


Diseño de una cubierta hiperbólica plegable tensada

Design of a tensioned folding hyperbolic roof

Design de um teto hiperbólico dobrável tensionado

Carlos Cesar Morales Guzmán. Ph.D.
dr.arqmorales@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-4499-6968>
Universidad Veracruzana, México.

Recibido: Septiembre 11 de 2018
Aceptado: Noviembre 23 de 2018
Publicado: Diciembre de 2018

RESUMEN

Se procesa la adecuación geométrica descriptiva de un sistema transformable, y cómo simular la modelación de sus partes por medio de un software que ayuda a concebir las interpretaciones de diseño de una geometrización hiperbólica. La modelación a escala apoya mucho a interpretar los movimientos de un sistema transformable, para generar un sistema flexible, el que se propone una piel de tenso estructura que ayuda a crear una estructura fácil de transportar y construir en sitios variables. Por esto, la investigación se centró en procesar los detalles experimentales y diseñarlos en 3D, para verificar la pertinencia de diseño de uniones articuladas.

Palabras Claves: Adecuación constructiva; metodología del diseño por simulación; modelación experimental.

ABSTRACT

The descriptive geometric adaptation of a transformable system is processed, and how to simulate the modeling of its parts by means of a software that helps to conceive the design interpretations of a hyperbolic geometrization. Scale modeling is very supportive of interpreting the movements of a transformable system, to generate a flexible system, which proposes a skin of a tense structure that helps create a structure that is easy to transport and build in variable sites. Therefore, the research focused on processing the experimental details and designing them in 3D, to verify the design relevance of articulated joints.

Keywords: Constructive adaptation; design methodology by simulation; experimental modeling.

RESUMO

A adaptação geométrica descritiva de um sistema transformável é processada e como simular a modelagem de suas partes por meio de um software que ajuda a conceber as interpretações do design de uma geometrização hiperbólica. A modelagem de escala é muito favorável à interpretação dos movimentos de um sistema transformável, para gerar um sistema flexível, que propõe uma estrutura tensa que ajuda a criar uma estrutura que é fácil de transportar e construir em locais variáveis. Portanto, a pesquisa concentrou-se no processamento dos detalhes experimentais e na sua concepção em 3D, para verificar a relevância do design das articulações articuladas.

Palavras-chave: Adaptação construtiva; metodologia de design por simulação; modelagem experimental.

Como citar (APA)

Morales Guzmán, C. (2018). Diseño de una cubierta hiperbólica plegable tensada. *Procesos Urbanos* 5:91-105. DOI: <https://doi.org/10.21892/2422085X.414>



Introducción

En la actualidad, las estructuras compuestas por elementos traccionados y comprimidos son estructuras altamente eficientes, por el gasto mínimo de material que requieren, llegando así a cubrir grandes claros. Una de sus ventajas es de optimizar y reducir al límite la cantidad de material constructivo. Esto se traduce en mejores condiciones de resistencia frente a las fuerzas de la naturaleza. Y, al reducir la masa del edificio, es menos vulnerable al colapso en zonas sísmicas.

Otro gran beneficio es el ahorro energético en la producción y combustibles por traslado de los componentes constructivos, lo que se traduce en un menor costo e impacto sobre el medio ambiente. Estas ventajas, sumadas al desarrollo industrial de nuevos materiales con gran resistencia a las deformaciones y poco peso específico, ponen a nuestro alcance un sistema constructivo con gran potencial para cubrir extensos espacios.

Este gran avance, en el mundo de las estructuras, fue posible al realizar y manufacturar materiales cuyo peso propio y rigidez son casi despreciables, pero trabajadas bajo una lógica estructural que los hace poco deformables, aun estando solicitadas por cargas externas. Esta aparente resistencia se logra bajo la geometrización de las estructuras, encontrado formas que favorezcan el equilibrio estructural de las formas geométricas. Con esto se mejora la distribución de los esfuerzos. Ejemplos de este tipo de geometrías son la parábola, la catenaria, la circunferencia, la elipse. Este tipo de formas ayuda a sustentar grandes claros, generando un tipo de estructura nuevas. En el caso de esta investigación, nos enfocaremos a sistemas ligeros, versátiles, flexibles, con capacidad de moverse y colocarse en otro lugar; esto aumenta considerablemente las posibilidades de adaptarse en casi cualquier entorno.

Otro punto es la justificación del planteamiento a resolver en la investigación que, en este caso, es mejorar los espacios de esparcimiento dentro de un contexto arquitectónico cultural de gran impacto a nivel internacional. Al igual que los fundamentos metodológicos con el cual está conformado el planteamiento del problema que se detectó en las etapas iniciales de la investigación, se presentan también los objetivos a alcanzar en la investigación y la metodología empleada para lograrlos. Es de destacar que este tema tiene una orientación tecnológica en el campo del desarrollo de la construcción experimental de las estructuras de rápido montaje.

Se realizarán modelos, con la finalidad de comprobar la factibilidad de construcción de dicho modelo. Se diseñan las uniones, las conexiones y los nodos necesarios para aprovechar al máximo la eficiencia estructural del modelo.

Metodología Conceptual

En la arquitectura actual hay una gran variedad de desarrollos tecnológicos industriales, que aportan una diversidad de sistemas estructurales que se pueden proponer para concebir un espacio arquitectónico, acondicionado a los cambios sociales de los usuarios, que surgen de sus necesidades de transformar su espacio habitual que le proporcione una mejor calidad de vida. Es por ello que, en la actualidad, la edificación tiende a ser más esbelta y de fácil evolución. Esto implica que el diseño de un sistema estructural sea más ligero y de rápida transformabilidad. Para conseguir esto, es necesario contar con un mapa de guía, en el que analizaremos, como patrón, las

variadas adecuaciones que pueden llegar a tener este tipo de estructuras.

La innovación en este tipo de sistemas estructurales implica la elaboración de diseños en el perfeccionamiento de las uniones, pues que se considera que el detalle de las uniones es un punto total para la construcción de estos sistemas estructurales transformables, en los que se analizan de manera puntual la distribución de los esfuerzos que actúan sobre ellas, para evitar los movimientos desfavorables a la hora de izamiento, con lo que se consigue alcanzar una mayor eficiencia en el desplegado de sus partes y por añadidura, la adecuación de la forma para obtener el llamado Form Finding que ayuda por medio de la geometrización de los puntos de unión a alcanzar en este en este tipo de estructuras, la adecuación de la forma con mayor exactitud. Aunque hay otros métodos para el proyectar este tipo de geometrías, como son, por mencionar algunas, el de densidades de fuerza, el método de relajación, etc., las cuales ayudan a encontrar la forma adecuada, pero no con la característica de retraerse, por lo que en este caso, se hará uso de dos métodos: el método matricial, por modelación matemática; y el método geométrico descriptivo, que siempre verifica, por medio de la matemática básica de modulación, conseguir la conformación de sus dimensiones.

El principal logro de esta investigación estará basado en el manejo de un sistema de fácil transformación y construcción, el cual puede ayudar a crear una estructura más eficiente y con mejores grados constructivos comparados con el uso de otros sistemas. Es por ello que nos dimos a la tarea de formar tablas comparativas y la utilización de modelos físicos, con el afán de entender el concepto estructural del proyecto, con la mira puesta en la creación de un sistema de estructura plegable. Para tener una idea de cómo diseñar este tipo de estructuras, consideraremos una serie de recomendaciones que los expertos en la materia invitan para el diseño de este tipo de estructuras, (Figura 1), en la que podemos observar que el Dr. H. Berger provee una serie de parámetros para encontrar, de manera puntual, el diseño de una estructura ligera. Y esta tabla servirá como referencia para elaborar nuestro mapa conceptual en la construcción del sistema y de cómo confeccionar la metodología de investigación en la búsqueda de un sistema retráctil tensado.

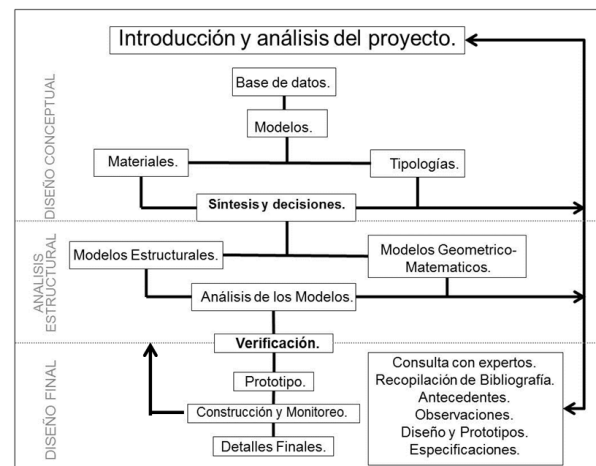


Figura 1. Desarrollo del esquema conceptual de procedimiento de diseño de un sistema retráctil tensado, basado en el esquema del Dr. H. Berger.

Fuente: Light Structures, Berger. (Morales, 2013).

Por último, analizaremos la tecnología que se encuentra disponible para la generación de estos espacios arquitectónicos, los mismos que pueden ser edificados bajo un sistema estructural más resistente, ligero y de muy fácil manejo. Esto conlleva a mejorar la versatilidad de la estructura en el espacio, la capacidad de crecimiento, la estandarización dimensional, un sistema de uniones y ensamblajes que se puedan manipular repetidamente.

