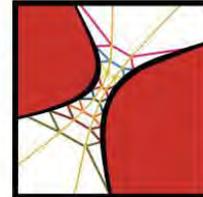


# SLTE PERÚ 2018

VII SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE TENSOESTRUCTURAS

12, 13 y 14 Septiembre

L  
I  
M  
A



## Introducción al diseño de Estructuras Ligeras

\*ALVA SÁNCHEZ, Pedro Antonio

[arqalvapedro@gmail.com](mailto:arqalvapedro@gmail.com)

### Resumen

Estructuras para arquitectos es una revisión del desarrollo de las diferentes estructuras arquitectónicas; partiendo de la definiciones de superficie mínima, que es el área más pequeña abarcada por una curva de espacio dado; de estructura, que es el conjunto de elementos unidos entre sí destinados a soportar fuerzas, donde es necesario que cuenten con rigidez, estabilidad, resistencia, ligereza y que sean capaces de soportar esfuerzo de tracción, compresión, flexión, torsión y cortadura; y, finalmente profundizaremos en el tema de estructuras ligeras, que son mucho más que materiales ligeros, y que están relacionadas con un diseño cuidadoso del flujo de fuerza dentro de la estructura, utilizando el material mínimo requerido para una tarea específica. En esta misma línea, explicaremos las principales características de las estructuras ligeras, como son el concepto del mínimo, la sostenibilidad y la ligereza; y ahondaremos en sus tipos, las geodésicas, las cáscaras estructurales, las tensionadas o membranas a tracción pura y las estructuras neumáticas.

**Palabras Clave:** Estructura, superficie mínima, estructura ligera, geodésica, cáscaras, neumáticas, Tenso Estructura, estructuras neumáticas.

### 1. Introducción

Uno de los elementos que define a la espacialidad arquitectónica y que ha sido utilizado durante muchos siglos, es la superficie; siendo las más empleadas desde mediados del siglo XX, aquellas que parten de los paraboloides hiperbólicos, y que si bien son superficies tridimensionales, se pueden construir usando solo líneas rectas. El concepto que sostiene este tipo de propuesta es el de las superficies mínimas, que ayuda a la proyección de estructuras con diversas formas de diseño y que a pesar de ser simples y ligeras, pueden cubrir una amplia luz entre los apoyos.

Asombrosas esculturas arquitectónicas se han construido según el principio de la superficie mínima, sin embargo, las estructuras basadas únicamente en este principio del mínimo no son comúnmente consideradas como aplicaciones arquitectónicas. La razón de esto se deriva del hecho de que estos sistemas son un ejemplo perfecto en donde la ligereza prevalece sobre la simplicidad.

Se ha demostrado que los techos y las torres se pueden construir con tensegridad, pero aún queda mucho por hacer para convertirlo en un concepto estructural, un método aplicable para la construcción de edificios. Este camino ha sido emprendido por el desarrollo del principio Tensairity que simplifica la separación entre tensión y compresión gracias al uso de aire.

Veamos ahora cómo ha ido evolucionando el concepto de estructuras ligeras y cuáles vienen siendo sus aportes a la construcción moderna.

## **2. Superficies Mínimas**

Las superficies mínimas se definen como el área más pequeña abarcada por una curva de espacio dado. Para poder entender mejor la teoría de las superficies mínimas es importante situarnos en el siglo XIX, donde el físico Belga, Joseph Plateau realizó experimentos que consistían en hacer pompas de jabón y mojar marcos de alambre en una disolución jabonosa. Estos experimentos le permitieron percatarse que las películas de jabón obedecen a un principio muy simple, hacen mínima su área lo que la vuelve más estables, pues su energía potencial es mínima.

