

PROTOTIPO DE DISEÑO DE UNA CUBIERTA RETRÁCTIL TENSADA

CARLOS CÉSAR MORALES GUZMÁN

Universidad Veracruzana, México
Facultad de Arquitectura, Región Poza Rica-Tuxpan (FAUV)

Morales Guzmán, C. C. (2013).
Prototipo de diseño de una
cubierta retráctil tensada.
[Prototype of a tensioned
retractable roof design].
Revista de Arquitectura,
15, 102-110. doi: 10.14718/
RevArq.2013.15.1.11



[http://dx.doi.org/10.14718/
RevArq.2013.15.1.11](http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2013.15.1.11)

Arquitecto, Universidad Veracruzana.
Maestro en Arquitectura, Universidad Cristóbal Colón.
Magíster en Ingeniería Estructural, Universidad Camilo José Cela.
Doctor en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México.
Posdoctorado en Arquitectura Tensada, Universidad Politécnica de Catalunya.
Posdoctorado en Arquitectura e Ingeniería Transformable, Universidad Politécnica de Catalunya.
Investigador – Académico de Tiempo Completo, Titular C, Universidad Veracruzana, Facultad de Arquitectura, Región Poza Rica-Tuxpan.
Perfil deseable PROMEP (2012), Miembro del Sistema Nacional Investigación, CONACyT, en la Modalidad de Candidato (2013).
Publicaciones recientes:
Morales, C. C. (2012). *Diseño de sistemas flexibles para la arquitectura*. Madrid: Editorial Academia Española.
Morales, C. C. (2012). Diseño de sistemas versátiles en los sistemas orgánicos. *Revista Esencia y Espacio*, 34-35.
Morales, C. C. (2011). Diseño de una vivienda bioclimática industrial. *Revista Bitácora*, 24.
carlmorales@uv.mx

RESUMEN

El desarrollo de una cubierta retráctil se llevó a cabo por la investigación experimental de una geometría orgánica en la arquitectura. En este caso, crear un sistema flexible y adaptable en la naturaleza. Se tuvo como referente directo el teatro ambulante del arquitecto Emilio Pérez Piñero, el cual se basa también en el principio de una estructura plegable, pero el prototipo de esta propuesta mejora la eficiencia de las uniones, ya que en esta investigación se enfoca en optimizar su fijación con los miembros de contra vanteo, generando un nodo más articulado y unificado que ayuda a absorber las presiones y succiones del viento en ambas caras de la estructura, dándole mayor estabilidad y equilibrio al sistema estructural. Se desarrollaron con acero A36 y el manto que se aloja en la parte inferior de la cubierta "Velaría" se propuso con una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002, con una resistencia de RK(daN/5cm) 420/420, módulo de elasticidad (t/m) 50/50.

PALABRAS CLAVE: adecuación análoga, arquitectura transformable, detalles constructivos, diseño de estructuras, geometría orgánica-estructural.

PROTOTYPE DESIGN OF A TENSIONED RETRACTABLE ROOF

ABSTRACT

The development of a retractable cover was carried out by experimental research on organic geometry in architecture. In this case, to create a flexible and adaptable system in nature. Street theater by architect Emilio Pérez Piñero was used as a direct reference, which is also based on the principle of a folding structure, but the prototype of this proposal improves the coupling efficiency, as this research focuses on optimizing fixation members against vent generating a unified and more articulated node that helps to absorb the pressure and wind suctions on both sides of the structure, giving to it greater structural stability and balance to the system. They were developed with A36 steel and for the mantle, which is housed at the bottom of the "Velaria" deck, the use of a Serge Fluitop-Ferrari-T2-1002 membrane was proposed, with an RK (daN/5cm) 420/420 resistance, and a (t/m) 50/50 elasticity module.

KEY WORDS: Analogous adequacy, transformable architecture, construction details, design of structures, organic-structural geometry.

Recibido: abril 16/2013

Evaluado: septiembre 2/2013

Aceptado: septiembre 13/2013

INTRODUCCIÓN

El presente estudio surgió por la realización en conjunto de un grupo de investigación dedicado a elaborar espacios flexibles en la arquitectura, cuyo proyecto fue financiado por el Programa de Mejoramiento del Profesorado (Promep), donde se pudieron experimentar las dimensiones y los funcionamientos de dicha estructura, por lo cual también se hizo el prototipo para elaborar su fabricación posterior, con ello justificamos que este tipo de sistemas —las estructuras compuestas por elementos traccionados y comprimidos— son estructuras altamente eficientes por el gasto mínimo de material que requieren, y gracias a su ligereza llegan a cubrir grandes claros. A lo largo de la historia el hombre se ha servido de la fuerza de gravedad para conseguir la estabilidad. En las bóvedas y cúpulas de la antigüedad, construidas con piedras y ladrillo, elementos constructivos que trabajan predominantemente a compresión, esta característica era muy desfavorable en la relación entre el peso propio y la resistencia, es decir, para asegurar la resistencia de la estructura era necesario la construcción de muros de grandes espesores, lo que producía inevitablemente que el peso propio era superior al de las cargas externas (nieve o viento) que la estructura debía resistir, gestando grandes masas nada funcionales para los espacios por cubrir.

Con la aparición de materiales eficientes, ligeros y de alta resistencia fue posible ir reduciendo los espesores de los elementos estructurales de estas construcciones, y en la actualidad se ha logrado que el peso propio de una cúpula es incluso menor al peso del aire que envuelven. Tal es el caso de la cubierta The Eden Project en Inglaterra, diseñada por el arquitecto Nicholas Grimshaw, cúpula formada por almohadones neumáticos de lámina plástica de poco espesor, con aire comprimido internamente y estructura de marcos de aluminio.

Este gran avance en el mundo de las estructuras fue posible debido a la manufactura de materiales cuyo peso propio y rigidez son casi despreciables, y son trabajadas bajo una lógica estructural que los hace poco deformables, aun estando solicitadas por cargas externas. Esta aparente resistencia se logra con la geometrización de las estructuras, encontrando formas que favorecen el equilibrio estructural de las formas geométricas, con esto se mejoró la distribución de los esfuerzos; ejemplos de este tipo de geometrías son la parábola, la catenaria, la circunferencia, el elipse, este tipo de formas ayudan a sustentar grandes claros, generando tipos de estructuras nuevas, en el caso de esta investigación nos avocaremos a la búsqueda de sistemas plegables tensados, que tengan capacidad de replegarse, moverse y erigirse en otro lugar, lo que aumenta considerablemente las posibilidades de adaptarse en casi cualquier entorno.