Principios Conceptuales de Sistemas Plegables

Para desarrollar modelos de formas básicas plegables, se realizan esquemas básicos que faciliten el entendimiento de las nuevas transformaciones del espacio arquitectónico. La morfología-conceptual de los siguientes modelos es para conseguir la segmentación de casi cualquier figura transformable, con la pequeña característica del uso de tijeretas plegables, que se explicará durante toda la investigación: generar geometrías estructurales flexibles, en este caso, nos ayudará a forjar las formas más aproximadas para generar una malla plegable hiperbólica, ya que su formación de diseño se conseguirá por las iteraciones que nos producen la malla plana deformada en curvas parabólicas. Pero, en este tema, sólo se utilizará para generar formas retractiles básicas. Para entender un poco lo que se concebirá, se experimenta con tres modelos de tijereta, en la que cada una de ellas tendrá un modelo geométrico basado en principios matemáticos y graficado con base en los principios matemáticos que sean derivados de cada experimento.

Para entender la obtención de la forma de este tipo de estructura (Figura 2) se elaboró esta tabla que contiene los principios básicos que debe poseer una estructura geoméricamente plegable. Si esto no está contemplado, la flexibilidad estructural del sistema no se dará. Teniendo este principio básico, se podrá hacer la traslación geométrica matemática o descriptiva de estructura que se experimenta, para así generarle una serie de iteraciones y modulaciones arquitectónicas que conllevará a una serie de propuestas geométricas.

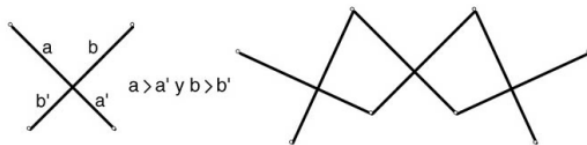
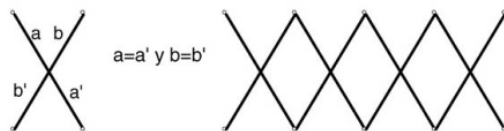


Figura 2. Formas básicas para generar una estructura plegable. Sistema de Tijera: Este sistema de tijera es llamado también por la bibliografía "Pantógrafo", el cual se basa en un nudo intermedio pivotante y dos ubicados en los extremos, estos puntos pivotantes tienen total grado de libertad entre dos barras en el eje perpendicular del plano del pantógrafo.

Fuente: Escrig, (1984).

Referentes Constructivos Plegables

Los referentes históricos de los sistemas plegables, se investigaron con base en procedimientos constructivos que nos ayudarán a poder construir el prototipo final de la investigación. El procedimiento del despliegue de la estructura es una de las

etapas más importantes de la construcción de la estructura plegable, por lo que se realiza la siguiente explicación bajo el referente de un módulo experimental que desarrolló el Grupo Estran, del Dr. Carlos Hernández, de Venezuela, en donde el sistema se basó en la simplificación constructiva de uniones, como la que se desarrolló en este prototipo, (Figuras 3 y 4). Por ello, la transportación es vital, ya que la cubierta debe estar empaquetada y plegada para poder ser transportadas en un vehículo. Otro aditamento constructivo es colocar una placa en los nodos donde se sostendrá el amarre de la grúa (Figuras 5. al 10). Serán 9 nodos de soporte en donde se agarra el nodo en la grúa. Este se alzará y bajará las aspas por gravedad; con guías de sogas se desplegarán las aspas de manera más segura, y así se despliegan por completo.

Por último, este proceso constructivo se analiza para entender cómo una estructura plegable se debe ejecutar y construir con aleaciones menos pesadas. Esto ayuda a verificar la resistencia del nodo cuando se despliegue. Este debe desplegar todos sus vértices y ser lo suficientemente flexible para poder colocarse en varios lados.

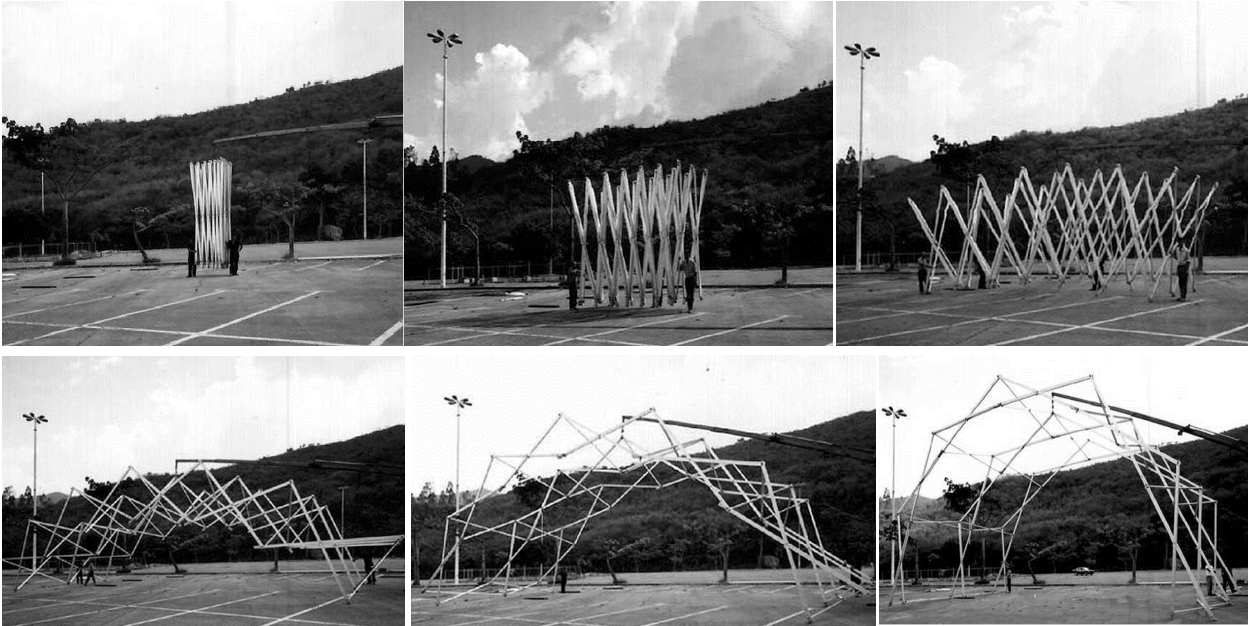


Figura 3. Estructura transformable en un sitio. Fuente: www.grupoestran.com, 2015.



Figura 4. Transporte de una estructura transformable, aunque es una estructura pequeña el concepto de su transportación debe tener la misma facilidad que está cubierta.

Fuente: www.grupoestran.com, 2015.



Figuras 5 al 10. Esquema de izaje de una estructura plegable, podemos observar cómo será el proceso constructivo de nuestra estructura ya armada con todas las conexiones y accesorios, al igual que este sistema se alzará con una grúa.
Fuente: www.grupoestran.com, 2015.

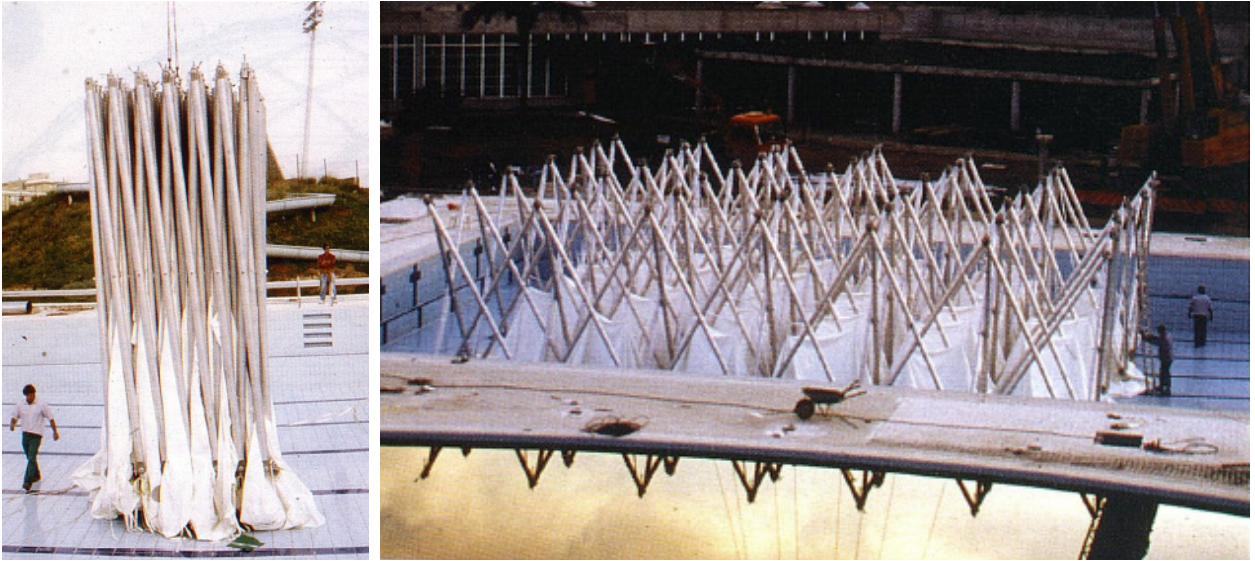
Otro referente constructivo de montaje es el desarrollo del despliegue de la estructura experimental de la obra de la cubierta del poli-deportivo de San Pablo en Sevilla, España, realizadas por el Dr. Félix Escrig Pallares y el Dr. José Sánchez Sánchez. La realización de esta estructura se llevó a cabo, desde sus inicios, a través de modelados por medio de maquetas, que sirvieron para desarrollar la configuración del sistema plegable de cubierta de San Pablo. Uno de los primeros análisis que podemos observar en el montaje de las cubiertas se ve reflejado en la manera de transportar el sistema estructural al sitio (Figuras 11, 12.). Se observa que la estructura es un empaquetado plegado que se amarra para que no se abra y se coloca en un camión para poder ser transportado. Ya en el sitio, se coloca sujeta en una grúa en ocho puntos de la cubierta y se despliega en el suelo rasante para chequear si la membrana o la estructura está en buen estado (Figuras 13 y 14). Posteriormente, se despliega la estructura con la grúa y se fijan las uniones inferiores a sus soportes, para contener los miembros estructurales. Posteriormente, se conecta la membrana en sus esquinas y se arriostran los vanos con un contra venteo tubular, para mantener rígida la cubierta (Figuras 15 a 16). La estructura fue realizada completamente de aluminio estructural, por lo que ayudó a que su despliegue fuese más rápido y fácil de transportar.