Partiendo de estos experimentos, Plateau postula “El Problema de Plateau” basado en tres leyes y desde donde parte la teoría de las superficies mínimas:

- Tres superficies de jabón se intersecan a lo largo de una línea. El ángulo formado por los planos tangenciales a dos superficies que se intersecan, en cualquier punto a lo largo de la línea de intersección de las tres superficies, es de  $120^\circ$ .
- Cuatro líneas todas formadas por la intersección de tres superficies, se intersecan en un punto y el ángulo formado por cada capa es de  $109^\circ 28'$ .
- Una película de jabón que puede moverse libremente sobre una superficie la interseca en un ángulo de  $90^\circ$ .

Frei Otto, arquitecto alemán, parte de las investigaciones de Plateau y las introduce en el campo de la arquitectura, desarrollando de manera teórica y tecnológica los sistemas estructurales tensionados. La forma, según Otto, no estaba predeterminada, sino que surge a partir del diagrama de fuerzas. Basado en estos sistemas estructurales tensionados y el análisis de sistemas naturales de superficies mínimas, desarrolla los sistemas izados de membranas; constituidos por membranas sujetas a mecanismos de poleas y cables, donde se requiere de estructuras rígidas que soporten los componentes móviles.

Las estructuras formadas por las burbujas de jabón fueron en un primer momento un excelente método para la investigación en cuanto a las limitaciones de tracción en las superficies mínimas de las membranas. Los líquidos jabonosos poseen la capacidad de resistir tensión más no de soportar otros pesos; es por eso que la superficie resultante entre los bordes de modelos representa la superficie mínima que debe existir entre tales bordes donde la tensión se dispersa uniformemente sobre toda la membrana. Estas muestran las curvaturas que naturalmente se generan y sus direcciones, lo que evidencia el rango de posibles formas que pueden ser generadas y su tolerancia. De igual forma, al soplar las membranas jabonosas se puede estudiar la resistencia de cargas de viento.

Los avances en tecnología han permitido a los investigadores profundizar en el tema de las superficies mínimas, ver superficies abstractas conocidas y mínimas, modificarlas y verificar sus propiedades. Todo este conocimiento ha sido útil para la aplicación en un mayor campo de investigación de las formas en la arquitectura. Las superficies mínimas son extremadamente estables como objetos físicos, y esto puede ser una ventaja en muchos tipos de estructuras.

Cada vez más diseñadores y arquitectos son conscientes del hecho de que el conocimiento de la forma es un aspecto muy importante en el diseño de las estructuras, es aquí donde se incorpora la teoría de las superficies mínimas usándola para la construcción de techos livianos y para el desarrollo de nuevos modelos de formas para carpas, redes y salas de aire. El menor peso y el uso de menos material, hacen de esta teoría una solución bastante efectiva.

### 3. Estructuras Ligeras

A lo largo de la historia siempre se ha observado a la naturaleza como punto de partida para iniciar cualquier propuesta de diseño. En el desarrollo de las estructuras este concepto no es ajeno, observando la eficiencia de cada una de las propuestas que la naturaleza nos ofrece, tanto en el campo animal, vegetal como mineral, podemos apreciar y aprovechar los principios ordenadores de proporción y simetría; los procesos de formación, crecimiento y los principios de modulación para mejorar nuestras propuestas estructurales, donde la idea de estructura no es solo una combinación de elementos que tienen que soportar cargas exteriores e interiores sino que son el inicio del esqueleto estructural.

Una estructura es un conjunto de elementos unidos entre sí destinados a soportar fuerzas (interiores y exteriores) que actúan sobre ellos; donde es necesario que cuenten con rigidez, estabilidad, resistencia y ligereza; y sean capaces de soportar esfuerzo de tracción, compresión, flexión, torsión y cortadura.

