simples superficialmente (tanto 2D como 3D), dependiendo de la posición relativa de sus tendones (pasando por sus centros o no), de la complejidad de los componentes comprimidos (elementos individuales o grupos de puntales), en el número de capas o etapas, etc. Luego, describió los tres patrones básicos que se pueden usar para configurar la estructura de tensegridad esférica o cilíndrica: Patrón de diamante, Patrón de circuito y Patrón de zigzag. Esta clasificación se basó en la posición relativa de los puntales de las figuras, como se explica en las figuras en siguientes párrafos. Finalmente, describió la forma de unir los sistemas y la construcción de figuras más grandes. En esa sección se describieron algunas rejillas, mástiles y cúpulas, pero no de manera detallada.

Para lograr una clasificación más clara, podría ser útil tener una cuenta de algunas otras configuraciones y geometrías. Algunos de los siguientes puntos se basan en el capítulo 4 del libro de Motro "Tensegrity, Structural Systems for the Future" (2003).

4.2.1. CÉLULA ESFÉRICA

Se puede definir una primera clase de sistemas de tensegridad de acuerdo con una propiedad topológica asociada con los cables: el conjunto de cables suelen ser homeomórfico para una esfera. Cuando todos los cables se pueden mapear en una esfera sin intersecciones entre ellos, aparte de los nodos del sistema, entonces el conjunto de cables es "homeomórfico" a una esfera. Todos los puntales están dentro de esta red de cable, los sistemas de tensegridad correspondientes se denominan "células esféricas".

Los sistemas de tensegridad más comúnmente descritos son células esféricas. Seguiremos, para la presentación posterior, la clasificación topológica dada por Pugh: las configuraciones rómbica, de circuito y de zigzag son las tres clases principales.

4.2.1.1. CONFIGURACIÓN RÓMBICA

Esto corresponde al Patrón Diamante establecido por Pugh. El nombre de este tipo de figuras responde a la forma en que se construyen. Cada puntal de un sistema de rombos representa la diagonal más larga de un rombo formado por otros cuatro cables, doblados siguiendo la diagonal #. Los prismas de tensegridad (prismas en T) se incluyen en esta sección.

Las prismas en T o las tensegridades prismáticas se generan a partir de un prisma recto donde los cables son horizontales o verticales y los puntales son diagonales entre los vértices de los dos niveles diferentes (figura 5.2.a). Si se introduce una rotación relativa entre los polígonos superior e inferior, se obtiene un prisma de tensegridad (figura 5.2.b). Pugh lo llamó "ángulo de torsión" y Minke usa la denominación "unidad de torsión",

depende de la cantidad de puntales (n = número de bordes del polígono) y viene dada por la fórmula demostrada por Roger S. Tobie en 1967:

$$\text{Ángulo} = 90^\circ - 180^\circ / n$$

El "Simplex" (Fig.4-2) llamado "n6-S3-C9-R-SS" según la nomenclatura de René Motro, es un buen ejemplo para comprender este tipo de configuración. El Simplex tiene un eje de simetría de rotación de orden 3. El ángulo de rotación relativo es igual a 30, siendo

$$\text{Ángulo} = 90^\circ - 180^\circ / 3 = 30^\circ$$

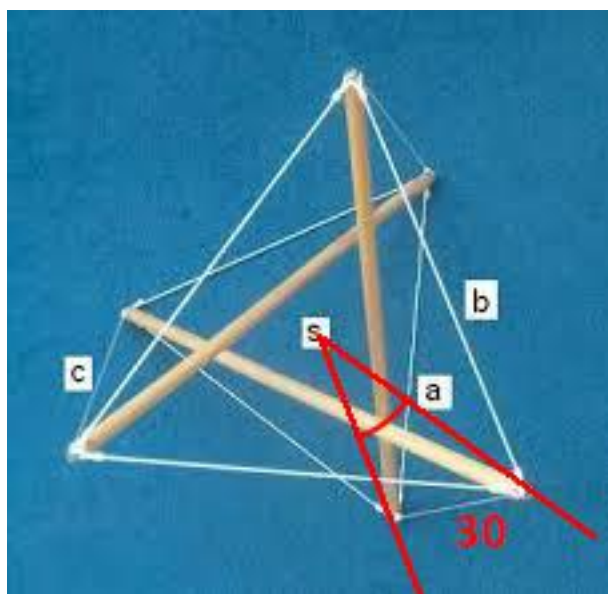


Fig. 4-2

4.2.1.2. CONFIGURACIÓN DE CIRCUITO

Esta segunda clase se caracteriza por la existencia de circuitos de puntal, que es un camino cuyos dos extremos se fusionan en un ápice, y un camino es un número de arcos, de modo que el extremo final de cada arco coincide con el extremo inicial de los siguientes arcos. en este caso, los elementos comprimidos son circuitos (polígonos de puntales), que deben considerarse componentes de compresión.

Como puede verse en la figura (Fig. 4-3), el cuboctaedro está compuesto por cuatro circuitos de tres puntales (cada circuito se entrelaza entre sí) y los cables que definen los bordes del poliedro.

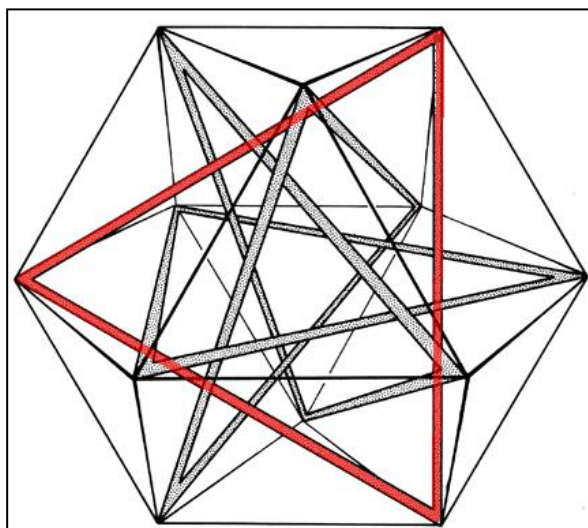


Fig. 4-3

Además, los sistemas de circuito también pueden generar esferas geodésicas de tensegridad o cúpulas si la frecuencia de ruptura # es múltiplo de dos. El procedimiento consiste en dividir los poliedros en cuestión siguiendo las reglas de las esferas geodésicas, definir una cuadrícula de triángulos para cada cara y luego dibujar los puntales y los tendones en la cuadrícula (Armstrong, 2004). Anthony Pugh dio una lista completa de las figuras construidas siguiendo este método; por ejemplo, el poliedro de tensegridad más grande descrito en ese catálogo, el tetraedro truncado de ocho frecuencias, se diseñó utilizando 672 puntales y 1344 cables.

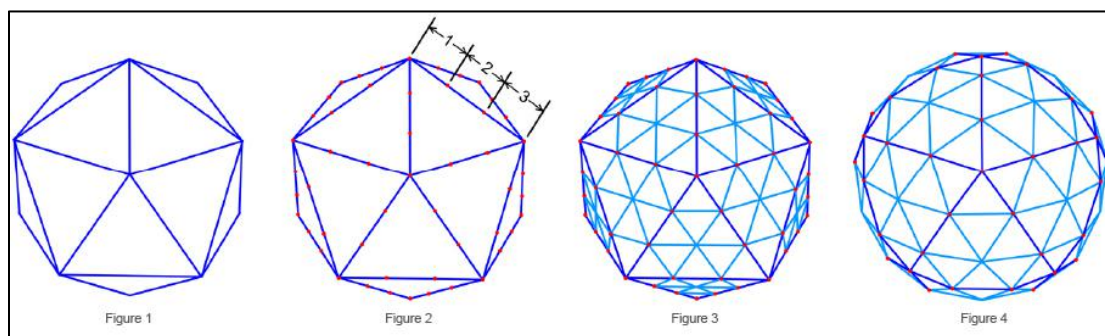


Fig. 4-4

Según la experiencia de Pugh, al tener mismo número de componentes comprimidos y componentes tensados, un sistema de circuito es más rígido que uno rómbico. Esto es comprensible ya que los de circuito deriva de lo rómbico, y se encuentra más compacto teniendo contactos entre sus elementos comprimidos.

4.2.1.3. CONFIGURACIÓN DE ZIGZAG

La definición dada por A.Pugh para esta nueva clase es también cualitativo:

"Un sistema de tensegridad tipo Z (o sistema de tensegridad zigzag) es tal que entre los dos extremos de cada puntal existe una totalidad de 3 cables no alineados" (). Estos tres

cables entonces también forman una "Z". Este sistema se puede construir tomando como base el sistema "rómico" de acuerdo con el principio mencionado antes. Este diagrama muestra la existencia de dos posibilidades. Cuando la transformación se opera en la totalidad de una celda de tensegridad, la coherencia debe preservarse para que el sistema esté estable.