Posteriormente se tratará de desarrollar la geometrización de modelos plegables que puedan



Figuras 1 y 2.
El tensegrity es un sistema que se puede adaptar a muchas formas geométricas, ya que su propiedad más importante es el mínimo de requerimiento de material para formar una estructura
Fuente: Morales (2009).

simularse con ayuda de software para realizar el análisis de segundo orden de estructuras plegables, ya que este tipo de estructuras pueden ubicarse dentro del campo de las estructuras transformables, dado que precisan de mecanismos en las uniones para materializarse y pueden retornar a su estado inicial. En este sentido hemos elaborado una clasificación, o más bien una ordenación sistemática de los tipos de estructuras transformables, elaborando una propuesta que incluye, dentro de esta categoría, las cubiertas retráctiles tensadas. Esta clasificación no debe considerarse como definitiva, sino como una base de partida, con posibilidad de ser alterada o modificada.

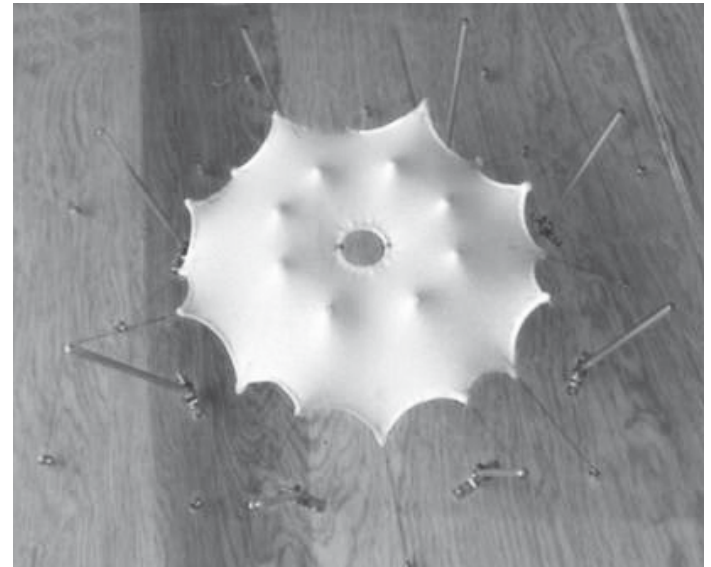
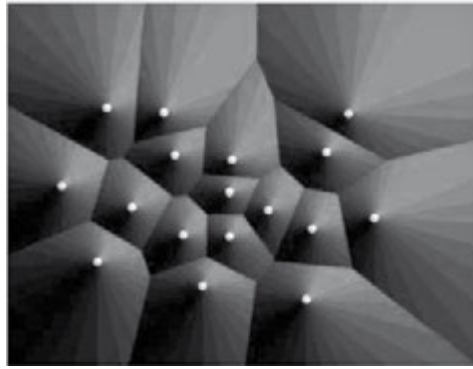
Finalmente, una vez teniendo los parámetros necesarios se tendrá un planteamiento para proponer y definir aproximaciones o resultados de los estudios previos y análisis comparativos de prototipos con el objetivo de demostrar la viabilidad de la propuesta y experimentar con diferentes materiales y con modelos a escala, con la finalidad de seleccionar el material idóneo que facilite más prestaciones.

METODOLOGÍA Y PLANTEAMIENTO

Para entender el proceso de esta investigación es importante comentar acerca de las adecuaciones geométricas estructurales que se realizaron en el espacio de este proyecto en específico. Así, primero observamos las morfologías conceptuales de la naturaleza en las que se desarrollarán diferentes tipos de experimentos en donde se utiliza la metodología de diseño análogo, con referencia a las estructuras de la naturaleza (figura 1), lo que permitirá entender la producción de espacios y

► Figuras 3 y 4.
La velaría es concebida por medios geométricos diferentes y tiene casi el mismo patrón de crecimiento

Fuente: Morales (2009).



► Figuras 5 y 6.
El sistema neumático está formado por membranas llenas de aire, algunas constituidas por arcos que tienen la forma biónica de un gusano enroscado

Fuente: Morales (2009).



estructuras biónicas. En esta se trasladó la figura biónica y orgánica para producir modelos iconográficos que servirán de guía en la producción de tecnología estructural flexible. Por ello, se verá la mecanización de las estructuras plegables, lo que ayudará a comprender cómo se pueden adaptar las estructuras fragmentadas en la naturaleza.

El concepto de plegabilidad en la estructura también permite generar formas orgánicas en su piel, provocando la integración de la forma en su contexto. La piel es la parte de un ser viviente que ayuda a ajustar su adaptación al clima de su entorno; así que, el desarrollo de la piel de un ser viviente se despliega en referencia a la conformación del clima (figura 2). En cuanto a la estructura biónica orgánica se tomarán en cuenta la traslación y los conceptos desarrollados anteriormente.

El primer paso consiste en observar la naturaleza y así descubrir trazas celulares reticulares cuyo patrón de crecimiento orgánico es con base en la geometría orgánica segmentada, para crear un cuerpo complejo y de varias figuras itinerantes. Al adaptar este concepto de crecimiento progresivo fractal a los sistemas estructurales encontramos que el desarrollo de las velarías se basa en un mismo principio de iteración, ya que su geometría se constituye con dobles curvaturas (figura 3) que se desarrollan empezando con una curva y se multiplican hasta generar las membranas parabólicas, las cuales se segmentan en varias formas para generar diversos tipos de modelos. Estas se estabilizan cuando se traccionan en sus extremos, ayudadas por medio de postes que tensan la membrana para formar las dos curvas perfectas (figura 4). Ya se ha comprobado que esta geometría

parabólica también se puede utilizar en otros tipos de sistemas estructurales, en donde la subdivisión de la curva parabólica generó la forma del modelo estructural del edificio. Candela hizo uso de ella en repetidas ocasiones y segmentaba la parábola hasta crear un espacio con mucho movimiento.

Otro ejemplo de esta observación análoga de crecimiento orgánico con los sistemas estructurales ligeros se ve en las estructuras hinchables (figura 5), estas también tienen la propiedad de subdividirse en muchas secciones y formar sistemas estables gracias a una membrana llena de aire. Uno de los seres que tiene la forma de estructuras hinchables es el gusano de seda, el cual es un buen ejemplo de bioforma hinchable, su forma de anillos enroscados le da la flexibilidad de protegerse y de adaptarse rápidamente a su entorno gracias a las uniones flexibles que tiene en sus arcos biónicos, que le dan estabilidad y fuerza a su cuerpo. La estructura inflable tiene su principio estructural en la membrana inflada de aire, ya que empuja a la membrana hasta estar tensa y actuar como módulo de compresión. Al igual que un gusano se adapta y se subdivide en segmentos itinerantes, en que la estructura se mantiene erguida, se combina la forma geométrica con el sistema inflable (figura 6). Frei Otto utilizó las membranas inflables para construir espacios de manera rápida y económica, con esto se podrían generar grandes espacios; él subdividía las formas de la membrana para generar formas naturales geométricamente, en las que se apreciaba mucho el ritmo fractal que tiene la naturaleza, aunque él solo buscaba la eficiencia del material y la geometría que lo estabilizaba por la forma.