Las estructuras ligeras son mucho más que materiales ligeros, están relacionadas con un diseño cuidadoso del flujo de fuerza dentro de la estructura, utilizando el material mínimo requerido para una tarea específica. Desde un punto de vista estructural, los cables bajo tensión son extremadamente eficientes, ya que la resistencia del cable es independiente a su longitud y sólo depende de la fuerza del material. Sin embargo, cuando hay tensión, también hay compresión, y donde hay compresión la longitud sí importa. El riesgo de pandeo exige, por lo tanto, secciones transversales más grandes y más material, teniendo como resultado el uso de columnas, que son más pesadas y más gruesas que los cables. La separación constructiva de la tensión y la compresión es el mayor logro de las estructuras ligeras, cuyo principio está completamente adaptado en estructuras de tensegridades. (Fuller, 1975; Pugh, 1976).

#### 3.1. Características de las Estructuras Ligeras

##### a) El Concepto del Mínimo

El mínimo está estrictamente relacionado con lo natural. Superficies mínimas, volúmenes y distancias están presente en la naturaleza, aprender de la naturaleza es un tema que ha sido extensamente investigado en la arquitectura contemporánea (Portoghesi, 1999).

En el campo de la arquitectura, el concepto de mínimo significa óptimo, ligero y eficiente; y, se encuentra en la base de cualquier construcción de membrana ligera y es el secreto de su simplicidad. En matemáticas, las superficies mínimas han significado una curvatura igual a cero, es decir, estas superficies tienen las propiedades interesantes de minimizar su área sujeta a restricciones.

Los experimentos físicos realizados para determinar las superficies mínimas, se llevaron a cabo sumergiendo un marco de alambre en una solución de jabón (figura 1), siendo el resultado aquella superficie (mínima) que puede conectar los bordes.



Figura 1: Form Finding Process: Proceso de formación

Método de búsqueda de formas utilizando una película de jabón (forma anticlástica y sinclástica)

Las estructuras mínimas no son solo las que usan la cantidad mínima de material, a partir de uno de los puntos de vista del diseño, el concepto de mínimo juega un papel clave en la definición de la forma y fuerzas dentro de una construcción ligera. Dado que la forma de estructuras ligeras se deriva de las fuerzas que actúan dentro de la propia estructura, al controlar estas fuerzas, es posible controlar la forma de toda la estructura y optimizar el diseño final.

Por otro lado, las estructuras a tracción encuentran su forma mínima al reaccionar a las fuerzas que se les aplican y encuentran una forma equilibrada bajo una carga dada, donde solo hay tensión en la membrana. Además, al minimizar las fuerzas, se pueden reducir secciones de materiales. Es por eso que al aplicar cargas y restricciones específicas, el comportamiento de toda la estructura puede ser mejorada y por lo tanto, minimizada. (Maffei, 2009)

## **b) Sostenibilidad**

La sostenibilidad está relacionada con la cantidad de material utilizado para construir una estructura; ya que, cuanto menos material se use, menos energía se requiere, menor contaminación y menor material de desecho. Es decir, la sostenibilidad parte de la idea de menos es más.

En el caso de las construcciones ligeras, las estructuras están diseñadas para reaccionar a las fuerzas externas de la manera más eficiente, por ello la cantidad de material utilizado es estrictamente requerido para soportar las condiciones de carga. Solo los esfuerzos de tensión y compresión están presentes mientras que los esfuerzos de flexión y torsión son eliminados. Esta es la razón por la cual los elementos estructurales pueden ser delgados.

## **c) Ligereza**

Por lo general la característica de "ligereza" parte de una comparación donde algo es más pesado; sin embargo, en arquitectura, la definición de esta característica debe abordarse mejor. Es así que cualquier estructura que pueda llevar mucha más carga que el peso de la estructura en sí misma, se considera generalmente "ligero". Esto está en contraste con las estructuras tradicionales, donde se utilizan ladrillos, hormigón o estructuras de acero; y en las cuales la capacidad de carga es igual o incluso menor que el peso de la estructura de soporte.

Los componentes de las estructuras ligeras, como por ejemplo, membranas, puntales, postes, cables, tensores, son visibles tanto desde el exterior como desde el interior en una composición que tradicionales, donde los componentes estructurales generalmente se ocultan detrás de los elementos del acabado y cuyas texturas y formas se consideran más atractivos para los sentidos. Aunque las estructuras ligeras pueden estar pintadas, galvanizadas o chapadas, la estructura en sí, al ser claramente visible, se convierte en la arquitectura de la forma y el espacio.