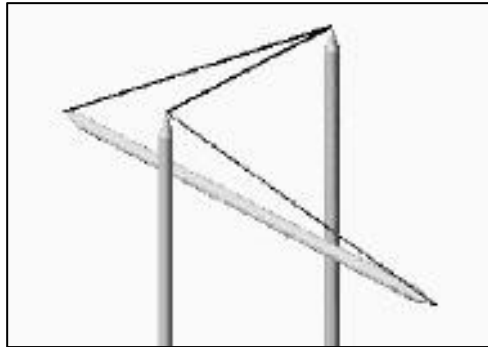


Fig. 4-5

Por ejemplo, si la configuración de un "octaedro expandido" (Fig.4-6) se modifica y los cables se fijan siguiendo el patrón de zigzag, resultará un "tetraedro truncado" (Fig.4-7)

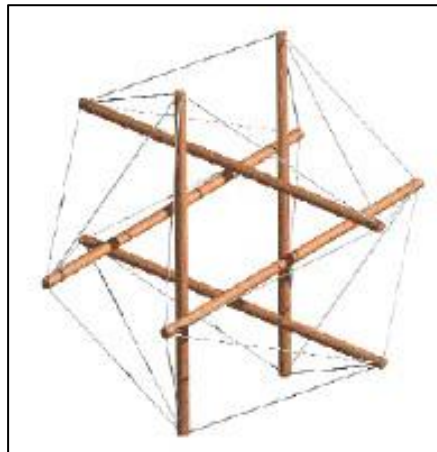


Fig. 4-6

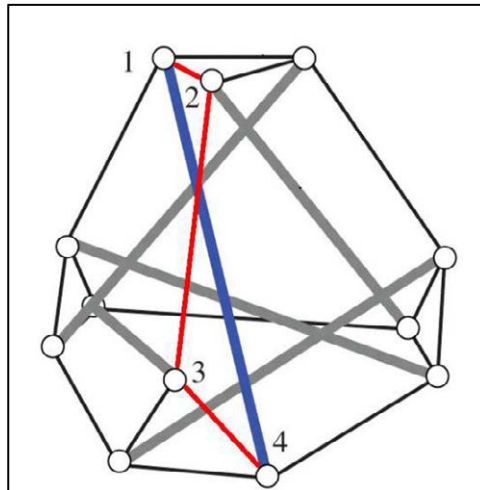


Fig. 4-7

Algunos poliedros como cubos son diferentes con los octaedros: no se puede obtener con la aplicación de las figuras equilibradas de transformación "z", que mantienen estrictamente la geometría inicial.

4.2.2. CÉLULA ESTELAR

La clase de "célula estrella" es una derivación de la clase "célula esférica". Por ejemplo, tomando como base uno del sistema rómbico, si se inserta un puntal vertical en el centro siguiendo el eje principal de simetría y se une al resto de los cables por medio de tendones, se crea un sistema estelar (Fig.4-8). Se podría proponer otra posibilidad insertando un pequeño nodo esférico en lugar del puntal central.

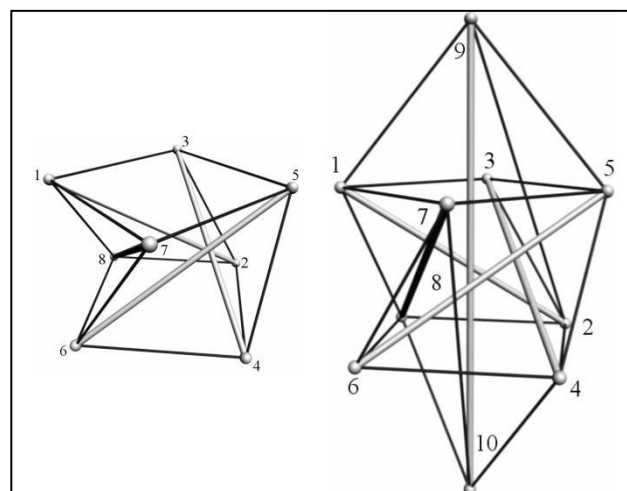


Fig. 4-8

podemos citar las llamadas "células estelares" diseñadas por V.Raducanu. Constituyen una extensión de cuatro células prismáticas de tensegridad. Sus diagonales, respetando las consideraciones de equilibrio, reemplazan los cuadrados superiores e inferiores de los cables.

En esta clase, los sistemas pueden establecerse con algunos nodos sin puntales.

4.3. ASAMBLEAS

En general, las células elementales son "regulares": todos los cables tienen la misma longitud "c", todos los puntales tienen la misma longitud "s". Esto no siempre es cierto para los ejemplos de ensamblaje: a veces, los ensamblajes solo se pueden lograr con células "irregulares" (varias longitudes de cables, varias longitudes de puntales)

4.3.1. VIGAS

Se pueden generar los sistemas unidimensionales agregando los diferentes módulos que siguen un eje que dicta rígidamente la geometría. Varias torres rectas se han construido a lo largo de los años.

Debido a la característica general de los sistemas de tensegridad, que suele contar con baja rigidez, las ensamblajes de vigas generará flechas considerables cuando reciben cargas. De modo que las estructuras de dicha sistema suelen ser pre-esforzados. En este caso, cuando los sistemas unidimensionales cuentan con secciones transversales que no fuera simétrica en el centro, la tensión de los cables (o elementos tensados) generará torsiones a la estructura entera en eje longitudinal.

4.3.2. CUADRÍCULAS

A ensamblar tensegridad células en dos dimensiones, podemos fundar tensegridad cuadrículas. La forma en que se unen las células toma un gran papel en su capacidad mecánica. Nuestra llamada cuadrículas (rejillas) de tensegridad generalmente se refiera a "Double-Layer Tensegrity Grids (DLTGs)".

Se pueden usar varios modos de unión: nodo a nodo, nodo a cable, cable a cable (parcial),

Ariel Hanaor básicamente definió 3 tipos de uniones:

- Tipo I - Módulos que solo comparten nodos
- Tipo Ia: polígonos de lados impares que comparten nodos (módulos diestros y zurdos), que producen configuraciones únicas.
- Tipo Ib: polígonos de lados pares que comparten nodos, produciendo configuraciones simétricas.
- Tipo II: los módulos también comparten porciones de los polígonos base, produciendo también configuraciones únicas (exceptuando el t-Prisma hexagonal)

Hanaor y otros colaboradores llevaron a cabo varios estudios geométricos y pruebas de carga, encontraron que las cuadrículas triangulares son más rígidas que las cuadradas, y la eficiencia de la utilización del material fue similar en las tres dichas cuadrículas.

René Motro y su equipo de investigación trabajaron sobre células de 4 puntales, construyeron cuadrículas con 9 células elementales, de uniones nodo-a-nodo (Fig.4-9), con objetivos de desarrollar el modelo de que cables constituyendo trayectorias continuas. Este sistema podría excluirse de la categoría de tensegridad por que los puntales contiguos se conectan. Pero René Motro piensa que estas cuadrículas se ajustan a la definición extendida presentada en el capítulo 2.

Las cuadrículas bi-direccionales se consideran como el modelo más simple. LMGC (Laboratoire de Mécanique et Génie Civil) construyó un prototipo de cuadrícula de dicho modelo durante el invierno 2000-2001. La estructura ocupa 82 metro cuadrado y pesa 900kg, fundado por materiales metálicos de norma de construcción Eurocode3 para una carga descendente externa de 1,6 kN/m².

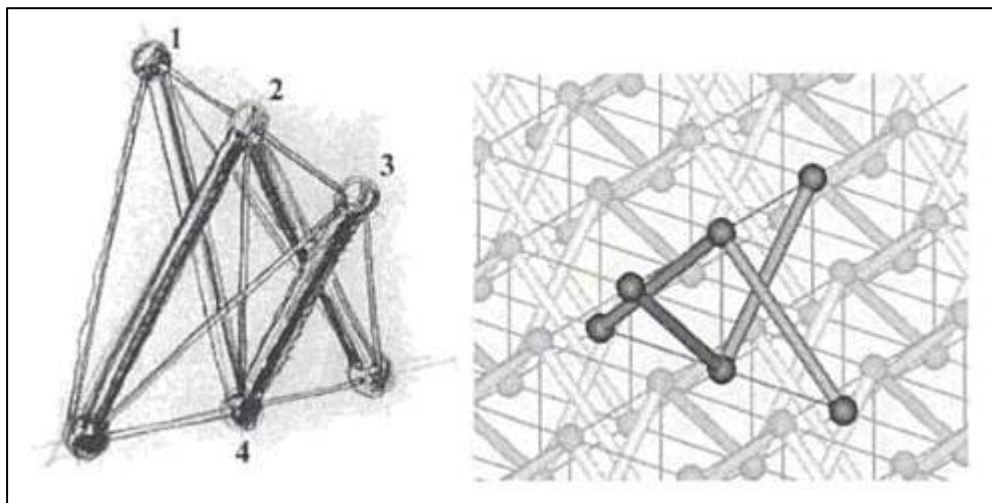


Fig. 4-9

4.3.3. SISTEMA DE CURVATURA

Se puede entender esta clase por sistemas bi-dimensionales. Se divide en sistemas de curvatura simple y sistemas de curvatura doble.

Al mantener el principio de las células auto-esforzadas elementales, es posible modificar la forma de equilibrio para generar un sistema de curvatura simple. René Motro, en su publicación "Tensegrity system from Design to Realisation" nos muestra, en un "simplex" de 4 puntales de misma longitud constante, la trayectoria de un nodo debido al cambio de la longitud de los cables (Fig.4-9). Combinando dichas células deformadas, René logra una cuadrícula curvada de doble capa, en forma de una bóveda (Fig.4-10).

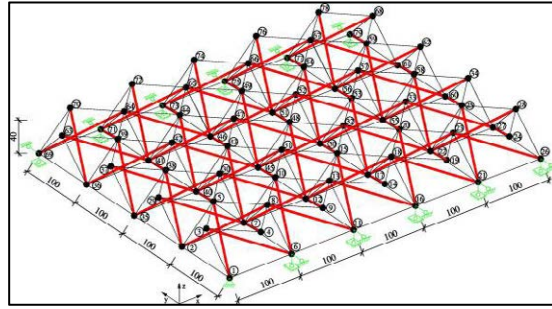


Fig. 4-10

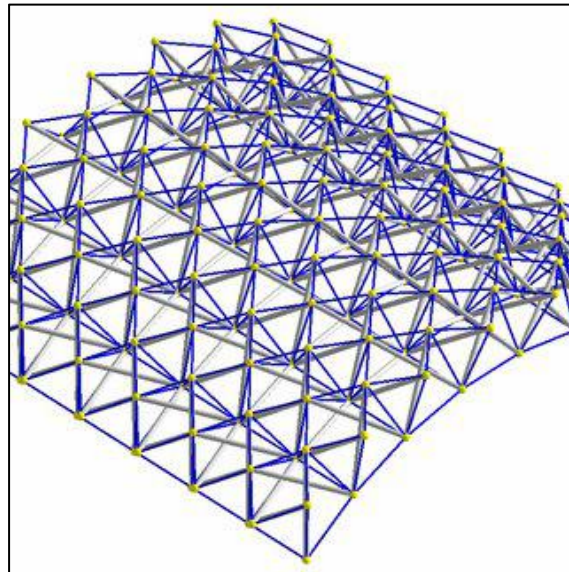


Fig. 4-11

Formex propuso una descripción geométrica para modelar una sistema de doble curvatura, en forma de mapear cables a 2 superficies de doble curvaturas.