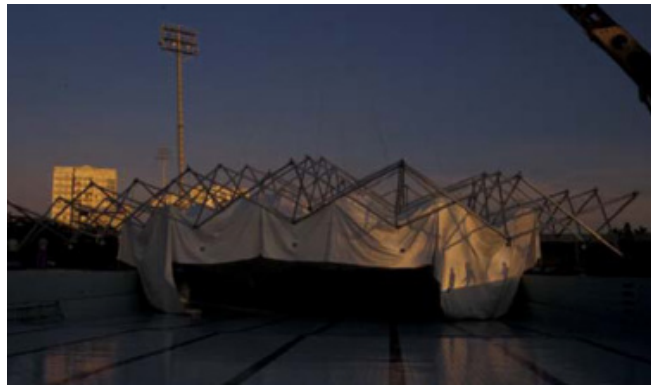
Figura 11. Carga de la cubierta plegable al camión
Fuente: Escrig & Sánchez, 1999.



Figura 12. Esquema de carga de la cubierta plegable; es importante comentar que la facilidad de transportación del sistema ayuda a mejorar la velocidad de construcción de la cubierta en el sitio.
Fuente: Escrig & Sánchez, 1999.



Figuras 13 y 14. Esquema de izaje de una estructura plegable. Podemos observar cómo será el proceso constructivo de nuestra estructura ya armada con todas las conexiones y accesorios. Al igual que este sistema se alzará con una grúa.
Fuente: Escrig & Sánchez, 1999.



Figuras 15, 16 y 17. Una vez situada en la posición del desplegado. Posteriormente, es fácil de desplegar la estructura con su membrana y colocarla en su sitio, por medio de una grúa conectada en ocho puntos, para anclarse a los soportes.
Fuente: Escrig & Sánchez, 1999.

Definición Geométrica de un Hiperboloide Plegable

La superficie geométrica que toma la propuesta estructural se puede definir como un hiperboloide, ya que es una superficie de revolución generada por la rotación de una hipérbola alrededor de una de sus ejes de simetría. Dependiendo del eje elegido, el hiperboloide puede ser de una o dos hojas.

Para entender mejor (Figura 18), se considera, a continuación, el caso de la hipérbola de referencia, cuya ecuación es $y=1/x$. La revolución alrededor del eje de simetría genera un hiperboloide cono, mientras que la rotación alrededor del eje azul, que atraviesa dos veces la hipérbola, da un hiperboloide de dos hojas.

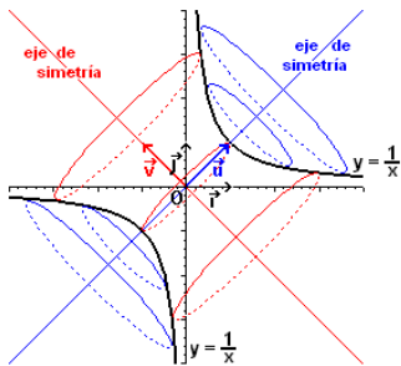


Figura 18. Representación gráfica, revolución sobre un eje de simetría. Fuente: www.urbipedia.org.

La descripción anterior, nos da la pauta para poder interpretar cuáles son los elementos necesarios para generar bidimensionalmente un hiperboloide (Figura 19.). Entendiendo los fundamentos básicos de este concepto matemático, se retoma, en este proceso de desarrollo de diseño, basándonos en las secciones cónicas.

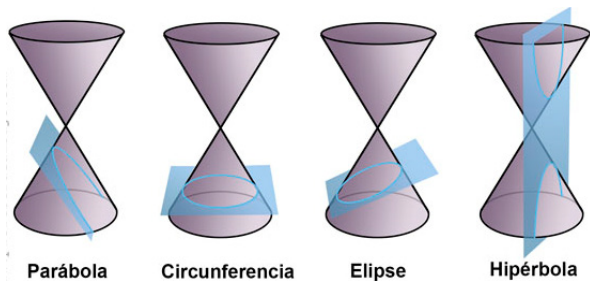


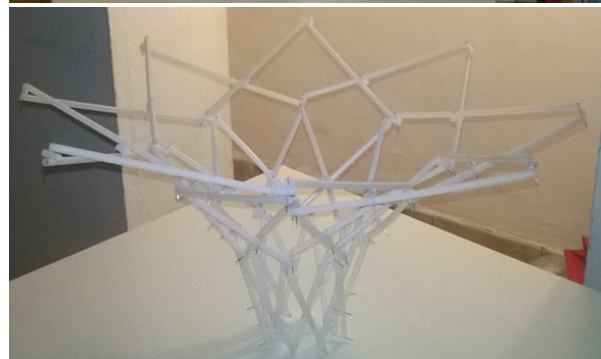
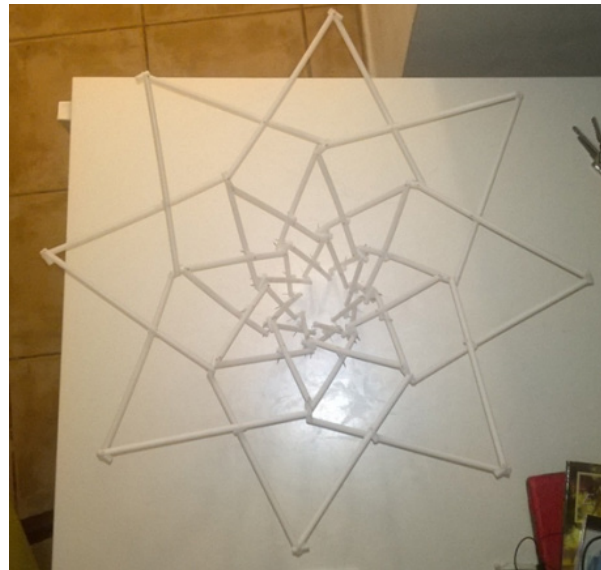
Figura 19. Imagen 1: Se muestran los dos conoides, de los cuales uno es cortado por el plano inclinado, con una inclinación paralela a una de las generatrices del cono, cortándolo en un solo manto o rama en el que se obtiene una parábola. **Imagen 2:** Los dos conoides serán cortados por un plano horizontal, perpendicular al eje del cono (se cortará uno de sus mantos). La intersección que se produce es una circunferencia. **Imagen 3:** Si un plano inclinado con más de 0°, pero con menos inclinación que la generatriz, corta al cono en uno de sus mantos, se obtiene una elipse. **Imagen 4:** Si un plano corta ambos mantos del cono, teniendo esta una inclinación mayor que la de las generatrices, se forma una hipérbola.

Fuente: sites.google.com

Primera Aproximación por Modelaje

Como explicamos anteriormente, la estructura hiperbólica plegable se realizará por medio de una geometría plegable

plana, con relación a la geometría de un hiperboloide que mantendrá en equilibrio el modelo aproximado de la geometría anteriormente explicada, para demostrar la funcionalidad y estabilidad del sistema (Figuras 20, 21), donde observamos que solo tres hileras de tijeretas son suficientes para desarrollar un aproximado del sistema transformable. Pero el problema de estabilidad en esta estructura se complica cuando se tiene mayor rango de abertura en el diámetro final de la hipérbola, ya que se tendría que realizar con mayor número de segmentación de anillos para que se mantuvieran más estables las tijeras en la estructura, pero complicaría el peso de la estructura y aun no se resolvería el problema de las deformaciones que se tendrían en las aberturas de las aristas del diámetro mayor de la hipérbola del modelo.

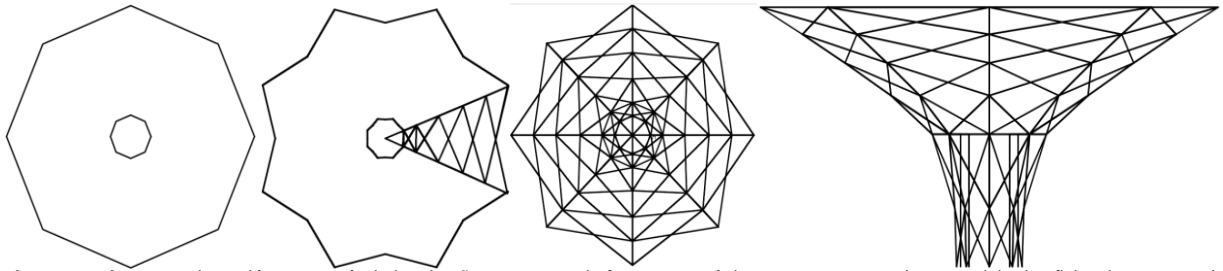


Figuras 20 y 21. Modelación de una hipérbola plegable de ocho tijeretas. No presenta ningún problema de estabilidad en claros no máximos de 9 m de diámetro.