Por ejemplo, las estructuras de textiles, son tan ligeras, que su peso es casi insignificante en comparación con las cargas que pueden llevar. Además, los materiales de los que están hechos, como textil y cables, son muy flexibles, por lo tanto, no hay rigidez a la flexión. Esto quiere decir, que debemos aprovechar otros medios para dar estabilidad y fuerza a un sistema estructural que consiste en textiles; se requiere de un diseño específico de forma geométrica (forma de la superficie), mientras se está sujeto a un patrón específico de tensiones interiores (patrón pretensado). La geometría de una estructura a tracción no es, por lo tanto, arbitraria (Berger, 1996).

## **3.2. Tipos de Estructuras Ligeras**

### **a) Geodésicas**

Si bien el término geodésico fue utilizado por primera vez por Hertz, el descubridor de las ondas electromagnéticas, es Fuller quien lo define como la relación más económica entre una pluralidad de puntos o sucesos. El origen de las geodésicas parte de las estructuras de generación poliédrica, donde a partir de la subdivisión geométrica de los poliedros, obtenemos infinitud de soluciones poliédricas a partir de sus derivaciones y truncamientos.

Buscando describir las diferencias de fuerza entre un rectángulo y un triángulo, Fuller aplica presión a ambas estructuras, y encuentra que el triángulo es más rígido y soporta la presión, mientras que el rectángulo se dobla y es inestable; siendo el triángulo el doble de fuerte. Este principio dirigió sus estudios hacia la creación de un

nuevo diseño arquitectónico, el domo geodésico, descubrió que si una estructura esférica se creara a partir de triángulos, tendría una fuerza sin igual.

La esfera o domo geodésico, utiliza el principio de "hacer más con menos", ya que encierra el mayor volumen de espacio interior con la menor cantidad de superficie, lo que permite ahorrar en materiales y costos. La estructura esférica de una cúpula es una de las atmósferas interiores más eficientes para viviendas humanas, esto porque el aire y la energía pueden circular sin obstrucción lo que permite que la calefacción y la refrigeración se produzcan de forma natural. Los refugios geodésicos se han construido en todo el mundo en diferentes climas y temperaturas y han demostrado ser el refugio humano más eficiente que uno puede encontrar.

El domo geodésico es eficiente porque su área de superficie reducida requiere menos materiales de construcción; la exposición al frío en el invierno y el calor en el verano se reduce porque, al ser esférica, hay la menor área de superficie por unidad de volumen por estructura; el interior cóncavo crea un flujo de aire natural que permite que el aire caliente o frío fluya uniformemente a través de la cúpula con la ayuda de los conductos de aire de retorno; la turbulencia extrema del viento se reduce porque los vientos que contribuyen a la pérdida de calor fluyen suavemente alrededor de la cúpula; y, actúa como un tipo de reflector de faros descendentes gigantes, refleja y concentra el calor interior, lo que ayuda a prevenir la pérdida de calor radiante.

Históricamente, la primera cúpula o domo geodésico se construyó en 1922 en la azotea de los talleres Carl Zeiss en Jena, Alemania. Walter Bauersfeld partió del icosaedro subdividiéndolo según la frecuencia 16, la estructura constó de 3480 barras y se cubrió con ferrocemento, en su interior se desarrolló un planetario conocido como La Maravilla de Jena. A partir de este momento la evolución de las cúpulas geodésicas está muy ligada a R. Buckminster Fuller.



Figura 2: Biosfera de Montreal Expo Mundial 1967, diámetro de 76 m., 41.5 de altura y pesó 53 kg/m<sup>2</sup>.