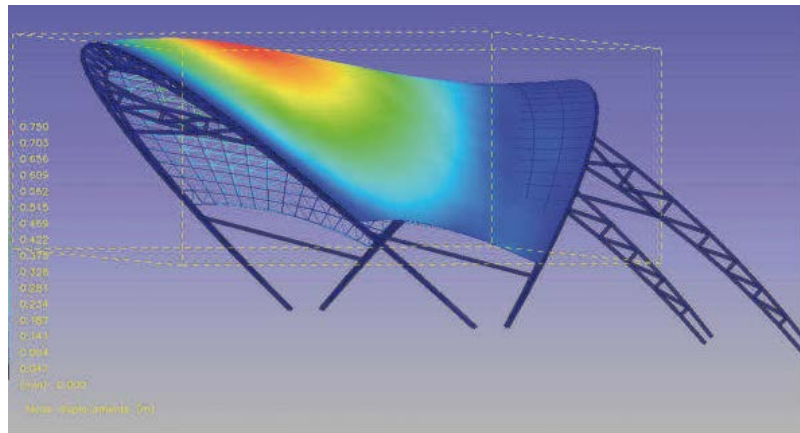
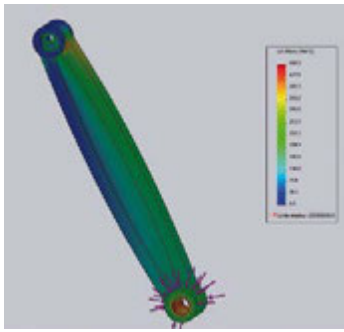


Figura 7
La simulación predimensionará las piezas del sistema estructural de los modelos para formar parámetros de seguridad dentro de la estructura
Fuente: Morales (2009).

Figura 8
La simulación estructural ayudará a desarrollar modelos flexibles generando la estabilidad estructural de la geometría de los modelos
Fuente: Morales (2009).

DESARROLLO PARA LA SIMULACIÓN

Posteriormente se planteará un ejemplo de traslación geométrica y se analizará la geometría realizada por medio de la simulación estática, para generar los primeros vestigios de tecnología estructural. También es importante mencionar que los comportamientos de las estructuras se exponen a escala real adecuación análoga, geometría orgánica-estructural, detalles constructivos, arquitectura transformable, diseño de estructuras, lo que servirá para predimensionar los miembros estructurales que se tendrán en el modelo arquitectónico de la propuesta geométrica de la investigación. Con el fin de adecuar los modelos a una producción real, se realiza el primer acercamiento que consiste en someter el modelo a cargas gravitatorias y de vientos (figura 7). La jerarquía de seguridad de la simulación se genera por medio de del software Staad Pro¹, WinTess² 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 arrojen sus gráficas de momentos, cortantes y respectivos esfuerzos interiores.

El rango de factor de seguridad que se manejará será el código del LRFD (McCormac, 2000), que toma un rango de seguridad de 1 a 1,05 de resistencia del material (acero), con una relación de esbeltez KL/r de 240 en elementos principales y de 300 en miembros secundarios y de contraventeos. De igual manera, la combinación de carga para el sistema se manejará por el mismo código de resistencia y estabilidad. También se considera el desplazamiento horizontal y vertical para que no exceda el límite de servicio de la estructura establecido en el reglamento del Distrito Federal. Adicionalmente, se verán todos los gráficos de tensión para verificar en dónde hay mayores esfuerzos y cómo estos interactúan dentro de la estructura. Posteriormente, con esta información se desarrollarán las uniones adecuadas para resistir estos esfuerzos en sus nodos.

La selección de los miembros se propondrá de acuerdo al diseño de la geometría: se diseñarán

perfiles de forjado en frío y tubos de acero estándares para una mayor efectividad en el diseño de estos modelos, pues la propiedad de este material ayuda a reducir considerablemente la dimensión de los miembros. Asimismo, la utilización de este forjado ayudará, en los primeros modelos de cálculo, a gestionar la dimensión de sus miembros. Se escogerán con una nomenclatura A36, que es un acero estructural que tiene un límite de fluencia mínima de 2.530 kg/cm^2 y un módulo de ruptura de 4.080 kg/cm^2 . Los requerimientos de diseño que se escogerán para el cálculo de resistencia del material isotrópico son: módulo de elasticidad del acero $2'100.000 \text{ kg/cm}^2$, con un coeficiente de Poisson para acero de 0,27 para diseñar, para más rigidez 0,30. Estas características del material se propondrán para predimensionar los miembros de la geometría de diseño de esta investigación.

Otros parámetros que se considerarán son los tipos de apoyos que tendrán los modelos, estos determinarán la estabilidad de la estructura, así como la combinación de cargas que se analizarán en la misma para hacer una aproximación de diseño de sus miembros. También se definirán los parámetros estructurales dentro de la geometría (figura 8). Por consiguiente, este resultado será una guía para el comportamiento de los esfuerzos en la estructura. La simulación estática nos brinda una visión más clara de la dimensión que pueden llegar a tomar estas adecuaciones geométricas y cuáles serán sus límites de claro para cubrir en un espacio.

Cabe mencionar que se tomarán las cargas especificadas en el reglamento y el material escogido experimentalmente. La investigación no destina ninguna función espacial a la estructura biónica, ya que el modelo no cuenta con ninguna funcionalidad en específico. Estos parámetros se toman en cuenta dependiendo de la localización del proyecto, pero para este caso, se determinará la localización en Poza Rica, con una función espacial de nave industrial, determinando los siguientes parámetros:

Por reglamento de DF las cargas asignadas son: carga muerta: 30 kg/m^2 , carga viva máxima: 40 kg/m^2 , carga viva accidental: 20 kg/m^2 .