Fotos experimentales Morales, 2015.

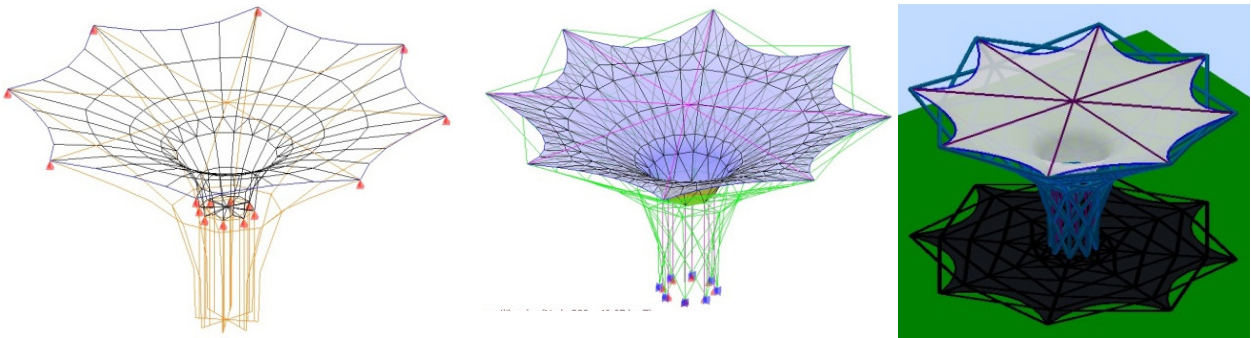
En consecuencia, se genera la adecuación geométrica experimental para generar un modelo a escala, con el cual poder analizar los esfuerzos generados en la geometría y las conexiones propuestas. Inicialmente, se plantea la idea general de la geometría a ocupar (Figuras 22 a la 28). Posteriormente, trasladar la información a un software de diseño industrial y a un modelo a escala. Para ellos se efectuaron los siguientes pasos:

La creación de una geometría rígida, la cual se relaciona con la morfología estructural de la telaraña.



Figuras 22 al 25. La adaptación geométrica de la telaraña representa de forma paramétrica que crea un excelente modelo de eficiencia estructural basado en el esfuerzo a la tracción. La geometría base de la estructura es el triángulo siendo una estructura resistente, su principal característica se basa en la generación de una estructura de forma hiperboloide. Fotos experimentales: Morales, 2015.

Fotos experimentales: Morales, 2015.



Figuras 26 al 28. Búsqueda de la forma mediante el software Wintess3, donde se muestra una estructura equilibrada, se tiene una idea general de diseño a realizar.

Fuente: Morales, 2013.

Se desarrolla una estructura con forma geométrica de hiperboloide, la cual es modulada en 6 secciones, contemplando que en la parte media de la geometría se genera un cinturón que rigidiza la estructura (vista lateral) y se generan 8 módulos basados en un octágono (vista planta).

La geometría de la membrana se proyecta en el interior de la estructura. Se diseñarán las conexiones adecuadas para que el mecanismo a usar sea simple.

Los valores designados a esta geometría son: Alto: 3.5 m.; Ancho: 7m; Ancho de la base: 1 m. El análisis de esta geometría da como resultado que en el arranque de la estructura debe ser un tipo de anclaje rígido (Figuras 29 y 30). Los nodos principales son cinco, con diferentes ángulos; el nodo final de la parte superior debe ser especial, ya que la vela tiene que estar, de cierta manera, unida a la estructura.

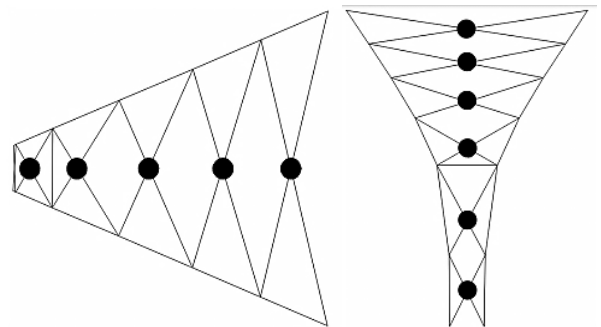


Figura 30. Los 6 nodos secundarios tienen la finalidad de rigidizar la geometría.

Fuente Morales, 2015

Los nodos secundarios son los que permitirán que la estructura se rigidice; estos seis nodos de igual manera con diferentes ángulos. Tomando todo este análisis de la estructura, se procede a realizar propuestas para resolver esta estructura geométrica.

La propuesta creada para realizar el arranque de la estructura se obtiene de analizar varios referentes. Se concluye que se realizará de manera articulada. En caso de haber desigualdades en las medidas de la geometría no afecte la estabilidad del sistema estructural, ya que los ángulos que se generan en la estructura son demasiado agudos. La problemática que genera esta geometría, que segmenta demasiado las tijeras plegables en posición vertical y no ayuda a equilibrar la deformación de la estructura, como lo veremos más adelante en la simulación estructural de las geometrías aquí desarrolladas, para sustentar qué sistema es el más óptimo.

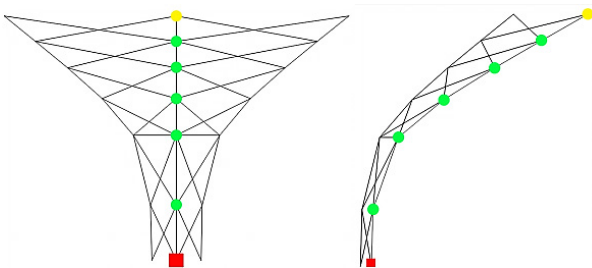


Figura 29. Arranque de la estructura (rojo), se observan los 5 nodos principales (verde), nodo superior (amarillo).

Fuente Morales, 2015

Segunda aproximación por modelaje.

Siguiendo la misma metodología se modela el siguiente modelo por tres secciones de tijeras en sentido vertical, pero con la diferencia que solo en la base son ocho tijeras y en la segunda y tercera fila se desarrolla con 16 tijeras, ayudando a aumentar la abertura del diámetro de la hipérbola a 13 metros. Experimentalmente puede llegar hasta 30 metros de diámetro, pero, para la siguiente simulación y geometrización, se dejará a 13 m (Figuras 31, 32) el modelado de la geometría. Con mayor número de tijeras se puede desarrollar un mayor diámetro de revolución del hiperboloide y formar claros más grandes, ya que las aberturas de entre aristas son más cortas y se puede controlar mejor la regulación del pretensado.

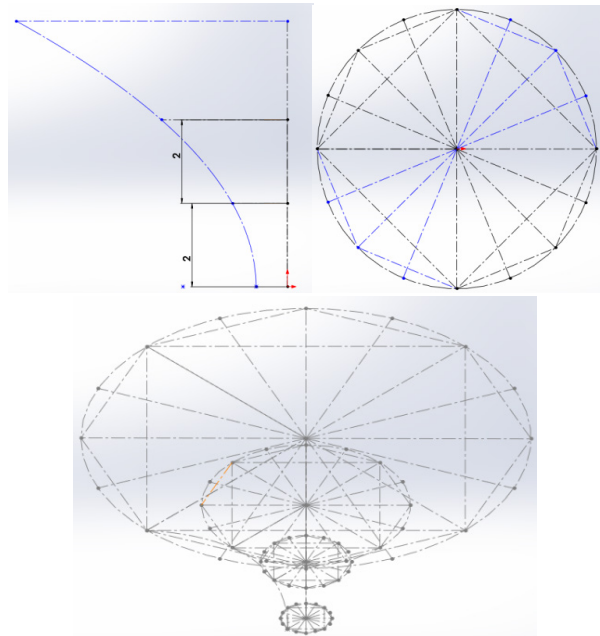


Figuras 31 y 32. Búsqueda de la forma mediante el modelaje de maquetas se generó una hipérbola con mayor rango de cubrimiento gracias al número de tijeretas que tiene en la segmentación superior de la geometría.

Fuente: Morales, 2015.

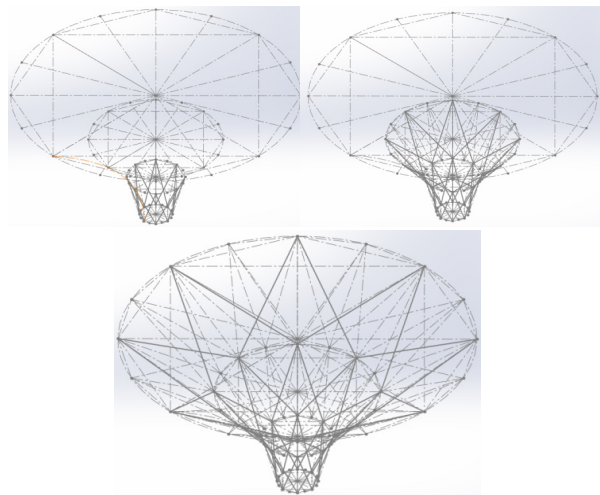
Después del modelado, se geometrizó la estructura hiperbólica para verificar los puntos y las aristas del sistema plegable, y cuál sería su intersección de pivotantes dentro del sistema transformables. Y, en consecuencia, cómo sería la tenso estructura que se fabricaría dentro del plegado (Figuras 32 a la 38). Primeramente, se resuelve la curvatura parabólica de la hipérbola, generando un diámetro de 13 m en el diámetro mayor y de 1.5 m en el diámetro menor que será la base. Se segmenta en tres partes a cada 2 m, obteniendo una altura máxima de 6 m en la parte más alta. De ahí, se colocan 4 círculos subdivididos en 16 partes, para que sirvan de guía y construir la hipérbola, ya sea de 8 tijeretas de la base y 16 en las partes intermedias y altas.