Motro también diseñó un prototipo de sistema doble curvatura, aplicando la misma células elementales de su obra de cuadrícula llamada “DUO”. Este trabajo nos manifiesta la posibilidad de dar a un sistema de tensegridad con cualquiera curvatura que queremos al ajustar la distancia entre los nodos y las longitudes de los cables (Fig.4-12).

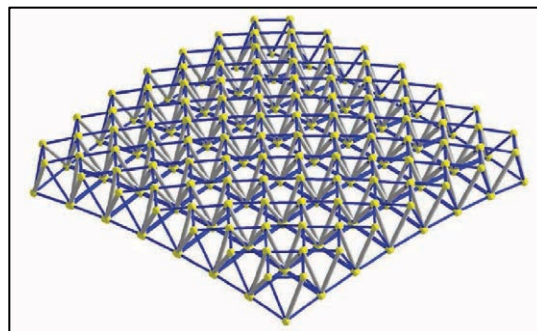


Fig. 4-12

4.3.4. CONGLOMERACIONES

Encontramos muchas obras (Fig.4-13), en las esculturas artísticas de Kenneth Snelson, que son sistemas de ensamblajes tridimensionales. En esta clase, las tensegridades no cuentan con direcciones predominantes y células uniformes.

No parece haber ningún uso de tensegridades de este modelo en los edificios.

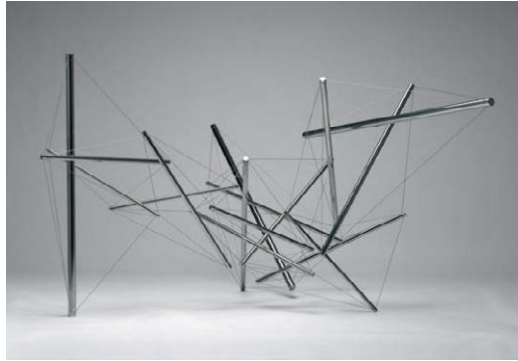


Fig. 4-13

4.3.5. SUPERFICIES MENBRANAS

Los sistemas de tensegridad-membrana son sistemas de tensegridad con membranas adjuntas, que se trata como extensiones de los sistemas de tensegridad clásicos. Puede incluirse en la clase de ensamblaje bidimensional. En estos sistemas, las puntas se tratan como cuerpos rígidos, y se usa un método energía-basado para determinar las ecuaciones para las configuraciones estáticas de los sistemas generales de membrana de tensegridad.

Un sistema de tensegridad de componentes típicos pueden convertirse fácilmente a sistema de tensegridad-membrana (Fig.4-14). La membrana, al tratarse como un componente tensado de tensegridad, puede desplazar los cables que asumen el mismo trabajo. Una vez se desplazan los cables por membranas, se logra un sistema de tensegridad-membrana.

En mi opinión las membranas pueden reemplazar los cables en siguiente caso:

- A. Los cables coplanares forman un circuito, no hay nodo del circuito que pertenece a un mismo puntal.
- B. Los cables no coplanares forman un circuito, no hay nodo del circuito que pertenece a un mismo puntal.
- C. Los cables y puntales forman un circuito de 3 nodos contiguos (coplanar), 2 de un mismo puntal y 1 de otro. Los 3 nodos conectan por 2 cables.

- D. Si hay 2 circuitos contiguos de caso C, compartiendo un mismo cable, se podrá combinar las membranas reemplazadas de ambos circuitos.

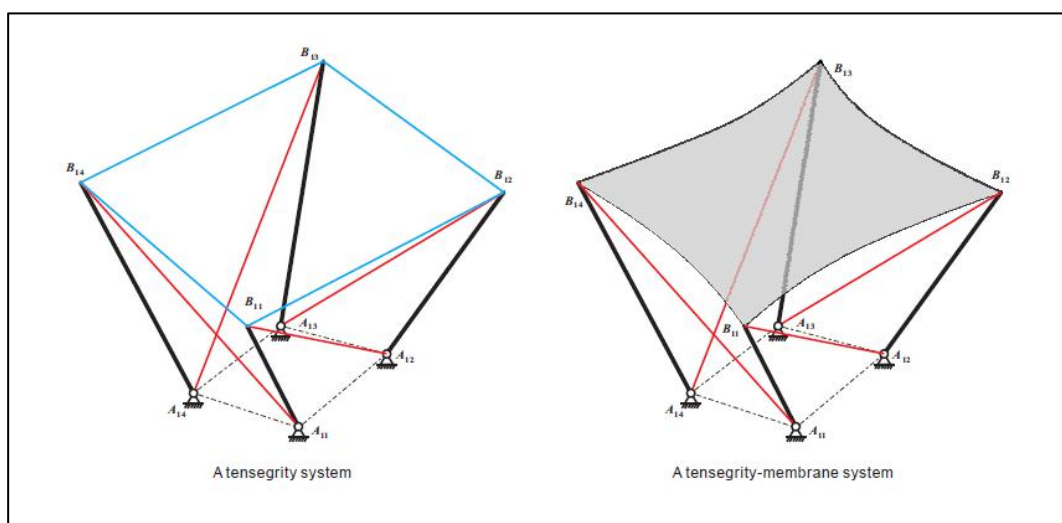


Fig. 4–14

5. APLICACIONES

En este capítulo, con el fin de evaluar la posibilidad de aplicar la tensegridad en arquitectura y inspirar a la gente que quiere lograrlo, se exponen algunas obras de tensegridad en varias configuraciones y se las analiza.

Las tensegridades tienen bastantes características que las hacen atractivas para la construcción. Por ejemplo, uno puede "capturar" mucho espacio con solo unos pocos mástiles y cables, y esto lo convierte en una técnica de construcción muy económica. Estos mástiles y cables pueden enviarse fácilmente al sitio de construcción.

Valentín Gómez Jáuregui, en su tesis "Tensegrity Structures and their Application to Architecture", explica su punto de vista de todas las ventajas que las estructuras de tensegridad, comparando con las técnicas de construcción convencionales. Por otro lado, Jáuregui no se olvida de mencionar las desventajas también, como la compleja distribución de fuerzas en la estructura y dificultades de unir los cables en los nodos.

Expertos en tensegridad como Anthony Pugh, René Motro, Robert Skelton, Ariel Hanaor y Robert Burkhardt han visto suficientes motivos de realizar estudios exhaustivos sobre las tensegridades y sus posibilidades arquitectónicas.

5.1. EJEMPLOS ACTUALES

En esta sección, se exponen las obras representativas, en varias clases de configuraciones. Se distinguen si esas obras son "tensegridad pura" o "tensegridad falsa".

Se comparan con los trabajos precedentes que menciona en el capítulo 2 y el autor analizará

dichos ejemplos brevemente los principios de configuración y los modelos estructurales. La investigación detallada se presentará en la próxima sección.

5.1.1. PABELLONES

MOOM tensegritic membrane structure



Fig. 5-1

“MOOM tensegritic membrane structure” es una obra diseñada por C + A Coalacanth y Asociados. (Fig.5-1)

El volumen de 26 metros de largo, hasta 7,5 metros de ancho y 4,25 metros de altura es auto-portante y está compuesto únicamente de dos componentes: puntales metálicos y una piel delicada de poliéster elástico, de solo 0,7 mm de grosor.

La estructura no es completamente auto-portante, se basa en anclajes que se fijan en tierra. Los componentes tensados (la membrana) no ha formado un envolvente que sumerge todas las componentes comprimidos (los puntales), sino que el sistema está enmarcado por un zuncho rígido (Fig.5-2), que es el terreno en este caso. Por lo tanto esta obra se justifica como una **tensegridad falsa**

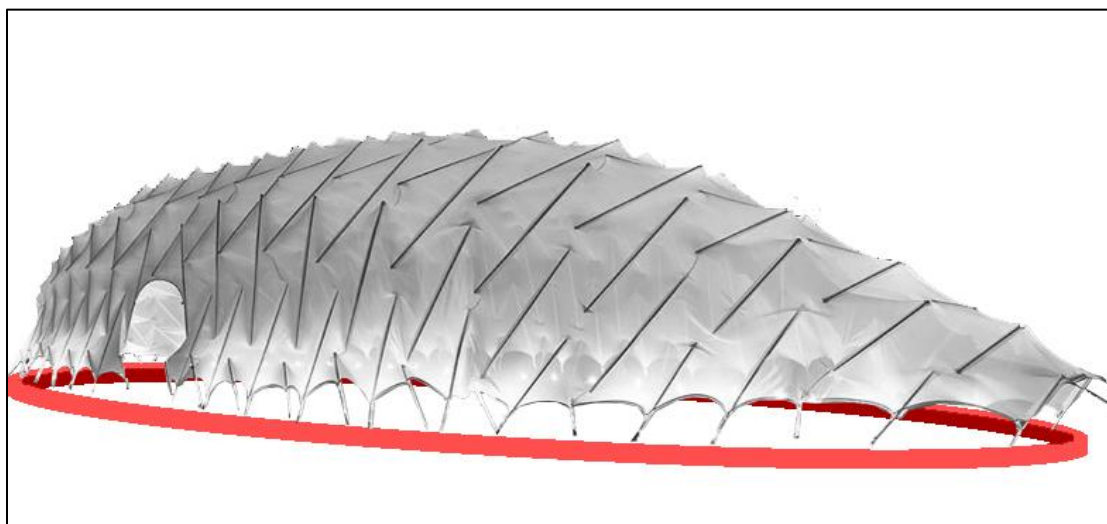


Fig. 5-2

El análisis de sistema de este proyecto se presenta en el párrafo 5.2

Underwood Pavilion



Fig. 5-3

El pabellón Underwood (Fig.5-3) fue el resultado de un estudio de construcción de diseño digital impartido por Gernot Riether, Andrew J. Wit y Steven T. Putt en la Ball State University. La estructura está compuesta por 56 módulos de tensegridad de tres puntas. Al ajustar paramétricamente sus dimensiones, los diseñadores pudieron controlar tanto la

curvatura del pabellón como el tamaño y la forma de varias aberturas que enmarcan las vistas del sitio.