Fuller diseñó cúpulas para EEUU debido a que las carpas eran lentas para armar y no satisfacían las necesidades de la Marina. Fueron 47 tipos de refugio que iban desde una cúpula de 110 m. de diámetro para aviones, hasta un refugio de cartón de 4.26 m. de diámetro, desechable apodado "Kleenex". En 1954, una cúpula de cartón ondulado, en donde figuraban impresas las instrucciones para su armado, obtuvo el primer premio en la Trienal de Milán. Tenía 10.9 m de diámetro. Posteriormente se experimentó con estructuras para soportar vientos de 250 Km/h, temperaturas bajo cero y que fueron transportadas al Círculo Polar Ártico.

Si bien es cierto que se experimentó con muchos materiales industriales y fabricación en serie, a finales de los 60, estas estructuras tuvieron gran difusión en las comunidades hippies norteamericanas. Lo interesante es que los hippies asocian estas estructuras a la contra cultura, a la vida en comunidad, a hacer más con menos y por supuesto a la ecología; en lugar de pensar en una construcción industrializada y con elementos estructurales seriados, las adaptaron y con material de desecho o reciclado construyeron grandes hogares multifamiliares, en donde el gran espacio que brinda la forma semiesférica acogía a un gran núcleo familiar.



Figura 3: DOM (E) vivienda Geodésica eficiente para cualquier estación.



Figura 4: Vivienda Domo Florida, EEUU



Figura 5: People's Meeting Dome, Denmark

La desventaja o dificultad para construir una forma circular o esférica es que requieren más planificación y tienden a crear más desperdicio. Sin embargo, la alta resistencia sísmica, la utilización de sólo 1/3 de material de una vivienda convencional; y la forma aerodinámica que lo caracteriza, convierten a las geodésicas en construcciones eficientes y económicas.

### b) Cáscaras Estructurales

La cáscara es una superficie curva delgada, continua o facetada que, típicamente, lleva la carga de manera eficiente con poca o ninguna flexión. La forma geométrica de una cáscara permite transmitir fuerzas dentro de la superficie a través de la compresión y la tensión. La carga eficiente produce delgadas estructuras con materiales eficientes en comparación con las estructuras en flexión.

Las cáscaras o estructuras laminares de hormigón armado, también conocidas como “*Thin Concrete Shells*”, aparecen a mediados del siglo XX. Son estructuras que se caracterizaban por su forma laminar, resistente, eficaz y esbelta; donde el espacio habitable estaba definido por el envolvente de su propia forma geométrica, y el material utilizado complementaba y unificaba la estructura; optimizando sus características de forma, adaptación y resistencia.

El concepto del proceso de formación de las cáscaras se puede resumir de la siguiente manera: la forma sigue a la fuerza. La forma estructural está determinada por las fuerzas a las que está sometida, de modo que las cargas se transportan de manera eficiente. Cuando esforzamos el consumo de material mínimo, la optimización de componentes individuales no es suficiente. Según Schober: *“el proceso de formación donde el total del comportamiento estructural es definido por la geometría, es más eficiente que cuando solo se considera la optimización estructural.”*



Figura 6: L' Oceanographic, Arq. Félix Candela

Figura 7: Hipódromo de la Zarzuela, Ing. Eduardo Torroja

Entre las desventajas y los motivos por los que se dejaron de utilizar este tipo de estructuras tenemos que económicamente no eran tan cómodos, ya que los encofrados y los soportes eran complejos y la mano de obra era elevada; no eran considerados como propuestas prácticas en cuanto a la instalaciones de tabiques, iluminación, mobiliario, ventanas, entre otros; dificultades al momento de desarrollar los análisis de cálculo, por lo que la única manera de realizarlo era a partir de modelos físicos a escala; la oscuridad generada por el envolvente, que a pesar de ser ligero no permitía el ingreso de luz natural; la falta de aislamiento térmico; y, no eran rentables como construcciones.