Por último, se construye la intersección de la pieza y pivotantes, formando la malla hiperbólica plegable final.



Figuras 33, 34 y 35. El desarrollo de la geometría se dio gracias a que se definió la parábola hiperbólica que determinaría gracias a la segmentación de tijeras que ayudan a soportar diámetros de mayor rango.

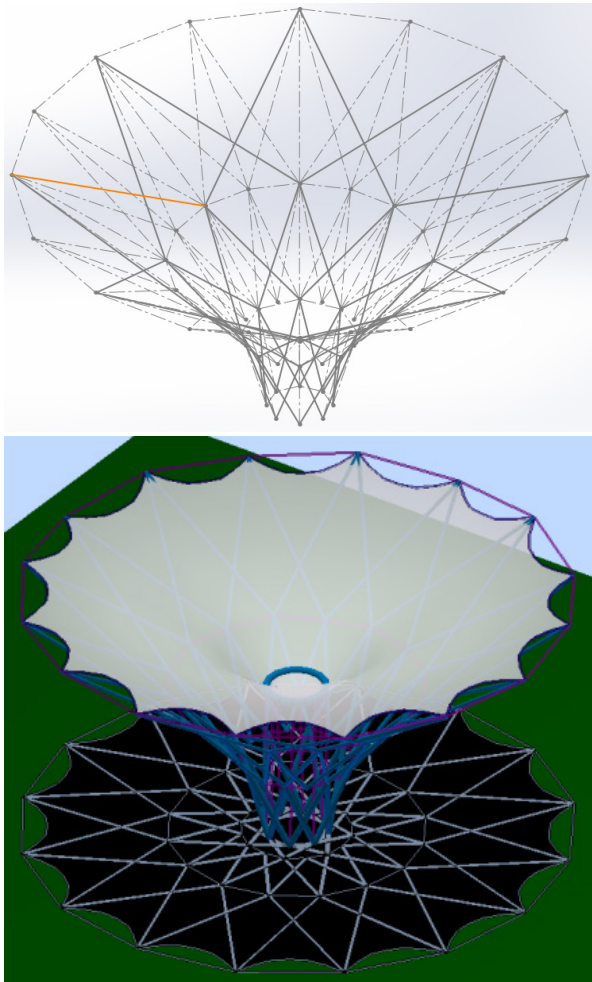
Fuente: Morales, 2015.



Figuras 36, 37 y 38. En consecuencia después de determinar la geometría de referencia se construye la hipérbola a base de tijeras diagonales que se intersectan por medio de una pivotante central que le ayuda a formar la figura plana plegable en la estructura.

Fuente: Morales, 2015.

Concluida la construcción geometría por medio del programa WinTess (Figuras 39, 40), se traslada a la geometría en formato DXF y se pasa al programa, para colocarle la velaría de embudo en la parte interior de la geometría. Con ello, se le aplicarán pruebas de cargas correspondientes, para analizar los esfuerzos generados en la estructura transformable, y así se formaran las hipótesis de comportamiento estructura y las diferentes composiciones del sistema plegable.



Figuras 39 y 40. El siguiente paso fue desarrollar la velaría en programa WinTess, este ayudó a determinar la figura que tomara la tenso estructura dentro del sistema plegable.

Fuente: Morales, 2015.

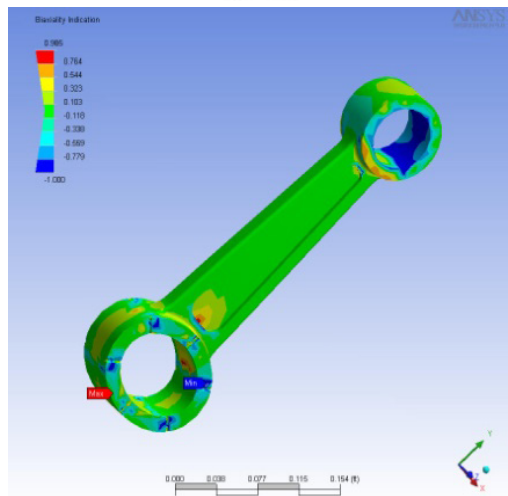
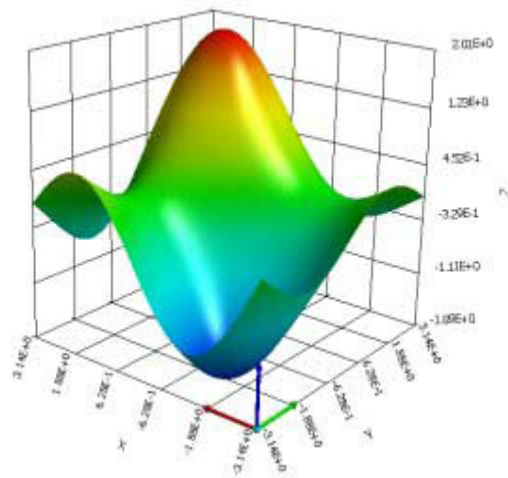
Parámetros de Diseño Estructural

Para aterrizar los parámetros de una propuesta estructural con una geometría transformable, se definirán las premisas y cotas de la metodología a seguir, las cuales analizan cada una de las partes que se aplicarán en el modelo, que son: la simulación estática estructural, la adecuación de la geometría estructural y la aplicación tecnológica constructiva. Estas dejarán una pauta marcada en la proyección de un modelo aproximado a reproducir un sistema estructural plegable, para no desviarse de la aplicación de los conceptos principales de la propuesta.

La simulación estática estructural está sujeta a la adaptación del entorno del modelo. Estos factores definirán el comportamiento de la cubierta hiperbólica, que se analizan en un prototipo a escala, que ayuda a ver la interacción de esfuerzos en el modelo. Lo anterior, servirá para predimensionar los miembros estructurales del prototipo (Figura 41, 42). Con el fin de adecuar los modelos a una producción real, se realiza el primer acercamiento, el cual consiste en someter al modelo a cargas gravitatorias, accidentales, sismo y de vientos. La jerarquía de seguridad de la simulación se genera por medio de un software

(WinTess¹) que facilita el diseño de los miembros estructurales. Posteriormente, con estos datos, se diseñarán los detalles de unión de los modelos, tomando en cuenta los parámetros que arrojan sus gráficas de momentos, cortantes y respectivos esfuerzos interiores.

En consecuencia, en cada una de las etapas experimentales se construye la metodología del desarrollo del prototipo final, y, con ella, tendremos cómo verificar la tipología estructural en la que se desarrollará la geometría. Esto, posteriormente, cuando se aplique al proyecto final, al que se le observará la reglamentación vigente y adecuada. En consecuencia, nos proveerán datos importantes de la tipología estructural y de las adecuaciones geométricas para tomarlas como parámetros.



Figuras 41 y 42. La simulación comprobará la interacción de cargas en el sistema estructural de los modelos para formar parámetros de seguridad dentro de la estructura.

Fuente: Morales 2012.

Para determinar las premisas de las cargas de la estructura nos indica el reglamento de NCRDF las cargas asignadas son; Carga Muerta: 30 kg/m², Carga Viva Máxima: 40 kg/m², Carga Viva Accidental: 20 kg/m².

¹ Software de Análisis Estructural de Primer y Segundo Orden, <http://manuawintess.upc.es/>

Para determinar las cargas horizontales que afectan a la estructura, serán las de vientos teorizados de los mapas de isovalores aproximados que, posteriormente, en el proyecto final, serán afinados. Pero, para este ejercicio, se aplica la fórmula que dicta el reglamento del CFE², siendo así la determinación de la velocidad del viento en una edificación, que según el reglamento del CFE será:

Se selecciona una carga de 10 años de retorno en el mapa de isovalores, donde determinamos que el viento que afectará a esta estructura, que es temporal, marca que solo se tomarán en cuenta 10 años de retorno permanentes de vientos cálculo; conocido esto se aplica en WinTess, y se realiza las operaciones de iteración por combinaciones de carga. Con esto, se genera la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Se observa en la siguiente tabla la combinación más afectada para calcularse en el programa WinTess.

WinTess		
Combinación de Carga: 1.4 + 1.5 + SISY + 1.1 VIEN X + 1.1 VIEN Y		
Sobrecarga = 20 kg/m ² + Carga Accidental: 40 kg/m ²		
Viento X = 64.7 km/h	Viento Y = 32.1 km/h	Viento total = 132.9109 km/h
Tipo de edificio = Abierto (3) > Sin c=0		
Pretensado de la membrana = 0.08/0.08 %		

Fuente: el autor

Primera simulación estructural

Para determinar cuál es el modelo óptimo para desarrollar posteriormente, en un modelo a escala 1:3 o 1:1 se determina primeramente el material que se utilizará, pero, para determinar qué geometría se comporta mejor estructuralmente para este caso, una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-702, con una resistencia de RK(daN/5cm) 300/280, se determinaron tres casos de materias de dimensiones estructurales para los miembros los cuales se ven en la (Tabla 2) en donde también se colocaron diferentes denominaciones de acero y aluminio, los cables de acero galvanizado de 14 mm de espesor. Ya realizado el cálculo sobre estas especificaciones, se verifican los datos arrojados del programa, que no nos ocasiona ningún problema, pues los valores que maneja en factores de seguridad son casi iguales que los del manual de acero de LRFD y el Euro código para Acero forjado y aluminio.