La estructura entera del proyecto, se trata de un conjunto de sistema “simplex” de 3 puntales (Fig.5-4). Según la nomenclatura de del capítulo 4, el simplex de esta estructura pertenece a la célula esférica, de configuración rómbica. Debido a que las célula se clasifica de tipo estándar de tensegridad, mientras que entre las células no existe conexión de puntales, este proyecto pertenece a **tensegridad pura**.

A diferencia de la “simplex tradicional” mencionada en el capítulo 4, en este sistema simplex se introduce la membrana como componente tensado. Vale la pena mencionar que en esta célula elemental, la membrana no juega el papel de la estructura principal, los puntales y los cables son suficiente de constituir una tensegridad (Fig.5-5). Por lo tanto, la presencia de una película no es necesaria si la resistencia los materiales es suficiente. Este proyecto debe considerarse como una tensegridad que consiste en puntales y cables.

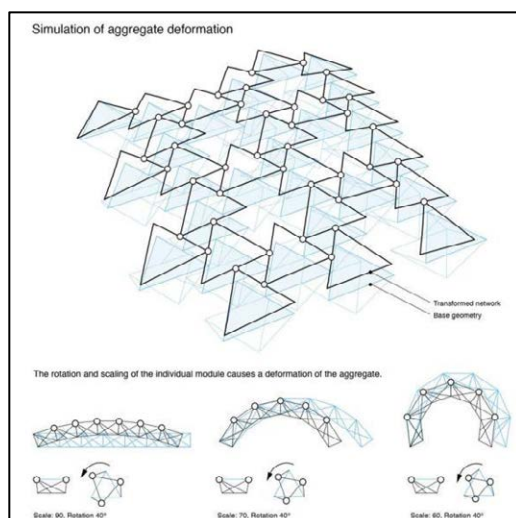


Fig. 5-4

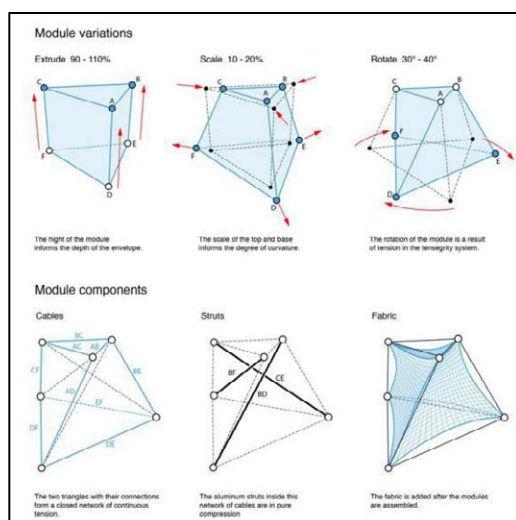


Fig. 5-5

El análisis de sistema de este proyecto se presenta en el párrafo 5.2.

5.1.2. TORRES (SOPORTES)

White Rhino II



Fig. 5-6

La arquitectura de Tensegridad "White Rhino II"(Fig.5-6) diseñada por el Profesor Imai y el Profesor Kenichi Kawaguchi se completó en mayo de 2017.

En el laboratorio de Kawaguchi, se han desarrollado un método que suprime la deformación ideando la colocación de los materiales extensibles, y también un método que puede introducir tensión solo con el poder humano, y demostró ser pionero en el mundo con White Rhino I en Nishi Chiba.

La estructura global de este proyecto, no estrictamente pertenece a sistema de tensegridad. El componente de tensegridad se dispone en el centro del pabellón, apoyando la carga del techo. Este torre de carga se articula en el suelo, limitando su movimiento horizontal.

A diferencia de la estructura del "pabellón MOON" mencionado antes en este capítulo, el único punto fijo en el suelo no afecta el equilibrio general de la tensión. En este sistema de tensegridad, todos los componentes tensados (los cables) forman circuitos. La

tensegridad es auto-portante, cuyos ambos extremos conectan a la cubierta y el suelo, desempeñan el rol de fijar la disposición de sí. Por eso el “soporte” de este proyecto pertenece a **tensegridad pura**.

El análisis de sistema de este proyecto se presenta en el párrafo 5.2.

White Rhino



Fig. 5-7

El nombre oficial de este edificio es "sistema de observación del domo modelo de estructura espacial tipo tensión", comúnmente conocido como "White Rhino" (Fig 5-7). Tal edificio se trata del prototipo de "White Rhino II". Los diseñadores apuntan a un número mínimo de materiales de tensión. La tensegridad resuelta una estructura inestable estabilizada solo por la rigidez geométrica. Tal tensegridad genera flechas extremadamente grandes bajo carga.

Tuvieron éxito en el manejo de esta estructura cutre por numerosos modelos, cálculos repetitivos no lineales y experimentos reales. Mientras que la tensión se pone por energía humana en el sitio de construcción es a lo sumo 4 toneladas, mediante la adopción de la ventaja estructural de la tensegridad, pudieron apretar por el poder humano sin necesidad de utilizar la tensión de alimentación hidráulica o eléctrica.

Igual al edificio "White Rhino II", este edificio no estrictamente pertenece a sistema de tensegridad. El componente de tensegridad se dispone en el centro del pabellón, apoyando la carga del techo. Cada tensegridad consiste en un "simplex" de 3 puntales abajo y un columna metálica arriba. El simplex, basando a 3 zapatas que fijan los 3 extremos de puntales, apoya la columna metálica por cables. De modo que todos

componentes comprimidos son aislados y la estructura se trata de **tensegridad pura**.

5.1.3. PUENTES

Puente de Kurilpa



Fig. 5-8

El puente de Kurilpa (Fig.5-8) es un puente peatonal que conecta el distrito central de negocios de Brisbane con el recién desarrollado distrito artístico y cultural en el South Bank de la ciudad. Inspirado por el concepto de tensegridad

Los diversos elementos de puente de tensegridad son los siguientes (Fig.5-9):

- Mástiles: perfiles tubulares de acero de hasta 30 m de longitud con secciones de 610-905 mm de diámetro
- Cables principales del mástil: cables enrollados en espiral de acero inoxidable de alta resistencia de 30-80mm de diámetro
- Espaciadores: perfiles tubulares de acero de hasta 23 m de largo con secciones de 457-508 mm de diámetro
- Cables de espaciadores: cables enrollados en espiral de acero inoxidable de alta resistencia de 19-32 mm de diámetro

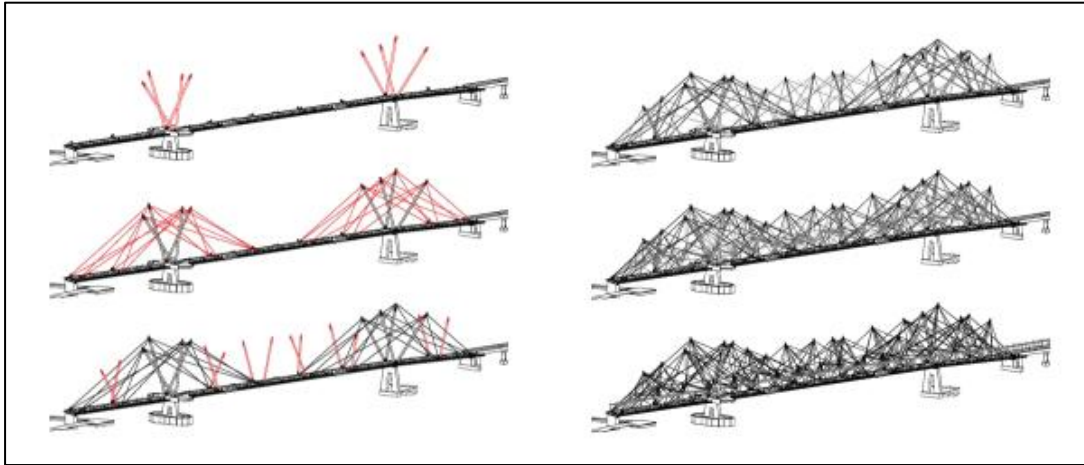


Fig. 5-9

Se trata de **tensegridad falsa** la estructura del tal proyecto , aunque sobre la plataforma del puente se manifiestan puntales metálicos aislados uniendo por cables. La plataforma del puente es un miembro continuo que soporta tanto flexión como compresión axial. Hay varios lugares donde los puntales se interconectan ... más obviamente sobre los machones, que soportan conexiones de pares de mástiles.

Un blogger en puentes, The Happy Pontist concluye que el puente de Kurilpa es básicamente un puente atirantado con algunos aspectos de un braguero invertido.

Oasys Software publicó un artículo estructural del puente de Kurilpa como caso de estudio, analizaron que el conjunto de tensegridad que cuenta con puntales suspensos y cables, cumple tres funciones fundamentales:

- Suspende el dosel, lo que le permite flotar sobre la plataforma sin medios de soporte aparentes.
- Contiene lateralmente la parte superior de todos los mástiles, evitando que se doblen lateralmente bajo las cargas que surgen de la suspensión de la plataforma más las fuerzas laterales y sísmicas.
- Funciona al unísono con todos los mástiles y cables para resistir las fuerzas de torsión y laterales que surgen de las cargas en la pasarela (peatones), viento y terremotos.