Entre las ventajas actuales de este tipo de estructuras, encontramos que son propuestas arquitectónicas donde la forma y la estructura son la misma; son naturales y estéticas si evitamos o disminuimos los esfuerzos de flexión; son propuestas que trabajan principalmente a compresión y saben aprovechar las ventajas del material, los análisis estructurales son fáciles y sencillos; presentan mejores propuestas para proteger del ruido y almacenamiento de calor y finalmente gracias a los avances tecnológicos el tema de los encofrados de forma libre ha dejado de ser costoso.

Una derivación de las cáscaras estructurales son las cáscaras entramadas, donde la forma está compuesta por un apropiado sistema de bordes y vértices, la relación espacial de los vértices es tal que las cargas impuestas son transportadas por fuerzas axiales en las direcciones de los bordes; y, los bordes y los vértices están representados físicamente como miembros estructurales y nodos entramados (malla o grilla).



Figura 8: Cáscara entramada - Travis Park  
Universidad de Texas, San Antonio.

### c) Membranas a Tracción Pura: Tensionadas

En 1955 Frei Otto presenta en su tesis de doctorado la primera publicación sobre las membranas a Tracción “Das Hängende Dach” que significa “El Techo Colgado”, traducida en tres idiomas. En 1964 como director del Instituto de Diseño de Estructuras Ligeras (IILEK) desarrolló el proyecto “SFB64” con la mayor cantidad de investigación en el campo, siendo uno de sus más grandes postulados el de la “Superficie Mínima”, solución aplicada para cubrir la mayor cantidad de área con la menor cantidad de material.

Las membranas a tracción pura son estructuras elaboradas con cables, puntales (mástiles) y textiles sometidos a tracción, que generan diseños de gran variedad y belleza utilizadas como cubiertas y cerramientos en estadios, coliseos, parques, centros comerciales, bares, aeropuertos, plazuelas de comidas, instalaciones deportivas, centros recreativos entre otros.

Dentro de sus principales características podemos destacar la facilidad para cubrir áreas de grandes dimensiones, la facilidad para diseñar propuestas arquitectónicas a favor del medio ambiente, ya que solo necesitan de algunos puntos para ser instaladas a diferencia de las construcciones tradicionales; la protección diurna de los rayos solares y la posibilidad de brindar iluminación nocturna como una gran lámpara urbana; y, la facilidad en el proceso constructivo.



Figura 9: Estadio Olímpico de Munich, Alemania



Figura 10: Pier Six Pabillion, Baltimore, EEUU.

Otras de las características son las propuesta modulares que pueden llegar a ser de posibilidades ilimitadas en cuanto a diseño, variedad formal y estética; estas membranas son de gran facilidad para el proceso de fabricación, traslado e instalación, ahorrando en material y en el tema de cimentación y estructura por ser muy livianas; son de fácil mantenimiento; y, tienen la capacidad de ser temporales es decir, armables y desarmables por variados periodos de tiempo.



Figura: 11 Centro de Tránsito Rosa Parks, Detroit



Figura: 12 Rainbow Serpent Festival 2018, Australia

Las membranas a tracción se caracterizan por la predominancia de fuerzas de tensión en sus sistemas estructurales y por la limitación de los esfuerzos de compresión y pocos elementos de apoyo. Por lo tanto, estas estructuras ligeras no requieren de la misma cantidad de materiales de construcción necesaria en los edificios convencionales para absorber el pandeo y momentos de flexión en la compresión de sus partes. Las membranas están pretensadas por medio de fuerzas inducidas, que se mantienen cuando ninguna otra fuerza, como es el peso muerto o alguna carga exterior, actúa sobre los sistemas estructurales.

Desde el punto de vista tecnológico, el tipo de material y capacidades mecánicas son nuevas, con un aprovechamiento máximo tanto en su peso como en su economía, es decir, se logra la cobertura de espacios habituales con el mínimo de material y el menor costo, cubriendo grandes espacios con enorme facilidad; se rompe con los cánones clásicos y tradicionales de la Arquitectura, teniendo como consecuencia lógica, nuevos diseños producto de la combinación de tecnología y necesidades funcionales del espacio.