En consecuencia, en México tampoco se ocasiona ningún problema en cuanto a seguridad, ya que el Euro código maneja factores de seguridad muy altos y están sobrados en cuanto a solicitaciones y comprobaciones. En donde sí impactarían, sería en la cuestión económica, pero, en nuestro caso, adoptamos la normativa que el programa ha manejado (Figura 43), en donde observamos los resultados de las nomenclaturas de perfil y peso de cada calculo hecho por el programa. No superan el Ratio de seguridad establecido a la unidad (1), pero si la deformación de seguridad permitido. El especialista, Dr. José Sánchez Sánchez, bajo la experiencia que ha tenido en este tipo de construcción de estructura, nos comenta que la estructura cuando tiene mucha deformación no es óptima para desarrollarse, por consiguiente la simulación nos indica qué pasa cuando se tiene mucha inercia en los perfiles. Por ello la deformación nos perjudica y afecta a los miembros y hace que aumente el perfil, y, en consecuencia, no deja con una estructura muy pesada visualmente. La posibilidad

del aluminio, comparando en la Tabla 2, puede ser un material que nos ayude a disminuir el aumento del peso (Figura 44), pero, como comentamos anteriormente, la deformación es mucha para este tipo de estructura. Por ello, este análisis podemos desarrollarlo en claros pequeños que no rebasen los 10 m de diámetro, ya que se determina que es mucha la deformación que puede llegar a tener la estructura.

Tabla 2. Se observa en la siguiente tabla las combinaciones calculadas de la hipérbola plegable, de cual se observa que el sistema se ve beneficiado por la piezas de aluminio.

Designación D x t	Acero	Aluminio	Peso
110 x 5 mm	S 355		1333.39kg
89 x 5 mm	A 36		1770.08kg
100 x 2.5 mm		A 110	342.86kg

Fuente: el autor

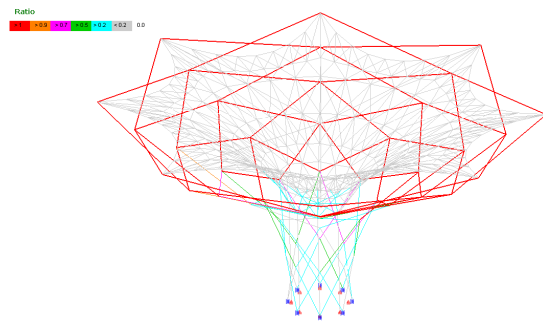


Figura 43. La deformación de la estructura hiperbólica plegable rebasa la recomendación reglamentada en el LRFD y la Normas Complementarias del DF.

Fuente: Morales 2012.

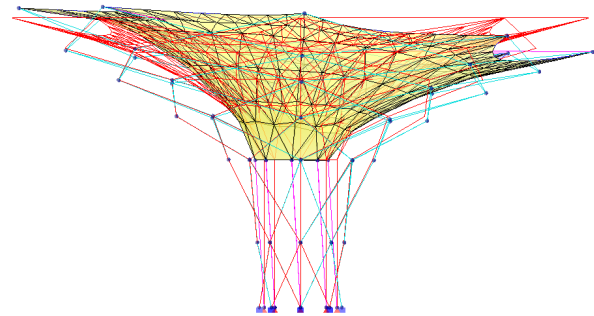


Figura 44. La comprobación de la estructura hiperbólica nos ayuda a estimar el perfil adecuado del sistema transformable.

Fuente: Morales 2012.

Segunda Simulación Estructural

En consecuencia, se desarrolla la segunda simulación para la estructura hiperbólica de 8 pieza de tijeretas en la base y 16 piezas de tijeretas intermedias, y, en la parte superior, se hace el proceso de iteración del cálculo. Este proceso ayudará a comprender cómo diseñar la estructura hiperbólica. El programa hará las iteraciones necesarias hasta lograr que la estructura esté equilibrada. El número de iteraciones puede variar, dependiendo de la forma compleja que pudiera llegar a tener la estructura, pero, lo importante de este cálculo es que obtenemos la dimensión real de la estructura en sus miembros, los esfuerzos que actuarán en la misma, las dimensiones de los cables y las deformaciones que pueden tener la estructura, ya incluida la membrana. Para este caso, se seleccionó una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-702, con una resistencia de

² CFE (Comisión Federal de Electricidad), es el manual más utilizado para diseñar las estructura por vientos dentro del país. <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/385.htm>.

RK(daN/5cm) 300/280. La variedad de los tubos puede observar (Tabla 3.) donde se colocan los diferentes materiales del acero en la región de España y México, el que, posteriormente, determinará la selección del material para la estructura. Ya realizado el cálculo sobre estas especificaciones, se verifican los datos arrojados del programa. Vale la pena comentar que la verificación de los miembros fue realizada con los factores de seguridad del manual de acero de LRFD. En consecuencia, la reglamentación de México no ocasionó ningún problema en cuanto a seguridad, ya que el Euro código maneja factores de seguridad muy altos y están sobrados en cuanto a solicitudes y comprobaciones. En donde sí impactarían, sería en la cuestión económica, pero, en nuestro caso, adoptamos la normativa que el programa ha manejado (Tabla 4.).

Tabla 3. Se observa en la siguiente tabla las combines calculadas de la hipérbola plegable, de cual se observa que el sistema se ve beneficiado por las piezas de aluminio.

Designación D x t	Acero	Aluminio	Peso
110 x 5 mm	S 355		3686.83kg
102 x 6 mm	A 36		3789.95kg
200 x 6.9 mm		A 110	3270.01kg

Fuente: Estancia Post- Doctoral Morales, 2015.

Tabla 4. Se observa en la siguiente tabla las combines calculadas de la hipérbola plegable, de la cual se puede ver las diferentes colocaciones de secciones en los segmentos de la hipérbola y que llegamos como conclusión, utilizar el Aluminio.

Designación D x t	Acero	Aluminio	Peso
150 x 5 mm	S 355		
110 x 5 mm	S 355		
90 x 4 mm	S 355		
			3203.60kg
141 x 6 mm	A 36		
114 x 6 mm	A 36		
102 x 5 mm	A 36		
			4365.59kg
200 x 6.5 mm		A 110	
175 x 6.7 mm		A 110	
150 x 5.4 mm		A 110	
			2069.56kg

Fuente: Estancia Post- Doctoral Morales, 2015.

Observamos la aplicación de propuestas de tubería de perfiles de acero con diferentes espesores, variando estos perfiles en los diferentes segmentos y llegamos a la conclusión de que los miembros más adecuados son de aluminio, ya que se obtiene menos peso por la estructura, mayor inercia en las piezas y menor deformaciones en la estructura (Tabla 5). Observamos que todas las barras con mayor esfuerzo de momento y tensión, no superan el Ratio de seguridad establecido a la unidad (1) (Figura 45). Mencionamos que, para el tipo de estructura, la comprobación sigue siendo la unidad. El Ratio se dejó a la unidad, para estar en el rango de la seguridad es confiable y viable para el desarrollo de la estructura (Figura 46, 47). Observamos que en los momentos la hipérbola y estos son más fuertes en la parte superior e intermedia de la geometría, por la cual esta se absorbe, dándole mayor inercia al miembro estructural, pues su configuración estructural actúa como una malla plana que distribuye perfectamente los esfuerzos al suelo (Figura 48). En las deformaciones obtenemos un desplazamiento de 88 mm, las cuales se disminuyen aún más cuando las estructuras están colocadas en caras protegidas al viento; por ello, la geometría que se comporta mejor en esta simulación es la de la segunda simulación.

Tabla 5. Se observa en la siguiente tabla las secciones finales de los miembros estructurales finales de la hipérbola y de los cables que rigidizaran la velaría de la cubierta hiperbólica.