Para determinar las cargas horizontales que afectan a la estructura serán consideradas las de

1 Software de análisis estructural de primer y segundo orden, www.bentley.com/es-MX/Products/STAAD.Pro/.

2 Software de análisis estructural de segundo orden y fuerza desequilibrantes.

viento, ya que su peso no es considerable, siendo así la determinación de la velocidad del viento en una edificación, que según el reglamento del DF será:

$$V_p = F_{rt} \times F_{\vartheta} \times V_r$$

F_{rt} = Factor de Corrección (presión)

F_{ϑ} = Factor de Variación de la velocidad con respecto a la altura

V_r = Velocidad Regional

Para este caso, el factor de presión que le corresponde a esta estructura será, según el reglamento, de $V_{50} = 36 \text{ m/s}$ Por, tanto, $36 \text{ m/s} / 1000 \text{ m} = 0,036 \text{ k/h}$

$$V_p = 36 \text{ m/s} (1 \text{ km}/1000 \text{ m}) (3600 \text{ s} / 1 \text{ h}) = 129,6 \text{ km/h}, \text{ esto entre los puntos de los nodos.}$$

Por último, el análisis comprobará que las piezas estructurales serán efectivas para los modelos geométricos, cuáles son sus zonas más afectadas y en dónde se tendrán que reforzar para una óptima estabilidad estructural. También proporcionará la verificación de los límites de servicio y resistencia, que definirán el esqueleto final de la estructura (Morales, 2009; Moore, 2000).

RESULTADOS

MORFOLOGÍA GEOMÉTRICA ADECUADA A LA ESTRUCTURA (METODOLOGÍA CIENTÍFICA)

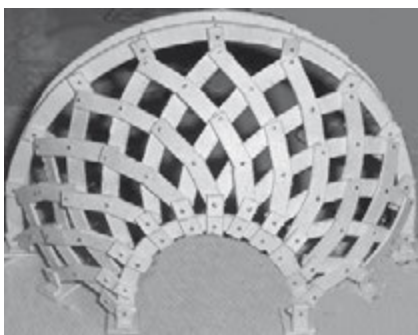
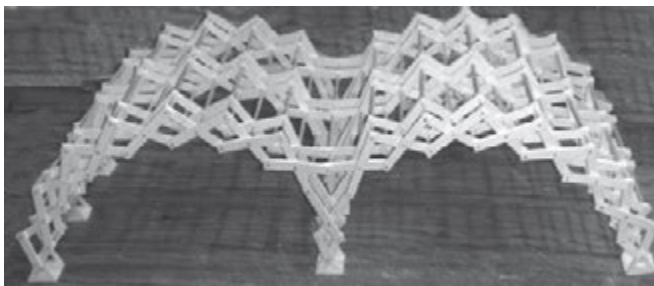
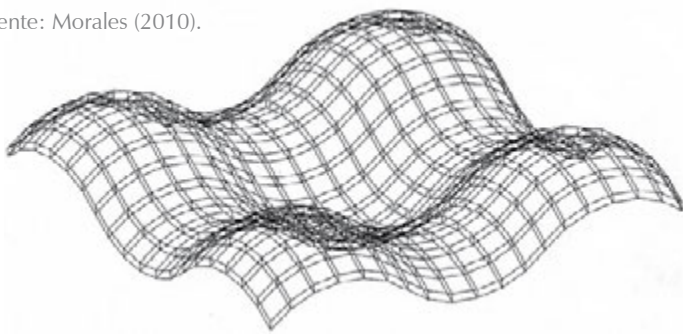
En la búsqueda de nuevas tecnologías, el uso de la biónica orgánica facilitará la creación de otras formaciones de espacios en la arquitectura; la morfología-conceptual, la adecuación geométrica y el desarrollo de adecuación-estructural serán los parámetros en los que se basará la metodología de esta investigación y es la misma que se ha venido utilizando durante todo el estudio para generar geometrías estructurales flexibles con base en la biónica. Con el estudio análogo y la observación de la figura estructural de organismos, en este caso la geometría fractal compleja nos ayudará a concebir varias formas más aproximadas a las que genera la naturaleza, ya que su formación de diseño se elaborará por iteraciones que nos producen múltiples geometrías (figuras 9 y 10), pero en este tema solo se utiliza para generar principios de diseño. A fin de entender un poco lo que se hará en la siguiente metodología, se presentará de manera descriptiva cómo se desarrollarán los modelos a escala, en donde se encontrarán las pautas necesarias para el desarrollo de dicho sistema estructural flexible.

Para comprender cómo se verá la aplicación aproximada de dicha metodología de la experimentación, se realizará en primer lugar una geometría celular fractal. El concepto que se toma es la modulación y la adaptación de la estructura en el espacio; al observar esta retícula modular podemos implementar una geometría que sea posible reproducir varias veces e integrar su estructura geométrica en el espacio; para generar esta retícula nos vamos a los principios fractales, que consisten en la segmentación de una figura varias veces, en este caso se construyó una malla reticular plegable con una figura en forma de "X" (figuras 11, 12 y 13), dicha figura sustenta el principio de la geometría plegable que se realizará en la etapa de la experimentación en esta investigación.

Continuando con este ejemplo, de la otra figura orgánica se analiza la geometría de una cúpula, en ella se observa una figura en "X" ligeramente desviada con ángulos más cerrados en su punta inferior y más abiertos en su parte exterior

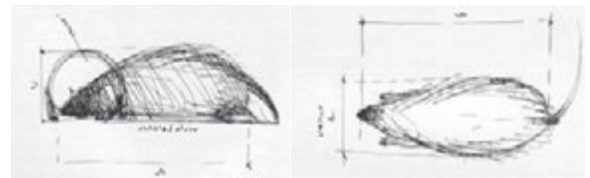
Figuras 9 y 10.
La figura principal de la estructura plegable la constituyen los arcos principales que sostienen la edificación

Fuente: Morales (2010).



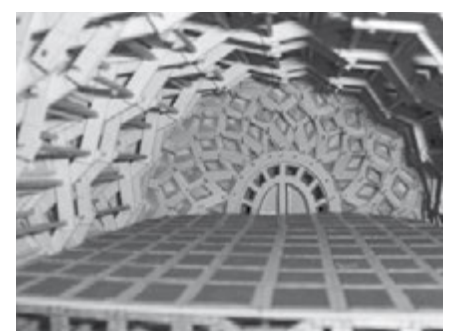
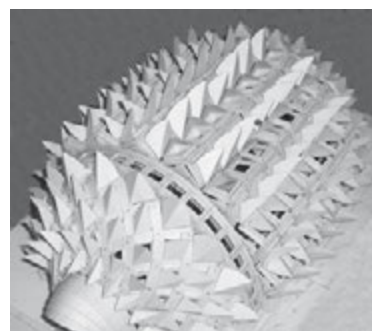
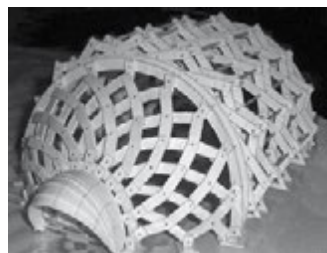
Figuras 14, 15 y 16.
La piel que se desarrolla protege de la incidencia solar y capta los vientos dominantes en su parte abierta

Fuente: Morales (2010).



Figuras 11, 12 y 13.
La geodésica está hecha con base en formas de "X", que se unen en forma radial y en un extremo los ángulos son más cerrados

Fuente: Morales (2010).