#### d) Estructuras Neumáticas

Antes de hablar de las estructuras neumáticas tenemos que referirnos a los experimentos con globos de aire, que son el punto de inicio para las mismas. En el siglo XVIII los Hermanos Montgolfier construyen el primer globo de aire caliente y el primer globo de hidrógeno, que luego con el aporte de Charles Jacques se convertirían en los zepellins, (grandes dirigibles) a finales del siglo XIX. Sin embargo, la idea de utilizar la tecnología de los dirigibles en la arquitectura, fue del ingeniero Lanchester, quien patentó un sistema neumático para emergencias.

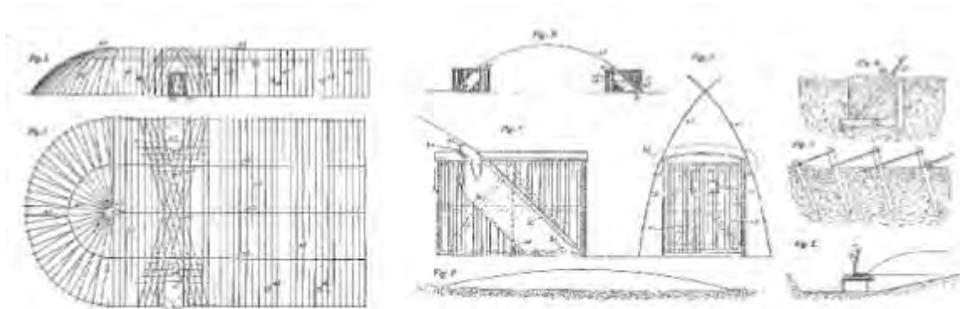


Figure 2: Details of Lanchester's patent for inflated tents (1918) (Herzog, 1977)

Figura: 13 Detalle de la patente del Ing. Lanchester de la carpa neumática de emergencias

Entre las ventajas actuales de este tipo de estructuras tenemos la reducción de los costos de funcionamiento debido a la simplicidad del diseño, la facilidad y rapidez durante el de montaje , desmontaje y reubicación; el espacio interior está totalmente libre, sin obstáculos físicos; las propuestas pueden ser personalizadas en cuanto al tamaño y color incluyendo textiles translucidos para el ingreso de luz natural; y, cuenta con una capacidad de cobertura ilimitada.



Figura 14: Ejemplos de Estructuras Neumáticas  
(Expo Osaka 70, Pabellón Fuji y el Pabellón Americano)

Entre las posibles limitaciones o inconvenientes tenemos que es necesario el funcionamiento continuo de los equipos de ventilación para mantener la presión, siendo necesario en ocasiones de una fuente de alimentación de emergencia; así también, podría darse el derrumbe de la estructura en caso se diera una pérdida de aire o rotura del textil; es necesario contar con un aislamiento térmico inferior al de las edificaciones convencionales, lo que podría aumentar el costo tanto en refrigeración como en calefacción; tienen una capacidad de carga limitada; y, el tiempo de vida de la estructura es corta comparada con las edificaciones convencionales y requiere de grandes costos de mantenimiento.

A pesar de estas limitaciones, algunas edificaciones neumáticas han demostrado un buen rendimiento complementario a otros sistemas estructurales, como el Jardín del Edén (Figura 15) del arquitecto Nicholas Grimshaw, ubicado en Cornwall, Inglaterra o el Centro Acuático Nacional más conocido como el Cubo de Agua (Figura 16), diseñado por la firma PTW Architects australiana ubicado en Beijing, Japón.