5.1.4. ESTRUCTURAS DE TECHO

Estadio Ciudad de La Plata

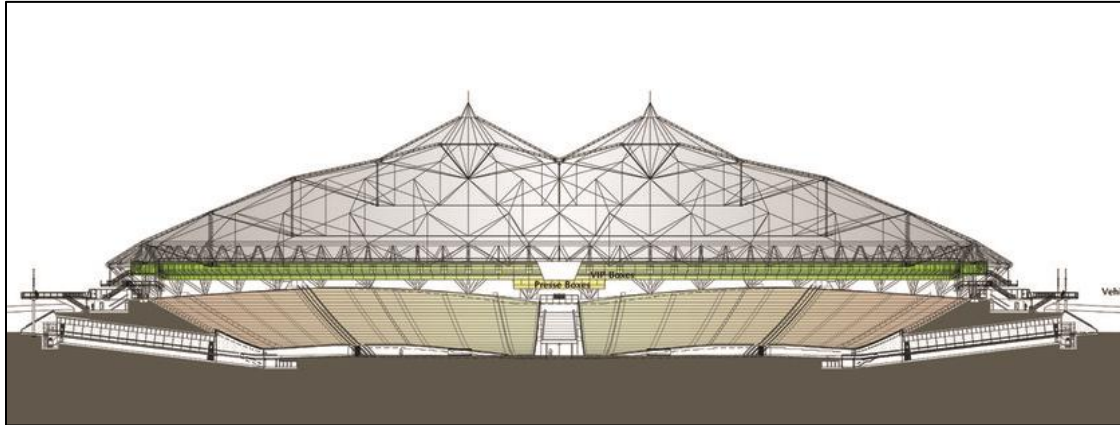


Fig. 5-10

La forma en la cubierta (Fig.5-10) deriva de una intersección de dos círculos de 190 m de diámetro, la distancia entre sus dos centros vale 48 m. En su perímetro, un anillo metálica espacial actúa como zuncho por configuración de tubos de acero reticulado triangular . El cordón superior del zuncho constituye la línea de arranque para el domo formado por la red de cables triangulada, típica en este tipo de cubiertas. La estructura de cables está conformada por cables de acero en estado de tensión en 3 niveles diferentes unidos entre sí mediante columnas verticales. El sistema es tridimensional; en consecuencia tiene el beneficio de la triangulación de los elementos estructurales, mejorando la capacidad para soportar cargas y permitiendo adecuarse a geometrías no convencionales como la del Estadio. Sobre la estructura de cables se monta la cubierta, la que consiste en paneles conformados con una membrana de fibra de vidrio recubierta con Teflón que no contribuye estructuralmente. Una característica de la cúpula es que la estructura de cables es completamente estable y su estabilidad no depende de esa membrana, que es simplemente una cobertura. El sistema de tensegridad, mediante el pretensado reduce la deformación del conjunto.

La cubierta se justifica por **tensegridad falsa**, debido a que la tiene un zuncho rígido en su perímetro. Como se menciona en la introducción anterior “un anillo metálica espacial actúa como zuncho por configuración de tubos de acero reticulado triangular.” (Fig.5-11)



Fig. 5-11

Vale la pena señalar que este diseño puede haber imitado la estructura utilizada por el arquitecto David H. Geiger en el Georgia Stadium, Geiger había registrado un patente para dicho diseño (Fig.5-12), tal estructura fue patentado por Geiger en 1988. Ambos proyectos cuentan con:

- Zuncho rígido, lo que rodea la cubierta a su perímetro, resistiendo la tracción de los cables que conecta a sí.
- Serie de anillos rígidos escalados, se superponen y se elevan uno por uno.
- Puntales verticales que se ubican encima de los anillos, apoyando cordones superiores , mantiene la configuración de membrana bajo la carga.

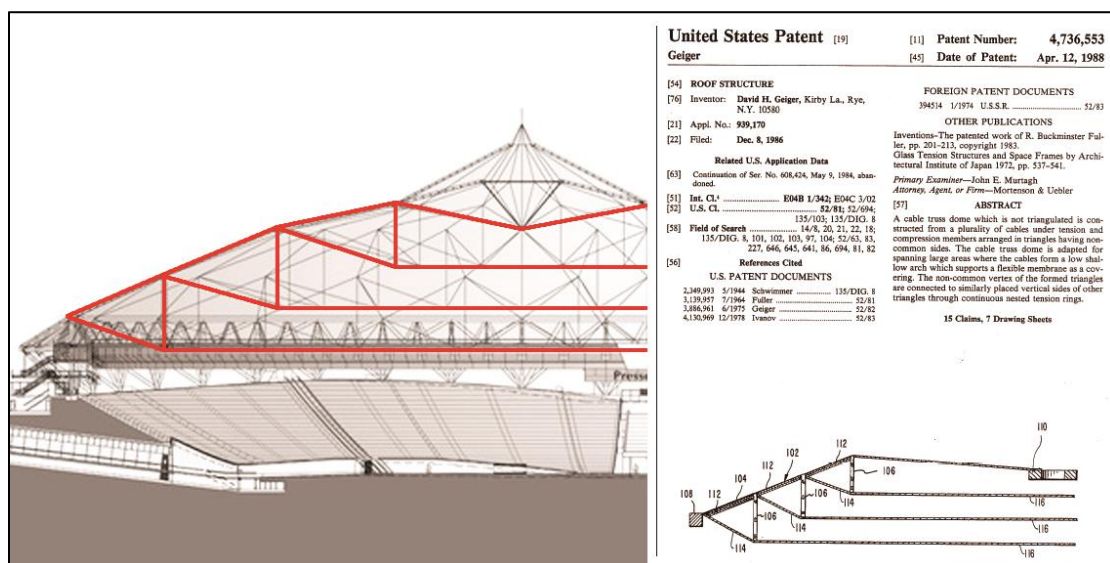


Fig. 5-12

Blur Building



Fig. 5-13

El edificio Blur (Fig.5-13) fue un pabellón de los medios construido para la Swiss Expo 2002 en la base del lago de Neuchâtel en Yverdon-les-Bains, Suiza. Desde pilas en el agua, un sistema de puntales rectilíneos y varillas diagonales se proyectan sobre el lago. Las rampas y las pasarelas se mueven a través del sistema.

Estos sistemas se basan en un módulo elemental que consisten en 5 puntales y cables de altura. 4 de los 5 puntales describen un polígono cuadrangular. Esta celda octaédrica elemental no es un sistema de tensegridad, de acuerdo con la definición presentada. Los componentes comprimidos se encuentran en el límite del sistema.

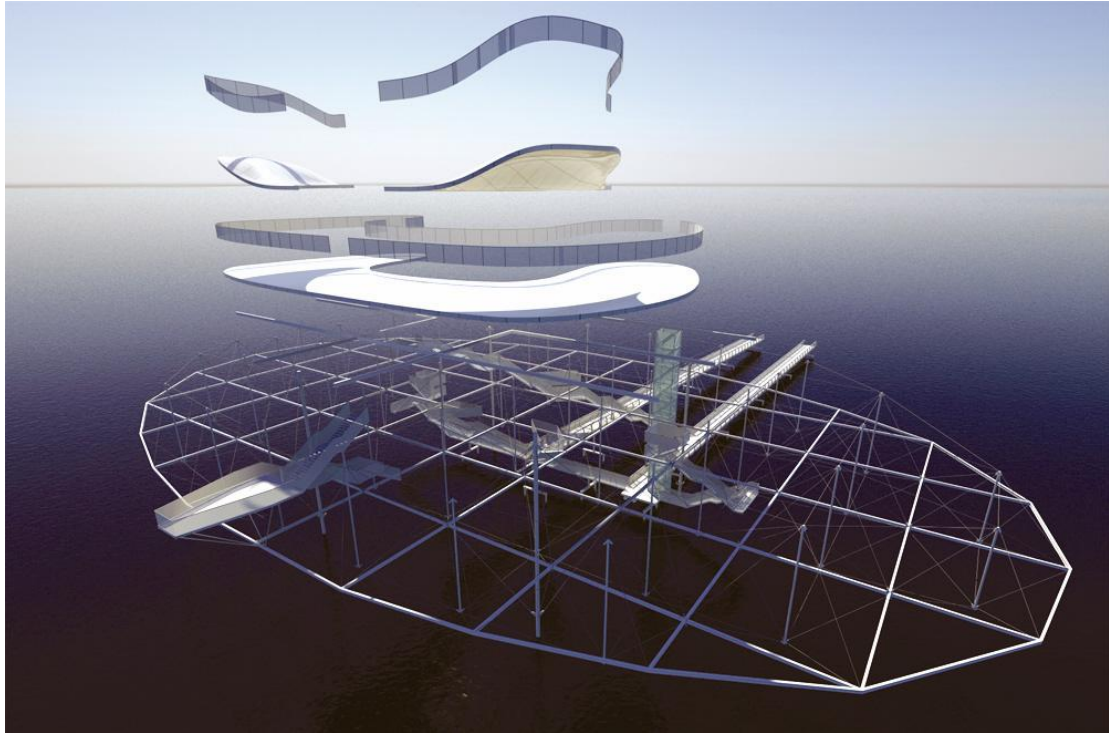


Fig. 5-14

Pero el conjunto de estructura, en visión global (Fig.5-14), puede ser considerado un sistema de **tenseguridad pura**. En tal caso 2 tipos de componentes comprimidos pueden identificarse: puntales verticales (marcado A), los que son aislados, no conectarse entre sí y a la gran rejilla metálica; Barras horizontales (marcado B), incluyendo vigas, viguetas (barras perpendiculares a las de vigas) y el zuncho en el borde de la plataforma. Algunos puntales de grupo A, al tratar se de soportes de la plataforma, se alargan abajo hasta las zapatas en el lago. Entre dichos soportes y la superestructura (Fig.5-15), el cable es el único miembro de una de ambas partes funcionando por tensión. De modo que, el proyecto puede identificarse como un sistema de tenseguridad pura, en que los soportes y el conjunto de superestructura son componentes comprimidos. Incluso si sus módulos elementales no cumple las definición de tenseguridad.