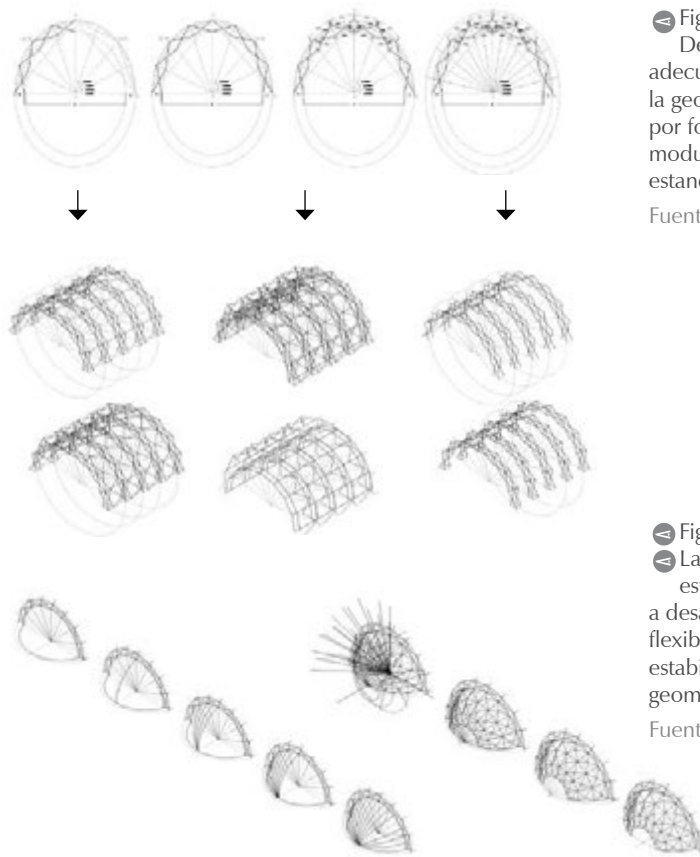
(figuras 14, 15 y 16), la unión de estas piezas geométricas crea una cúpula geodésica circular rebajada y plegable en ambos sentidos, su forma geométrica se puede repetir varias veces y generar un organismo espacial más grande, esta se realiza con materiales que puedan sustentar un principio de la forma como sistema de fabricación, teniendo en cuenta que se tomarán para desarrollar la estructura posteriormente (Morales 2010).

Siguiendo con este hilo conductor del experimento se elaborará la geometría anterior del ejercicio, en la que se desarrollarán sus vértices mediante un software especializado (autocad)³, este modelo tridimensional creará la adecuación geométrica de la investigación, desarrollada por los aspectos geométricos fractales, que dominará la concepción de este proyecto (figuras 17, 18, 19 y 20), su principal característica es la función plegable de la estructura, la cual está hecha de láminas en forma de X, estas se pliegan en un sentido y cuando se abren forman un arco grande.

Además, se diseña de forma que al recibir la presión esta absorba las fuerzas del ambiente y que, a la vez, amortigüe las diferentes coacciones que influyen en su contexto. Primero se esquematizó la figura biónica en un dibujo, en donde se analizó su forma y su geometría; esta desarrolla su esqueleto, su geometría nace de un punto central de circunferencia el cual le da una forma cilíndrica a la armadura plegable (figuras 21 y 22), esta estructura puede interactuar en varias repeticiones puesto que la malla plegable está constituida con tres arcos principales unidos por vigas que hacen que tenga mayor envergadura y estabilidad, los marcos pueden unirse repetitivamente en ambos sentidos.

La constitución del experimento es la figura biónica, su cuerpo de forma cónica y sus delimitaciones representativas de una cúpula geodésica generan la forma de la propuesta biónica plegable, tal experimentación geométrica se limita por la falta de infraestructura de equipamiento de cómputo, lo que impide experimentar diferentes disposiciones del sistema reticular (Morales 2010).

La simulación estática es una herramienta de vital importancia para la investigación y la experimentación del proyecto, con ella se realizará la comprobación de la tecnología estructural. Como podemos apreciar en este ejemplo, tomamos la anterior adecuación que se desarrollará para esta etapa del estudio del proyecto, en la que el sistema está constituido por una serie de marcos plegables en forma de "X"; la cubierta se comporta bidireccionalmente y termina en sus extremos con una cúpula geodésica que absorbe la fuerza de empuje en sus armaduras en "X", los miembros de esta armadura funcionarán bien por la forma geodésica y la articulación del modelo. Para esta simulación se especificó que el material sería un acero A36 con un módulo de elasticidad de 2530 kg/cm²



Figuras 17 al 20. Desarrollo de una adecuación orgánica a la geometría generada por formas y miembros modulares para su estandarización e iteración. Fuente: Morales (2010).

Figuras 21 y 22. La simulación estructural ayudará a desarrollar modelos flexibles generando la estabilidad estructural de la geometría de los modelos. Fuente: Morales (2010).

y un factor de Poisson⁴ de 0,3 con densidad de 7,83847 ton/m. Las piezas seleccionadas son de tubos OCXXE89 para miembros de unión principal, los atiesadores están conformados por tubos OCXXE73⁵, para las armaduras plegables en el espacio grande se propusieron piezas tubulares OCXXE89, ya que los miembros circulares tienen un radio de giro mayor y su excentricidad es óptima para el diseño de este tipo de estructuras.

Para los miembros plegables de la geodésica se propuso un perfil tubular en frío de OCEXX, 60, los apoyos están sujetos en Y, Z y están libres en el sentido de las X por la armadura plegable; los apoyos de la geodésica están sujetos en Y, X y están libres en Z. La segmentación de la geometría trabaja como una armadura en una sola dirección al igual que la geodésica; las vigas que ligan las armaduras están unidas por apoyos relajados en sentido Y, Z, todo este parámetro servirá para óptima seguridad y estabilidad estática de su geometría, la cargas establecidas por el reglamento de normas técnicas complementarias del DF serán una carga muerta de 30 kg/m² y carga viva accidental de 20 kg/m². La carga de peso propio la realizará el software Win Tess y Stad Pro (figuras 29 al 32). Este ejercicio solo se someterá a una combinación de cargas por peso propio y cargas de vientos en X de 116,1 kg/m y 64,7 kg/m en Y, con un total de 132,9 km/h. Con estos parámetros se tendrán los resultados efectivos para el

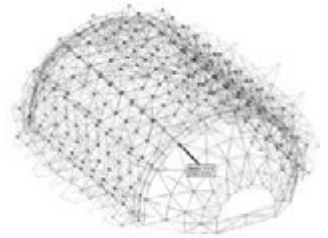


Figura 23. El tipo de desplazamiento que puede tener el modelo, en este caso, como solo se analizó por peso propio para predimensionar sus miembros, pasa ampliamente el rango de seguridad permitido. Fuente: Morales (2009).