Figura: 15 Jardín del Edén, Cornwall, Inglaterra



Figura: 16 Centro Acuático Nacional, Beijing, Japón

Las aplicaciones más frecuentes para este tipo de estructuras están relacionadas con actividades de ocio, ya que ofrecen una variedad de diseños donde los materiales y componentes son ensamblados con el objetivo de divertir y agitar la imaginación de los visitantes. Se utilizan grandes estructuras inflables, ya sea para interiores o cuando la capacidad de carga requerida es mínima; con membranas de doble capa que se mantienen estables soplando aire continuamente a través de ellas. Este tipo de estructura puede considerarse como algo intermedio entre salas de aire tradicionales (por ejemplo, el techado de las canchas de tenis) y las estructuras neumáticas.

Eventos especiales estructuras neumáticas:



The Modern Teahouse en Frankfurt, Alemania



El pabellón japonés para la Expo 2010



Pabellón de la paz 2012, Londres, Inglaterra

**Bibliografía:**

Berger H., (1996), Light Structures - Structures of Light: The Art and Engineering of Tensile Architecture, Birkhauser Verlag, Base.

Cassinello, P.: “Félix Candela. Centenario/Centenary 2010”. Topic: “Félix Candela en el contexto internacional de la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna/Thin concrete Shell” (pp. 61-109). Universidad Politécnica de Madrid and Fundación Juanelo Turriano. Spain. Editor Pepa Cassinello.

Fuller R. B., (1975), Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking, MacMillan Publishing Co., Inc., New York.

Green, H & Lauri, D., (2017) “Form Finding of Grid Shells a Parametric Approach using Dynamic Relaxation” Stockholm

Luchsinger R. H. et al., (2004), The new structural concept Tensairity: Basic Principles, in Progress in Structural Engineering, Mechanics and Computation, ed A. Zingoni, A.A. Balkema Publishers, London.

Maffei R. (2009), Innovative lightweight construction: water and membrane, Master thesis, Politecnico di Milano.

Maffei R. Sheltering in Emergency: Processes and Products Textile kit for immediate response. Tesis (Doctorado en Tecnologia e Progetto dell'Ambiente Costruito ciclo xxv). Milán, Italia. Politécnico Di Milano, Dipartimento Scienza e Tecnologie dell'Ambiente Costruito, 2012 .254 h.

Otto F. (2004), On the Way to an Architecture of the Minimal, in "Brian Forster", Marijke Mollaert (eds), European Design Guide for Tensile Surface Structures, TensiNet, Brussel.

Portoghesi P., (1999), Natura e architettura, Skira, Milano

Pugh A., (1976), An introduction to tensegrity, University of California Press, Berkely.

Schober H.; Transparent Shells Form Topology Structure. Berlín, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn, 2015.

About Fuller [en línea]

<<https://www.bfi.org/about-fuller/big-ideas/geodesic-domes>>

[Consulta: 01junio 2018]

An outline of evolution of pneumatic structures [en línea]

<<http://www.urbain-trop-urbain.fr/wp-content/uploads/2011/05/Evolution-of-pneumatic-structure.pdf>>

[Consulta: 22 mayo 2018]

Arquitectura neumática [en línea]

<[https://issuu.com/pablорubinstein/docs/presentacion\\_arquitectura\\_neumatica](https://issuu.com/pablорubinstein/docs/presentacion_arquitectura_neumatica)>

[consulta: 09 agosto 2018]

Cúpulas y cascaras de concreto [en línea]

<<https://www.scribd.com/doc/114026952/Cupulas-y-cascaras-de-concreto>>

[consulta: 15 junio 2018]

De Las superficies mínimas, las pompas de jabón y otras construcciones óptimas [en línea]

<[http://www.uam.es/departamentos/ciencias/matematicas/premioUAM/premiados1/superficies\\_minimas.pdf](http://www.uam.es/departamentos/ciencias/matematicas/premioUAM/premiados1/superficies_minimas.pdf)>

[Consulta: 29 junio 2018]

Simply differently.org\_ Temporary buildings: studying, planning, building and living in [en línea]

<<https://simplydifferently.org/Dome>>

[consulta: 03 junio 2018]