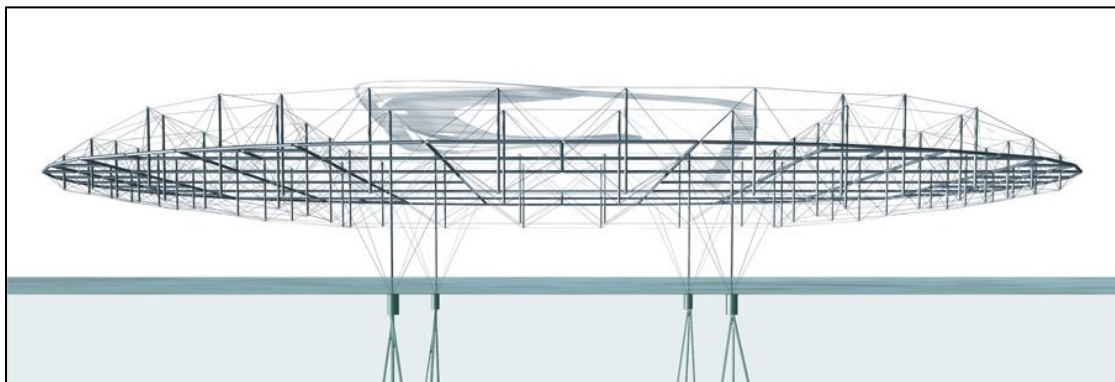


Fig. 5-15

5.2.PRINCIPIOS DE LOS PROYECTOS ACTUALES

Después de aprender tales proyectos actuales del Siglo XXI, se presentarán en este párrafo los principios de funcionamiento de tensegridad en dichos proyectos, con el fin de manifestar las ideas de diseño a lectores del artículos y inspirar la gente que quiere aplicar tensegridad en sus obras propias.

Al autor explicaré los principios en 4 secciones, las que pertenece de viarios tipos de existencia de tensegridad en los proyectos, siendo: tensegridad pura como la estructura general/ tensegridad falsa como la estructura general/ tensegridad pura como la estructura parcial/ tensegridad falca como la estructura parcial.

De acuerdo con las diferentes opiniones de cada uno, nuestra percepción sobre “estructura general” surgirá controversia. En el opinión del autor, la estándar para juzgar “estructura principal” es que si el sujetos de investigación asumen o no funciones principales de tales proyectos (es decir, cubrir para un pabellón, apoyar para un puente...).

5.2.1. ESTRUCTURA GENERAL DE TENSEGRIDAD PURA

El pabellón Underwood, al tratarse de un conjunto de “simplex” conectado cable-puntal (Fig.5-16), se considera como un sistema de tensegridad pura. Se manifiestan las células elementales de configuración rómbica, las que menciona en capítulo 4.2.1.1. En dichas células existen 2 tipos de componentes tensados, siendo el puntal y la membrada (Fig.5-17).

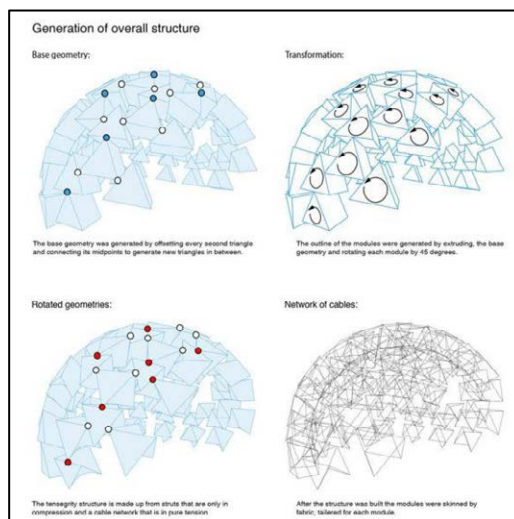


Fig. 5–16

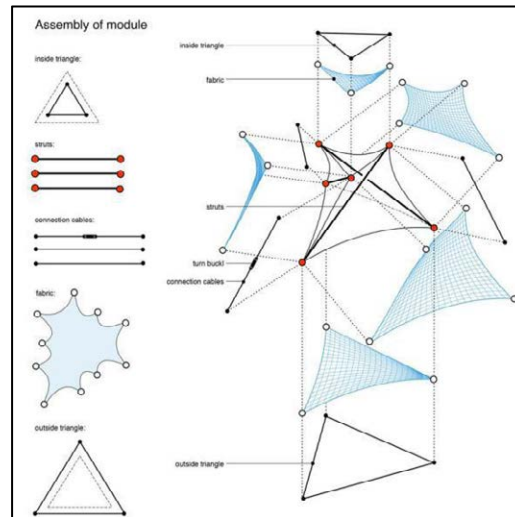


Fig. 5-17

En el capítulo 4.3.5, el autor han concebido 4 posibilidades de introducir la membrana a un sistema de tensegridad para reemplazar los cables, siendo:

- A. Los cables coplanares forman un circuito, no hay nodo del circuito que pertenece a un mismo puntal.
- B. Los cables no coplanares forman un circuito, no hay nodo del circuito que pertenece a un mismo puntal.
- C. Los cables y puntales forman un circuito de 3 nodos contiguos(coplanar), 2 de un mismo puntal y 1 de otro. Los 3 nodos conectan por 2 cables.
- D. Si hay 2 circuitos contiguos de caso C, compartiendo un mismo cable, se podrá combinar las membranas reemplazadas de ambos circuitos.

Esta teoría puede verificarse en el “simplex de membrana” en este proyecto (Fig.5-18). Las cables coplanares AB, AC, BC describe un triángulo superior de la prisma que cumple las condiciones de caso A; Las cable AC, CF y el puntal BF, constituye un triángulo lateralmente en la prisma que cumple las condiciones de caso C, y del mismo modo, las cables AD, DF y el puntal BF construyen otro triángulo que pertenece al caso C.

Se menciona en el caso D, que los circuitos (es decir, los triángulos en este ‘simplex’) pueden combinarse en una única membrana, como la que construye en los ‘simplex’ de tal proyecto.

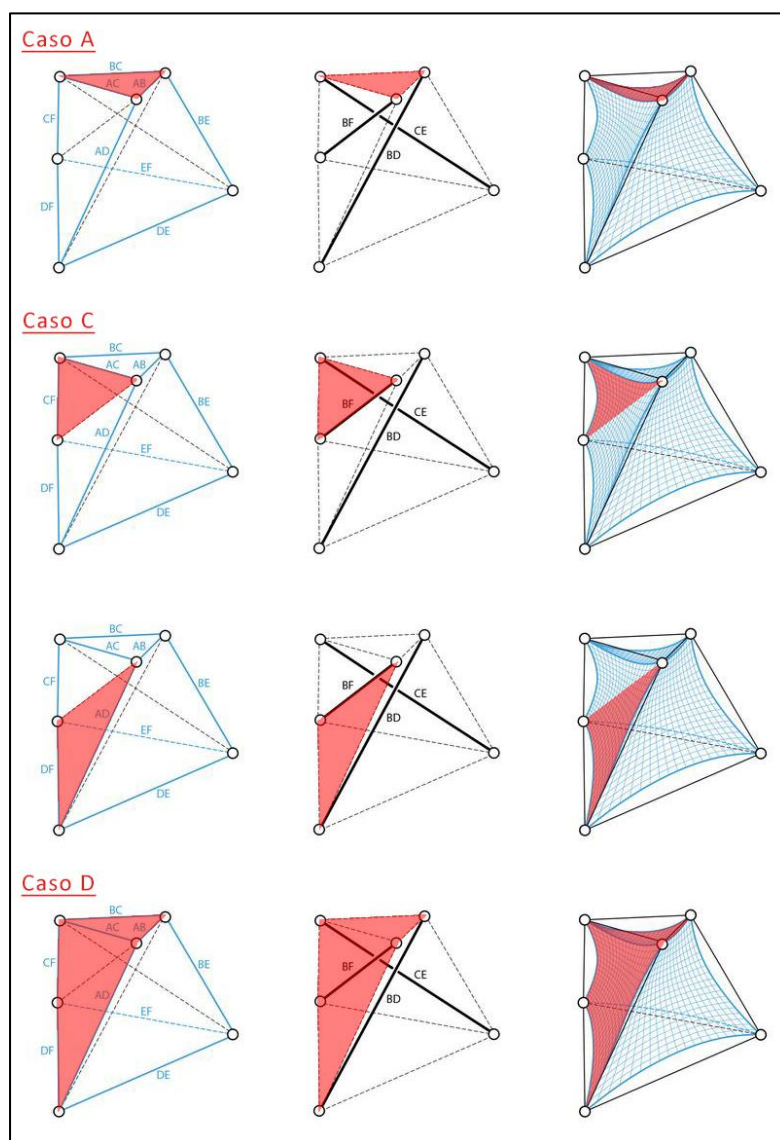


Fig. 5-18

En las células de 'simplex' que constituye el pabellón, se ha duplicado el componente tensado, existiendo los cables y la membrana simultáneamente, aunque, en la teoría del autor, los dos miembros son equivalentes y ambos pueden ser reemplazados entre sí. Vale la pena señalar que, los 'simplex de membrana' se conecta por cables y las membranas son totalmente aisladas. Por lo tanto, se puede concluir que los cables desempeñan un papel de constituir las células elementales y las conectan, la membrana solo funciona dentro de células elementales.

5.2.2. ESTRUCTURA GENERAL DE TENSEGRIDAD FALSA

En el Pabellón MOOM, se aplica el sistema de tensegridad falsa como la estructura general. En conjunto de membrana y puntales se basa en anclajes que se fijan en tierra.