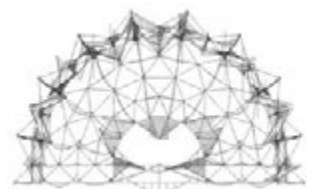


Figura 24. La gráfica de momentos nos servirá para diseñar las uniones de los miembros, estos influyen más en el arco de la geodésica puesto que ahí se concentrará todo el empuje de una dirección hacia ese arco. Fuente: Morales (2009).

⁴ El coeficiente de Poisson se define como una constante elástica del material que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isotrópico cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento (Segui, 2000).

⁵ Miembros tubulares estándar con nomenclatura OCXXE de acero son fabricados en México para distintas aplicaciones en la construcción de estructuras metálicas (Imca, 2005).

³ Software de diseño asistido por computadora, <http://mexico.autodesk.com/adsk/servlet/pc>.

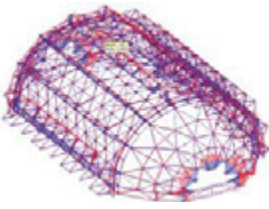


Figura 25. En la imagen vemos cómo las gráficas de cortantes influyen en el modelo, en las direcciones en X y Z, donde podemos observar que inciden en el arco de unión

Fuente: Morales (2009).

	Desplazamientos			
	Node	Horizontal X mm	Vertical Y mm	Horizontal Z mm
Max X	228	11.604	1.691	1.204
Min X	192	-10.775	1.627	1.207
Max Y	222	9.656	1.885	1.210
Min Y	208	0,393	-10,374	0,030
Max Z	446	0,468	-1,295	2,341
Min Z	331	0,497	-1,272	-2,297
Max rX	554	0,591	0,004	2,029
Min rX	439	0,620	0,028	-1,990
Max rY	426	-0,586	-0,868	-1,740
Min rY	541	-0,665	-0,815	1,733
Max rZ	288	2,795	0,929	-0,007
Min rZ	269	-2,398	0,832	-0,000
Max Rst	228	11.604	1.691	1.204

Tabla 1. Análisis estructural de la estructura retráctil
Fuente: Morales (2009), el análisis se realizó con un software Staad. Pro, donde se simuló su comportamiento estructural.

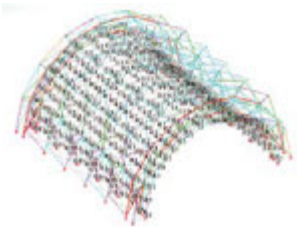


Figura 26. En la imagen vemos cómo en la simulación matricial se puede comprobar cómo interactúa la estructura con otros materiales, los cuales nos dejan el umbral de seguridad que puede tener la cubierta retráctil

Fuente: Morales (2012).

	Momentos			
	Node	Horizontal Fx Mton	Vertical Fy Mton	Horizontal Fz Mton
Max Fx	168	4,326	0,010	0,000
Min Fx	99	-5,034	0,023	0,000
Max Fy	415	1,401	0,387	0,128
Min Fy	510	1,225	-0,285	0,158
Max Fz	236	-0,021	0,014	0,790
Min Fz	219	-0,024	0,014	-0,783
Max Mx	477	0,159	-0,006	-0,014
Min Mx	362	0,173	-0,005	0,014
Max My	456	-0,021	-0,014	0,790
Min My	236	-0,021	0,014	0,790
Max Mz	512	0,761	-0,088	0,007
Min Mz	373	1,416	0,385	0,128

Tabla 2. Análisis estructural de la estructura retráctil
Fuente: Morales (2009), el análisis se realizó con un software Staad. Pro, donde se simuló su comportamiento estructural.

	Cortantes			
	Node	Horizontal Fx Mton	Vertical Fy Mton	Horizontal Fz Mton
Max Fx	334	1,440	1,159	0,000
Min Fx	456	-0,924	1,234	0,000
Max Fy	483	0,309	2,201	0,000
Min Fy	24	0,000	-1,805	-0,129
Max Fz	167	0,000	-1,355	1,345
Min Fz	13	0,000	-1,403	-1,346
Max Mx	538	-0,190	0,588	0,000
Min Mx	423	-0,184	0,512	0,000
Max My	341	-0,922	1,224	0,000
Min My	456	-0,924	1,234	0,000
Max Mz	485	-0,246	1,457	0,000
Min Mz	374	0,161	1,600	0,000

Tabla 3. Análisis estructural de la estructura retráctil
Fuente: Morales (2009), el análisis se realizó con un software Staad. Pro, donde se simuló su comportamiento estructural.

dimensionamiento de los miembros estructurales de la estructura retráctil (tablas 1, 2 y 3).

La simulación de estos parámetros de diseño nos da como resultado la estabilidad de la estructura. Como primer punto del ejemplo se verificarán la gráfica de cortantes, de momentos y los desplazamientos dentro de la estructura (figuras 23, 24 y 25), en donde sus límites de servicio no deben exceder a lo permitido en Reglamento de Construcción del Distrito Federal (RCDF)⁶, en este caso, como los desplazamiento en vertical son L/240 (en donde L es el claro del miembro), y el horizontal es (Hx.012) x 100 + 0,5 (en donde H es la altura del nodo), con estos datos se obtendrán los parámetros de desplazamiento permitidos en el modelo. De acuerdo con los resultado de desplazamientos máximos se hará la siguiente operación:

- El desplazamiento vertical tomará el máximo resultado en Y, por tanto, $L = 2,5$ puesto que su longitud tiene 2,5 m de claro entre la armadura: $2,5/240 + 0,5 = 0,050104 \text{ m} \geq 0,01037 \text{ m}$ pasa por desplazamiento vertical.
- En el desplazamiento horizontal se tomará el máximo resultado en X, por tanto, $H = 4,93$, su desplazamiento se localiza en la parte media de la estructura: $(4,93 \times 0,012) \times 100 + 0,5 = 0,064 \text{ m} \geq 0,0116 \text{ m}$ pasa por desplazamiento horizontal; cabe mencionar que este procedimiento se tendrá que hacer con todas la combinaciones de carga, pero por el momento servirá como ejemplo para esta disertación de trabajo, y hasta que se verifique la viabilidad de este prototipo (Morales 2010).