DATOS BARRAS RÍGIDAS						
Barra	Axial	Torsor	M.max	C.max	Tensión	Ratio
	T	Tm	Tm	T	kg/cm ²	
6	-0.833	0.041	0.410	0.176	568.1	0.30 Ø200-6.5_A110
7	-1.079	0.047	0.415	0.177	560.2	0.31 Ø200-6.5_A110
30	-0.099	0.056	0.849	0.618	1548.8	0.73 Ø175-6.7_A110
33	-0.341	0.071	0.830	0.604	1528.5	0.74 Ø175-6.7_A110
67	-0.155	0.025	0.304	0.067	1431.5	0.72 Ø150-5.4_A110
54	-0.175	0.025	0.313	0.062	1448.8	0.74 Ø150-5.4_A110

TRACCIÓN MAXIMA EN LA MEMBRANA				
Barra	Nudos	T/metro	kg/5cm	Ratio
565	96-114	.774	38.7	0.64

TRACCIÓN EN LOS CABLES DE RELINGA				
Cable	T	Ratio	Barra	
1	0.246	0.09	57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, WS-2-(40mm)Galv	
2	0.232	0.08	68, 69, 70, 71, 72, WS-2-(40mm) Galv	

Fuente: Estancia post- Doctoral Morales 2015

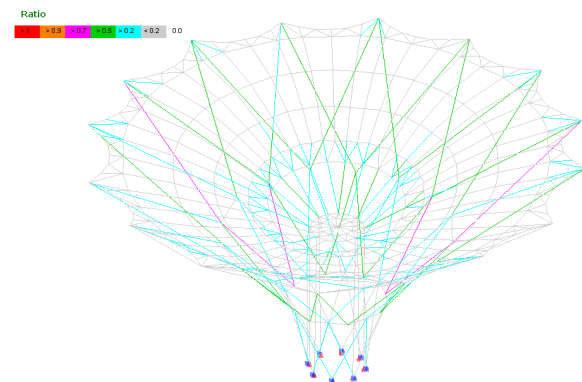


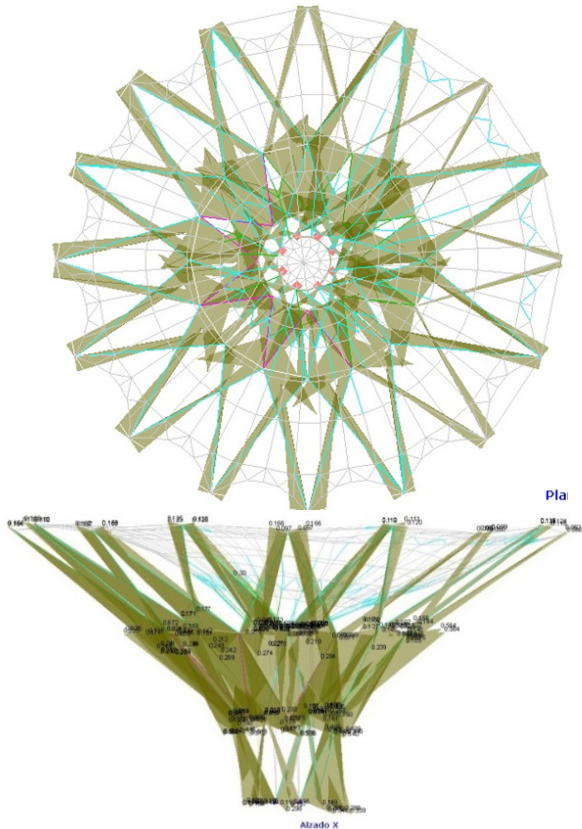
Figura 45. Se observa en la siguiente imagen la resistencia que tiene la estructura hiperbólica y su comportamiento ante las acciones que someten a esta estructura.

Fuente: Estancia Post- Doctoral Morales, 2015.

Procedimiento Constructivo Experimental

A continuación, se formará un nuevo modelo mejorado y ajustado a la nueva geometría plegable de la cubierta; para este caso se realizará un empaquetado plegable de toda la cubierta, para que solo sean dos tipos de nodos, el que se realice y se estandarice constructivamente en una propuesta final, teniendo en cuenta los modelos de unión de cada parte de la estructura. Con base en este modelo, se resolverá la estructura plegable. Para ello, se trabajó con el diseño de los nodos, sistema de sujeción con tubo galvanizado que es fácil de manufacturar y realizar los cortes para dicho prototipo experimental.

Para el desarrollo de la cubierta plegable se realizaría a escala (1:4) con material a base de acero galvanizado. Posteriormente, se realiza la construcción de la cubierta plegable que se describirá en el siguiente cuadro (Tabla 6.), donde se proporciona la función y el material con que se realizaron, cada elemento que compone la cubierta transformable tiene la función de estabilizar el sistema plegable de la estructura.



Figuras 46 y 47. Se observa en las siguientes imágenes los momentos localizados en la geometría hiperbólica y como serían los efectos de deflexión y deformación dentro de la estructura.

Fuente: Estancia Post- Doctoral Morales, 2015.

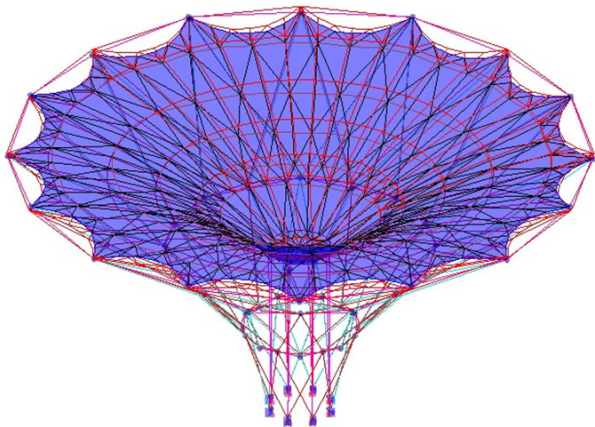


Figura 48. Se puede notar como la deformación se absorbe muy bien por la geometría hiperbólica del sistema transformable, por consiguiente puede equilibrarse muy bien en los diferentes efectos de acción de cargas en la estructura.

Fuente: Estancia Post- Doctoral Morales, 2015.

El siguiente paso es el armado del modelo. Este se desarrolló bajo las especificaciones y descripciones de la tabla; una vez conectadas las piezas de la cubierta plegable se sometieron a las pruebas de alzado. En esta etapa se tuvieron inconvenientes por el peso del material, ya que en el sistema se quiso pandear por la geometría dinámica que se tenía en la base; esto ocurrió al realizar el despliegado que se ejecuta por medio de un jalón tipo paraguas que está anclado al centro de hipérbola. Por ello, se tendrá que hacer con mucho cuidado el despliegue. Una de las principales características del modelo después del despliegue, es que se equilibra por su geometría. Para llegar a esto, se contempla que la estructura debe estar correctamente desplegada, ya que los arrostramientos o contra venteos, ayudan a rigidizar la cubierta si está completamente erguida. Así se direccionan los esfuerzos que llegan hacia las bases del sistema plegable, formando una cúpula circular unidireccional de la cubierta plegable.

Otro factor que se tiene que tomar en cuenta es que el sitio debe de estar nivelado, ya que para este modelo no se realizaron los basamentos de nivelación que ayudan a adaptarse la cubierta al terreno. En este ejemplo se nota que, en diferentes escalas, a partir de 1:4, la cubierta puede llegar a tener diferentes utilidades, aunque este analizada para claros más grandes (Figuras 49 a 53), ya que su facilidad constructiva le ayuda a que es muy fácil de instalarla, si se tiene contemplado el claro que el usuario quiera cubrir, ya que de ello depende el uso de herramienta especializada que se vaya a utilizar en cada caso.

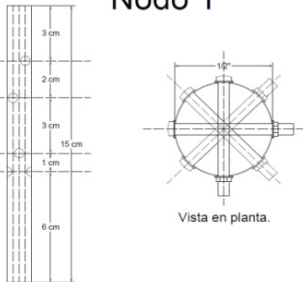

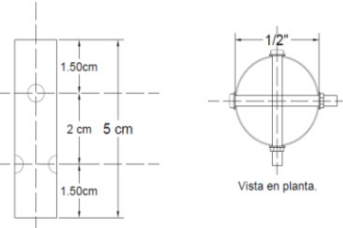

Por último, esta práctica de modelaje constructivo aproximado y de corrección para un modelo final de la investigación, sirvió para comprobar qué tipo de unión se puede desarrollar y ser más simplificada; también, como sería la ejecución constructiva en un sitio controlado y nivelado. En consecuencia, esta práctica fue para detectar cómo se iban a desarrollar las deformaciones no controladas en la estructura a la hora de hacer el alzado. Por ello, el siguiente paso es realizar los detalles pertinentes para una manufactura a escala real y, así, continuar dicha investigación.

Resultados: Detalles Constructivos 3D

Concluimos el proyecto, basados con el análisis anterior y elaboramos aquellos detalles estructurales en donde se verificó que la estructura tendría que contar con nodos articulados en dos direcciones, para que su plegabilidad fuera óptima. En los siguientes dibujos, se detallan los diseños para la construcción de las uniones de la hipérbola plegable (Figuras 54, 55). Se presenta el dibujo general de la cubierta tensada, en la que se destaca su gran envergadura, que puede llegar a cubrir un claro de 25 m de diámetro; es por esto que la piel resulta una pieza clave para el diseño de los detalles y, para tal fin, se seleccionó una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-702, la cual interactúa óptimamente con todo el sistema

A continuación, se proponen algunos modelos en los que podemos observar (Figuras 56 a la 59), que los nodos están compuestos por un nodo central articulado, unidos con tuercas y accesorios enroscables para que quede fija la unión, esto es, para que los miembros conectados puedan plegarse. Después, con un bastón esférico que tendrán como base todos los nodos de la hipérbola. El nodo está diseñado, utilizando una figura cilíndrica alargada, por lo cual, todos los accesorios articulados se acomodan de tal forma que se ponen en la posición adecuada para plegar la estructura. El nodo se compone por accesorios enroscables y es donde se coloca el primer accesorio, que es un bastón esférico que sirve como rótulo triarticulado, que ayuda a que tengan un tope que apoye a sujetar y también a facilitar el giro sobre sus ejes. Para adecuar la geometría en el nodo pivotante de las aspas, se genera un accesorio que se une con los miembros intermedios de las aspas hiperbólicas; esto por medio de un terso regulador que fija el pretensado y deja estabilizado el miembro.