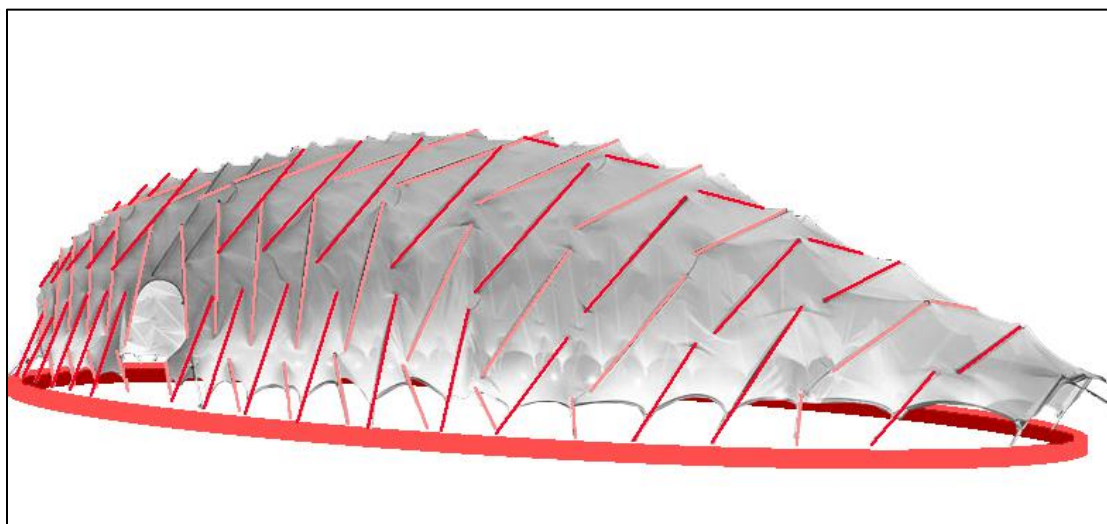


Fig. 5-19

El autor de este artículo cree que esta estructura se puede simplificar como una serie de arcos que se constituye con puntales metálicos (Fig.5-19). En número de los puntales se disminuye gradualmente desde el medio a ambos lado. Los puntales en arcos contiguos no son estrictamente paralelo, que se dispone según 2 ordenes alternativos, en que el nodo (el lugar donde los extremos de puntales acercan) de un par de puntales se proyecta al punto medio del puntal del orden contiguo.

Los 2 ordenes de arcos desempeñan diferentes roles:

1. El orden de la estructura primaria, que apuntala el cuerpo, transmitiendo el peso al terreno, que cuenta con puntales metálicos de misma longitud.
2. El orden de la estructura secundaria, que sirve para reforzar la estructura primaria con el fin de mantener la figuración de sí, los puntales de extremos de este orden son más cortos.

Debido a que todos los puntales de la estructura primaria son aislados, La estructura primaria (los arcos con puntales de misma longitud) necesita los puntales de la estructura secundaria para transmitir compresiones de uno a otro (Fig.5-20).

La membrana, el envolvente tensado que sumerge los componentes comprimidos, une los puntales por la tensión de su superficie y transmite la carga a cada puntal.

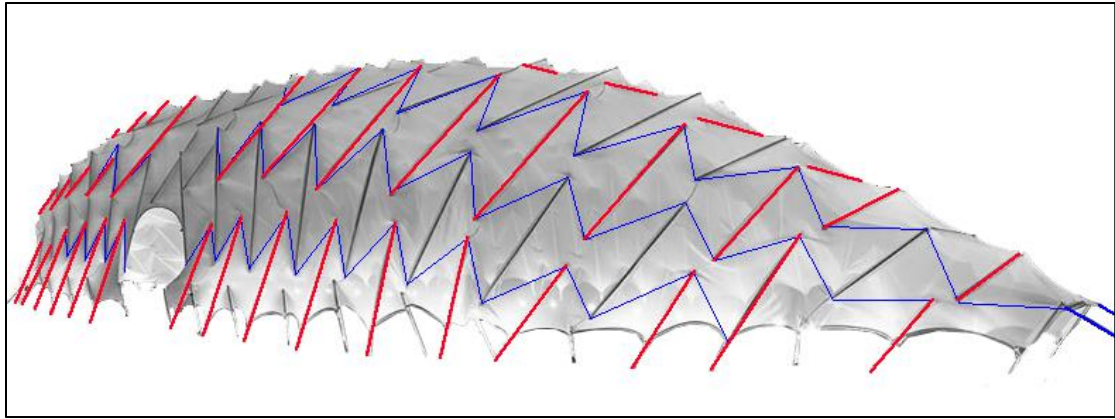


Fig. 5-20

En visión global, la membrana y los puntales de estructura secundaria integran unos miembros longitudinales, extendido por las los tirantes en ambos extremos. Los puntales de la estructura primaria soportan dichas miembros y transmite la carga de una a otra (Fig.5-21).

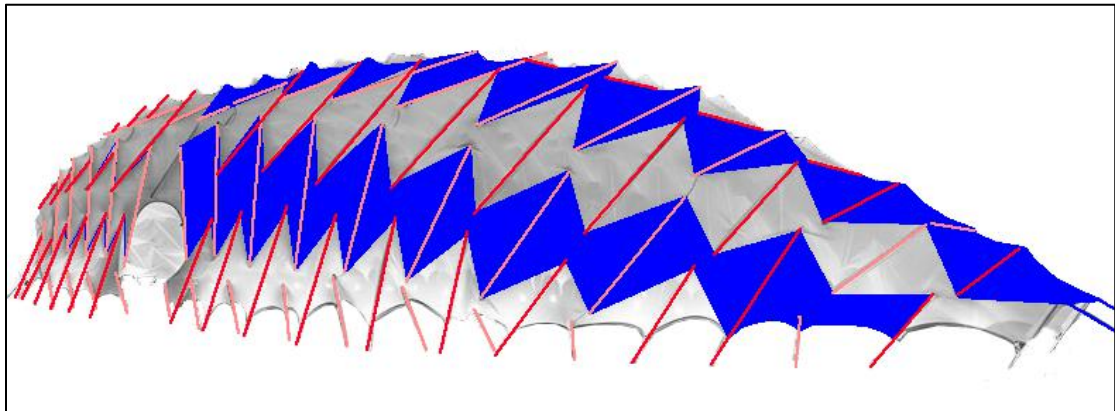


Fig. 5-21

5.2.3. ESTRUCTURA PARCIAL DE TENSEGRIDAD PURA

Se analizar en este párrafo simultáneamente, los proyectos White Rhino y White Rhino II de Kenichi Kawaguchi, debido a que ambo cuenta con configuraciones parecidas de tensegridad.

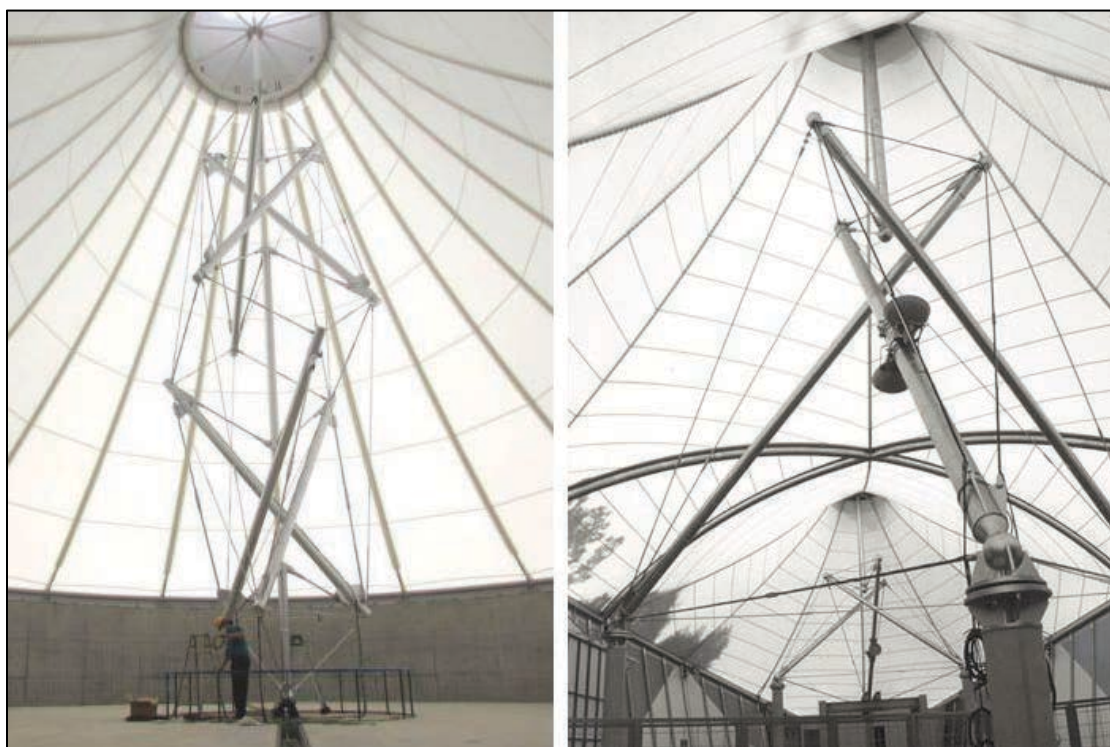


Fig. 5-22

La razón por la cual están divididos en esta categoría es que, al tratarse de pabellones, los sistemas de tensegridad juegan el rol de soportes de la estructura, lo que no sea la función principal de tales proyectos.

Desde el punto de vista de la apariencia, es fácil confundir que los dichos proyectos aplican el módulo "simplex" de tensegridad. Pero en realidad, la célula que constituye la estructura se trata de una derivación de "célula rómbica" y "célula estelar", cuyas definiciones se presentan en el capítulo 4. En "White Rhino II", se presenta un orden, en que se superponen alternativamente los "simplex" y puntales verticales (Fig.5-22).