En cuanto al manto, las tensiones fueron sometidas al programa Win Tess, este analiza la interacción de la estructura con el manto de velaría en la que podemos verificar que el Ratio de seguridad no debe exceder de 1,0 (figura 26) aunque este parámetro solo se tomó de referencia, ya que en Stad Pro genera los miembros que estarán en la estructura de diseño. En Win Tess se tomaron las tensiones de los nodos y las barras del manto, ya que la teoría con la que se calculó fue por nodos y barras; como podemos observar, el programa corrigió la geometría de la velaría que se tenía proyectada, ya que en la búsqueda de la forma se hicieron los cálculos con bajas densidades de fuerza; esto quiere decir que las curvas se asemejan más a la realidad, por las fuerza de tracción y compresión que se originan por el propio peso del material utilizado. Para este trabajo se utilizó una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002, con una resistencia de $RK(\text{daN}/5 \text{ cm}) 420/420$, módulo de Elasticidad (t/m) 50/50, este proyecto se completa con dos grandes cúpulas a sus costados, mismas que en este momento están en etapa experimental, pues en esta etapa solo se resolvió la cubierta más grande (Morales 2012).

⁶ Este es un parámetro de diseño y seguridad que se debe seguir de dentro del país. <http://cgsestados.df.gob.mx/prontuario/vigente/385.htm>.

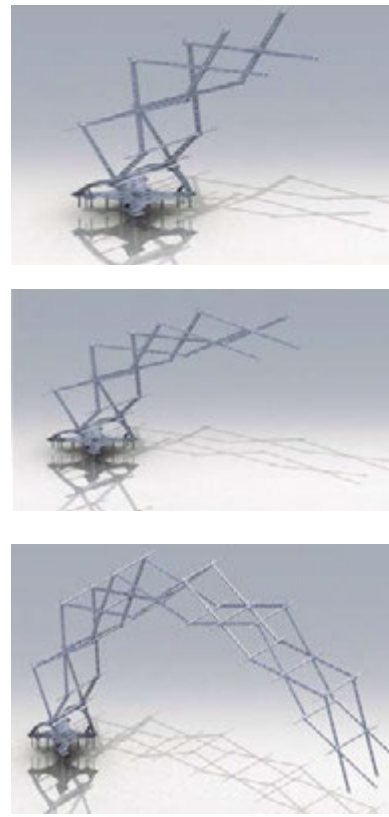
Siguiendo con la construcción del prototipo llegamos a la etapa que es la de mayor importancia: trasladar la información que llegará a obtener la morfología del concepto y la simulación estática de los software (Staad Pro y Win Tess), en donde encontraremos que podemos realizar de manera experimental el producto en un software especializado (Solid Work), este ayudará a generar las piezas ya antes comprobadas en la simulación estructural, posteriormente se diseñarán las uniones mecanizadas en la estructura. Este paquete informático es ampliamente conocido en la ingeniería industrial como uno de los programas más completos para la elaboración de prototipos, también este mismo paquete contiene subapartados en los cuales la estructura será recalculada con análisis del elemento finito, así como el del comportamiento de las uniones mecanizadas retráctiles. Por la singularidad de la forma que posee hay la certeza de que podrá soportar tales cargas en todo el sistema (figuras 27, 28 y 29). Se empezó con varios prototipos que nos ayudarían a verificar si el movimiento mecánico era el más óptimo para la estructura retráctil de la cubierta, pero algunos de ellos no eran elegibles para su fabricación, pues el costo de sus miembros era demasiado alto.

Otra forma importante del proyecto es construir el prototipo a escala con materiales adecuados en donde se puedan apreciar sus detalles constructivos, ya que en estos se analizarán las uniones retráctiles, que son las que generarán la singularidad del proyecto y el parte de aguas tecnológico de la investigación (figuras 30 y 31). Para comprender esto se expone como ejemplo un prototipo a escala 1:20 y 1:10, estos tendrían que desarrollarse con materiales como balsa o aluminio y generarlo en una escala mayor consecutivamente, así se podrá apreciar el movimiento de sus uniones, ya que en las imágenes se puede observar que la escala es todavía muy pequeña, por lo que el material es difícil de manipular ya que su resistencia es muy poca, pero deja en claro el camino que se debe tomar para la realización final del modelo del proyecto de investigación (Morales, 2010).

Posteriormente concluimos de manera parcial con el análisis anterior y desarrollamos detalles estructurales en donde se verificó que la estructura tendría que ser a partir de nodos articulados en dos direcciones, para que su plegabilidad fuera óptima. En la siguiente descripción de los dibujos se detallan los diseños para la construcción de las uniones de la cubierta ligera (figuras 32, 33). Primero se presenta el dibujo general de la cubierta tensada, en el que se destaca su gran envergadura, que puede cubrir un claro de 25 m transversalmente y 27,5 m longitudinalmente, es por ello que la piel es una pieza clave para el desarrollo de los detalles, se seleccionó una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002, ya que en los anteriores cálculos se analizaron los efectos de las cargas en la estructura, es por ello que en esta parte la piel seleccionada interactúa óptimamente con todo el sistema.

En consecuencia, se proponen algunos modelos (figuras 34 al 37) en los que podemos observar que los nodos están compuestos por un nodo central articulado, unidos con tuercas, y un *bushing* de 1" de espesor para darle la facilidad de girar, esto es, para que los miembros conectados puedan plegarse. En la parte superior los nodos están conectados con otro nodo compuesto que ayuda a conectarse con miembros que hacen la figura del contraventeo, en este caso, los contraventeos y los nodos de unión que los conectan se componen por un nodo esférico con cuatro brazos, estos contribuyen a que tengan un tope que ayude a sujetar y también a facilitar el giro sobre sus ejes, a fin de adecuar la geometría del contraventeo. En la parte inferior de los nodos principales se sujeta un atizador que ayuda a estabilizar y a dar rigidez a la estructura. Los nodos principales de la parte inferior están sometidos a detalles sujetadores de pretensado que ayudan a mantenerlos unidos con el manto de la membrana.

Estos detalles del manto (figuras 38 al 41) se componen por accesorios que ayudan a estabilizar el manto, por lo regular están compuestos por



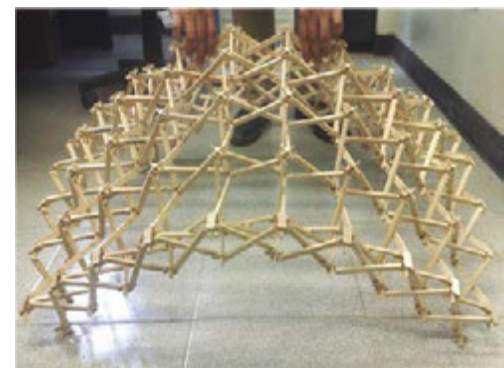
▲ Figuras 27, 28 y 29.
▲ La tecnología se desarrolla con base en una armadura plegable unidireccional, su anterior trazado geométrico y simulación estructural nos darán parámetros para rediseñar dicho sistema retráctil

Fuente: Morales (2010).