Tabla 6. Se desarrolló la siguiente tabla para describir la función y el material con que se elaboró el modelo experimental final de la investigación, donde se unifico la plegabilidad de todo el sistema transformable.

ELEMENTO.	DESCRIPCION.
<p>Nodo 1</p> 	 <p>Función: Une los contravientos y las tijeras. Permite expandir la estructura rotando en su propio eje.</p> <p>Material: Tubo conduit galvanizado tipo ligero pared delgada 16 (1/2), Tornillos, rondanas para tornillos de 10 mm. y tuercas de 10 mm.</p>
<p>Nodo 2</p> 	 <p>Función: Une los dos tipos de tijeras, y tiene dirección cruzada a 45° y se ubica en la parte inferior de la estructura.</p> <p>Material: Tubo conduit galvanizado tipo ligero pared delgada 16 (1/2), Tornillos, rondanas para tornillos de 10 mm. y tuercas de 10 mm.</p>

Fuente: Morales 2015.



Figuras 49 al 53. El proceso de alzado ayuda a determinar cómo se comportaría el modelo en la construcción y como serían sus deformaciones en algunas partes de la cubierta.

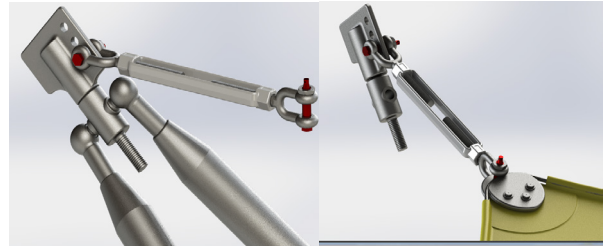
Fuente: Morales 2015.



Figuras 54 y 55. Forma Final del proyecto de investigación de una hipérbola plegable tensada.

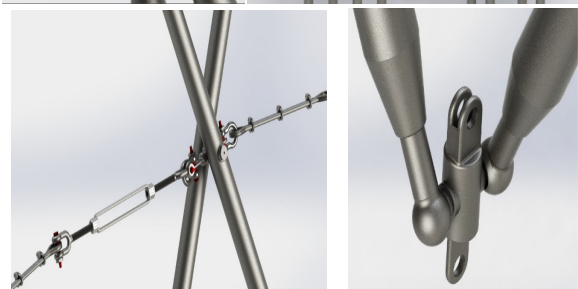
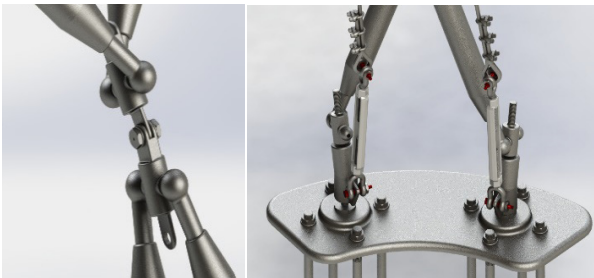
Fuente: Morales, 2015. Registro de patente ante IMPI.

Los detalles del manto (Figuras 60 a 63) se componen por accesorios que ayudan a estabilizar la velaría tanto en la cubierta superior como la inferior, que, por lo regular, disponen de un bastón de pretensado esférico que regula el pretensado de la cubierta. El accesorio triarticulador, hace que la conexión se mueva en la dirección en que necesite. Esta estructura tiene movimiento porque la membrana es muy delgada y puede moverse por un pequeño viento, pero este no debe moverse demasiado, ya que entraría en resonancia y podría colapsar. En este caso, el pretensado beneficia a que la geometría se mantenga en forma óptima, para soportar las tensiones que se llegan a producir en la cubierta plegable hiperbólica.



Figuras 60 al 63. Posteriormente, se confeccionaron los detalles estructurales de las uniones del manto de la velaría.

Fuente: Morales, 2015. Registro de patente ante IMPI.



Figuras 56 al 59. Se elaboraron los detalles estructurales en un modelo 3d, para que, en la siguiente etapa, se realice la construcción y análisis estructural, que se tomará tal cual, como en el dibujo 3d. Con ello comprobamos la traslación del diseño a la ingeniería de simulación estructural. Pero aún falta comprobar los detalles en el ámbito de la construcción, la concordancia con la realidad siempre estuvo presente en la elaboración de estos modelos.

Fuente: Morales, 2015. Registro de patente ante IMPI.

Conclusión

No se puede terminar esta investigación sin dejar abierta una visión a futuro. Este tema puede ser el punto de partida de otros estudios teóricos y prácticos sobre las estructuras ligeras: estructuras recíprocas, tensegrity, enrollables, etc.

El estudio realizado en esta investigación, es el primer paso en el proceso de llegar a construir el modelo propuesto en el mundo real. Para ello, requerimos hacer mayores estudios entre los cuales, uno de los primordiales es el cálculo estructural del modelo, prueba físico-mecánicas de sistema transformable. Se contempla en un futuro este modelo poder realizarlo en una estructura totalmente plegable, teniendo en claro que el sistema de conexiones tiene que ser en algunos casos articulados y retráctiles.

De igual manera, podemos desarrollar el tema en otras líneas de investigación como puede ser, el bioclimatismo, urbanismo, ingeniería estructural, arquitectura sustentable, arquitectura paramétrica, estructuras transformables, tecnologías para la arquitectura, etc., pero la base del éxito del diseño de este prototipo será la modelización y conceptualización geométrica

de los sistemas plegables. Por ello, será parte primordial generar varias pruebas y modelos de dicho sistema constructivo.

Por ende, la simulación estructural de WinTess fue un punto muy importante para realizar los análisis estructurales y el diseño de los miembros de la estructura, por lo cual el éxito fue desarrollar una nodo bastante efectivo para calcular y construir posteriormente, para desarrollar el sistema constructivo de la hipérbola plegable. Uno de los factores que ayuda a esta estructura es la utilización de modelos ya que ayudan a corregir ciertos problemas que podemos tener en la etapa constructiva; aun así, se debe tener mejoras y conexiones mas sencillas para el usuario y técnico constructor, por lo que se realizaran más pruebas en otros materiales.

Los sistemas transformables siempre han sido complejos de realizar y elaborar, pero una de las razones para utilizarlos con más frecuencia en la vida diaria es que existen materiales ligeros que pueden soportar la flexión de los miembros y mejores perfiles sin agregarle peso a la estructura; en el caso del aluminio, este sería un material bastante bueno que se podría utilizar para realizar este tipo de sistemas, aunque se puede tener otros materiales aún más ligeros.

Por último, la investigación puede terminar hasta que se realice el prototipo a una escala mínima 1:4 o 1:3 para verificar un check list de seguridad y detalles constructivos, uniones junto con la velaría que tendrá encima de ella, al igual el método constructivo más efectivo para su despliegue; esto concluirá en un registro de patente del nuevo sistema experimental que se realiza en la Facultad de Arquitectura.

Referencias

- Morales Guzmán, C. (2009) *Diseño de Sistemas Estructurales Flexibles en el Espacio Arquitectónico*, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Morales Guzmán, C. (2012a) *Diseño de Sistemas Flexibles en el Espacio Arquitectónico*, Editorial Academia Española, Madrid, España.
- Morales Guzmán, C. (2012b) *Diseño de una Cubierta Retráctil Tensada*, Actividad Post Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Morales Guzmán, C. (2010) *Síntesis del Diseño Arquitectónico*, Actividad Docente Licenciatura en Arquitectura, Universidad Veracruzana, Poza Rica, México.
- Morales Guzmán, C. (2013) *Diseño de un Sistema Mecanizado Transformable Tensado*, Actividad Post Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Morales Guzmán, C. (2015) *Diseño de una Cubierta Hiperbólica Plegable*, Actividad Post Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Moore Fuller (2000) *Compresión de las Estructuras en la arquitectura*, Editorial Interamericana McGraw-Hill, USA. Traducción en México.
- Motro, R. (2003): *Tensegrity. Structural systems for the future*. 1a, Ed, Editorial HSD. Paris, Francia.
- M. Villasuso, Bernardo, (1994); *"Diseño y Cálculo de las Estructuras"* (Principios Básicos Diseño Estructural), 1a Ed.; Editorial El Ateneo, S.A; Buenos aires, Argentina.
- Nonnas, R. (2003): *El Proyectista de Estructuras Metálicas*, 1a, Ed, Editorial Thomson-Paraninfo. Madrid, España.
- Otto, Frei, (1962) *"Cubiertas Colgantes"*, Versión española Folguera Francisco, 1a Ed.; Editorial Labor S.A; Barcelona, España.
- Pople, Nicolás, (2002); *"Steel Construction Manual"*, 1a Ed.; Editorial Gustavo Gilli, SA.; Barcelona, España.
- Sánchez, Sánchez, F. (1992): *Estructuras Ligeras para Grandes Luces*, 1ª, Ed, Editorial Fundación Emilio Pérez Piñero. Sevilla, España.
- Schock, Hasn-joanchim, (1997), *"Soft Shells, Desing and technology of Tensil Architecture"*, 1a Ed, Editorial Birkhäuser Verlag, Berlín, Alemania.
- Segui W. (2000); *Diseño de Estructuras de Acero con LRFD*. 2a Ed, Editorial Thomson Editores, S.A de C.V., México.
- Sierra Rodríguez, F. Vanegas Luis (2006); *Estructuras Ligeras*, 2a Ed, Editorial Universidad Pontificia Boliviana, Medellín, Colombia.