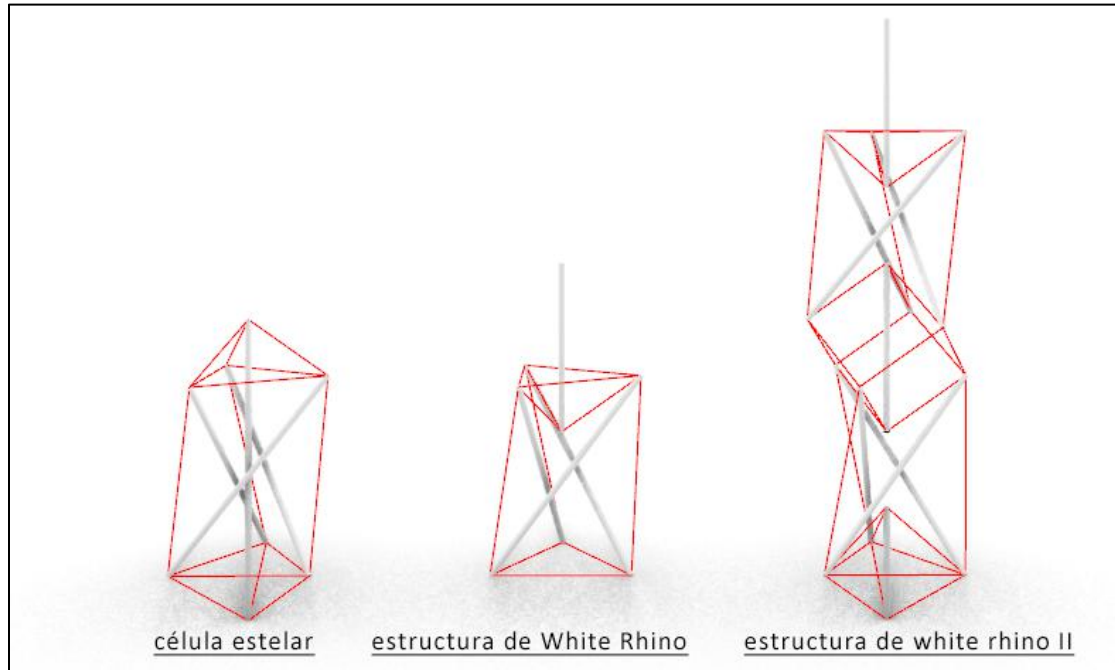


Fig. 5–23

En la estructura real de tales proyectos (Fig.5-23), además de los cables fundamentales que logran equilibrio de la tensegridad, se descubren cables adicionales (los que indicado por líneas azules en la imagen). El autor cree que dichos cables adicionales (Fig.5-24) sirve para la reforzar la estructura fundamental del sistema tensegridad con el fin de reducir el movimiento bajo la carga, especialmente, la torsión de la prisma que menciona en el capítulo 4.1.

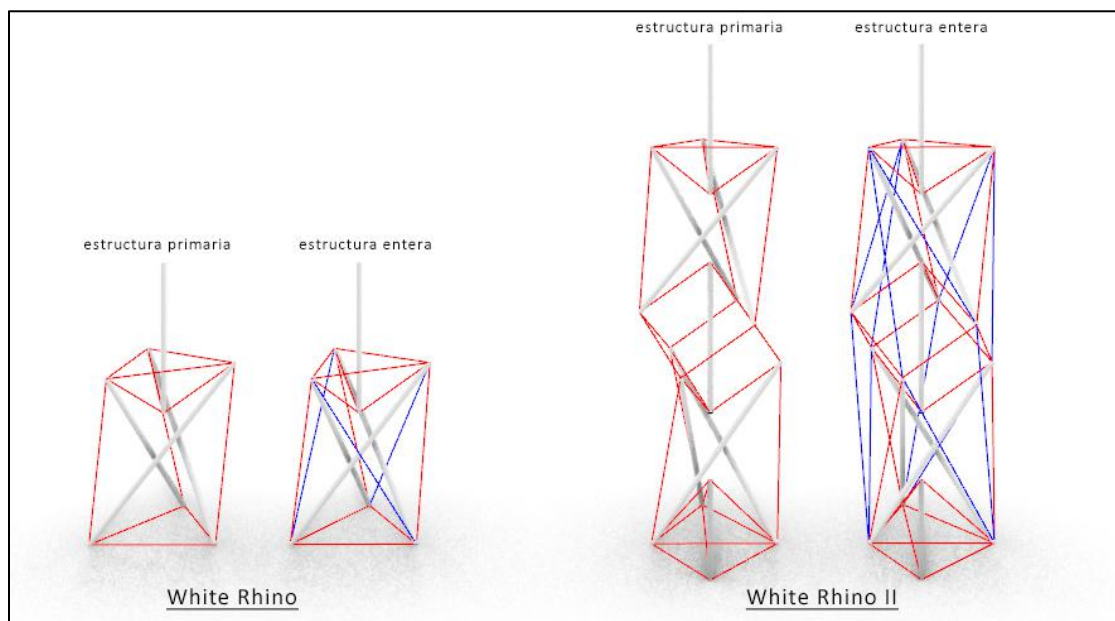


Fig. 5–24

5.2.4. ESTRUCTURA PARCIAL DE TENSEGRIDAD FALSA

En general, en esta categoría, los proyectos no cuenta con la existencia de los sistemas de tensegridad, tanto parciales como globales. Los proyectos son aquellos que cuentan con una estructura tensada y tienen apariencias características similares a tensegridad.

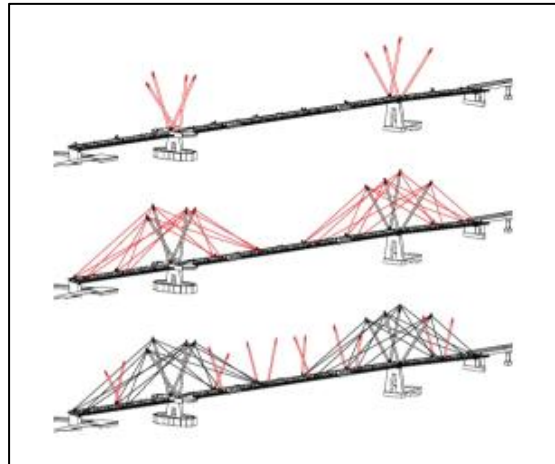


Fig. 5–25

El Puente de Karilpa es uno de tales proyectos. Aunque consiste en miembros de tensegridad tales como cables y barras metálicas (Fig.5-25), el Puente de Karilpa se juzga como un proyecto de estructura parcial de tensegridad falsa. Una razón es que la plataforma de puente se trata de un componente continuo que recorre toda la estructura y apoya a tanto momentos flector como compresión axial. Los mástiles, en este caso, unen con la plataforma y forma una estructura rígida articulada. De modo que los cables funcionan como los tirantes de puente colgante.

Algunos cables y mástiles en este proyecto, surgen equilibrio pero no han generado un sistema “auto-portante” que sea aislado de la plataforma del tal puente.

6. CRÍTICA Y ANÁLISIS

6.1.¿ARQUITECTURA DE TENSEGRIDAD O ARQUITECTURA PARECIDA A TENSEGRIDAD?

Después de resumir el proyecto de tensegridad en el Capítulo 5, no es difícil encontrar que algunos edificios que actualmente se consideran que usan la estructura de tensegridad en realidad no se ajustan a la definición de tensegridad. Es decir, la estructura de tales edificios solo parece tener las características de apariencia del sistema de tensegridad.

Por lo tanto, dará lugar a una pregunta: ¿para la aplicación de tensegridad a la arquitectura, los arquitectos deberían conservar la esencia de la tensegridad o deberían prestar atención a la apariencia de tensegridad?

El autor cree que el aspecto más atractivo del sistema de tensegridad es su apariencia liviana y su increíble capacidad “auto-portante”. Como lo descrito por Fuller, el sistema de tensegridad es “Islas de compresiones dentro del mar de tensiones”, en los proyectos mencionados anteriormente, la apariencia maravillosa es probablemente el punto más repentino en todo el diseño.

Por otro lado, algunos edificios que aplican el sistema de tensegridad podrían entenderse como un reto a la tecnología. Como los pabellones “White Rhino” y “White Rhino II” de Kenichi Kawaguchi, la tensegridad como una estructura de soporte juega un papel en el apoyo de la cubierta en el proyecto. No hay duda de que estos sistemas de tensegridad pueden ser reemplazados por estructuras convencionales más simples, por ejemplo, un pilar metálica reforzada con cables o una columna con pilotes.

En resumen, en lo que respecta a la situación actual, la significación simbólica del sistema de tensegridad fuera más importante que la real en la aplicación a arquitectura. O, como los proyectos de Kawaguchi, existen como la exploración y el reto a la tecnología.

6.2. VALIDAD Y POTENCIAL

Daniel Schodek, reclama que aunque una escultura de tensegridad es una exploración espacial fascinante, esto no significa que tenga un valor estructural especial. El escultor Kenneth Snelson, probablemente la figura más importante en el tema, está realmente convencido de la inviabilidad de aplicar este sistema a cualquier construcción arquitectónica o de ingeniería.

Snelson escribió en su correo a Valentín Gómez:

"Mi creencia, basada en la larga experiencia y en la elaboración de innumerables estructuras de tensegridad de todas las formas y tamaños, es que el principio en sí mismo no es práctico para la construcción de edificios. Como saben, muchos arquitectos e ingenieros han trabajado para ese fin y aún lo hacen. Cincuenta años de eso ahora. Ninguno ha demostrado que exista la más mínima ventaja estructural en su uso para tales fines".

Tal vez Snelson dicho es verdad, estructuras de Tensegridad todavía existen las siguientes ventajas:

- La estructura es ligera, además se pueden agregar nuevos componentes (por ejemplo, cables) para reforzarla.
- El sistema es auto-estable, no necesitan estar anclado o apoyado en cualquier superficie ni depende de la gravedad.
- La rigidez de tensegridad se incrementa al aumentar de un bajo nivel de pretensado.

- Los miembros de una estructura de tensegridad están posicionados con precisión para soportar mejor el estrés.
- Los componentes pueden transferir cargas muy rápidamente, por lo que las cargas no pueden volverse locales. significa que puede absorber fácilmente choques y vibraciones sísmicas.
- La mayoría de los sistemas de tensegridad tienen características plegables.

En resumen, el autor cree que incluso si los edificios actuales no muestran una buena adaptabilidad al sistema de tensegridad, las ventajas de la tensegridad aún se pueden reflejar en algunos casos. Por ejemplo, cuando algunas partes de un edificio deben poder plegarse, o se necesitan estructuras de carpas resistentes a los terremotos que pueden construirse rápidamente después de un terremoto. Además, desde el punto de vista estético, la estructura de tensegridad puede ser adoptada.