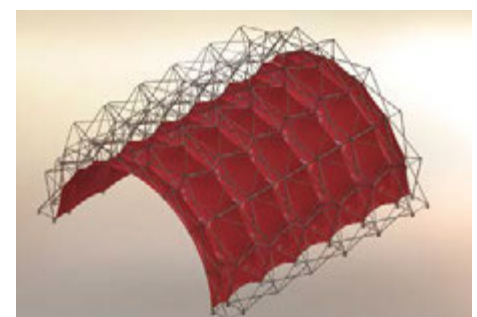
▲ Figuras 30 y 31.
➤ Se analizan modelos a escala para desarrollos constructivos de la estructura flexible, esto generará detalles estructurales para la elaboración del sistema retráctil

Fuente: Morales (2010).



▲ Figura 32.
Volumen parcial del proyecto de investigación de una cubierta retráctil tensada

Fuente: Morales (2012).



▲ Figura 33.
Desarrollo de cubierta ligera retráctil

Fuente: Morales (2010).



un bastón de pretensado que regula el pretensado de la misma cubierta. El accesorio biarticulador hace que la conexión tenga movimiento en dos direcciones, esta estructura tiene movimiento porque la membrana es muy delgada y puede moverse por un pequeño viento, pero no debe hacerlo demasiado ya que entraría en resonancia y podría colapsar; en este caso, el pretensado ayuda a que la geometría se mantenga ideal para dichas tensiones que se llegaron a originar en la cubierta retráctil.

CONCLUSIÓN

El estudio de la tecnología estructural y la industrialización del espacio arquitectónico es el desarrollo principal del tema, el cual se manejó como un sistema de redes y ritmos espaciales, esto da como resultado el diseño de una estructura flexible, adaptable a su contexto en su forma, y versátil para cambiar los espacios. El diseño consistió principalmente en la elaboración de un nodo, el cual podía unir dos elementos creando un sistema estructural muy flexible y resistente.

El resultado de ello fue elaborar los detalles de la estructura retráctil, ya que son parte vital del todo. El sistema está envuelto de un manto hecho de un material tensado, llamado velaría, que tiene la propiedad de ser muy ligero, y que abrió el paso para que se recalculara con un software llamado WIN TESS, que calcula estructuras de segundo orden, porque el material entra en la zona de plasticidad; dichas estructuras siempre deben estar tensadas, con fuerzas que equilibren su capacidad portante, en este caso, la tracción y la compresión;

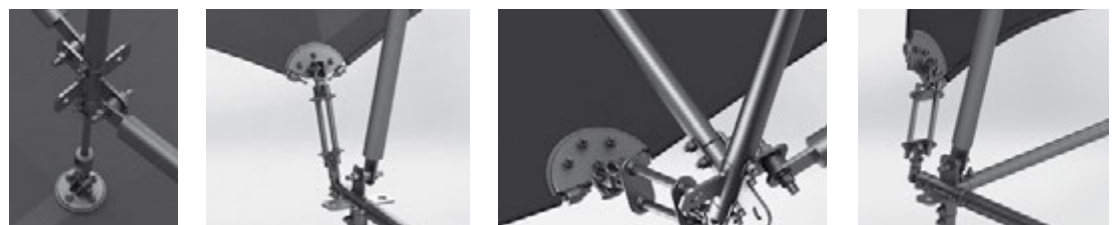
de esta manera se resolvió la estructura para este caso, ya que era de vital importancia conocer las tensiones dentro de la velaría, con lo que se obtuvo un buen resultado al detallar esta estructura en la que se diseñaron las uniones en donde la cubierta tenía que estar biarticulada a fin de que tuviera los suficientes grados de libertad para su posterior construcción.

Este sistema estructural retráctil está en la etapa de elaboración a escala 1:1, se construye un módulo de ocho piezas modulares. Con la construcción de la cubierta retráctil y la estrategia para levantar su estructura, la que tendrá una envergadura muy amplia, este prototipo a escala real ayudará a sustentar su viabilidad y se podrá realizar posteriormente toda la cubierta. En este proyecto se integrarán los detalles de tensoestructura para ver la colocación y el pretensado de dicho manto.

Posteriormente se tiene contemplado realizar la segunda etapa de la estructura, ya que en esta primera parte solamente se realizó la cubierta unidireccional y quedó pendiente la geodésica retráctil rebajada. Es de mucha importancia terminar la cubierta geodésica, ya que en interacción conjunta maximiza su eficiencia estructural; de igual forma, determina el conjunto orgánico de todo el sistema, comprobando la adecuación geométrica orgánica armada metodológicamente, desde el principio de la investigación. Por último, cabe mencionar que dado el buen resultado obtenido en esta investigación, esta ha propiciado el desarrollo de otras líneas, las cuales se podrán experimentar paralelamente para la aplicación del concepto arquitectónico-estructural del prototipo de patente.

Figuras 34 al 37. Se desarrollaron los detalles estructurales de la estructura en un modelo 3D, para que en la siguiente etapa, que es la construcción, se solucionaran tal cual como en el dibujo 3D, con ello comprobamos la traslación del diseño a la ingeniería de simulación estructural; aunque falta comprobar los detalles en el ámbito de la construcción, la relación con la realidad siempre estuvo presente en la elaboración de estos modelos.

Fuente: Morales (2012).



Figuras 38 al 41. Posteriormente se desarrollaron los detalles estructurales de las uniones del manto de la velaría, la importancia de estos detalles estuvo en la colocación del pretensado y el accesorio de biarticulación para propiciar la flexibilidad adecuada y el equilibrio de la cubierta.

Fuente: Morales (2012).

REFERENCIAS

McCormac, J. (2000). *Diseño de estructuras de acero. Método LRFD*. 2 edición. México: Alfa Omega.

Moore, F. (2000). *Compresión de las Estructuras en la arquitectura*. México: McGraw Hill-Interamericana.

Morales, C. C. (2009). *Diseño de sistemas estructurales flexibles en el espacio arquitectónico*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Morales, C. C. (2012a). *Diseño de sistemas flexibles en el espacio arquitectónico*. Madrid: Editorial Academia Española.

Morales, C. C. (2012b). *Diseño de una cubierta retráctil tensada*. Actividad Posdoctoral, Universidad Politécnica de Catalunya.

Morales, C. C. (2013a). *Informe técnico: sistemas estructurales retráctiles*. México: Universidad Veracruzana.

Morales, C. C. (2013b). *Prototipo: diseño de una cubierta retráctil tensada*. México: Universidad Veracruzana.

Reglamento de Construcción del Distrito Federal (RCDF). Recuperado de: <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/385.htm>.

Segui, W. (2000). *Diseño de estructuras de acero con LRFD*. México: Thomson.