



Proceso de diseño de una cubierta con el principio de tensegridad para espacios de esparcimiento

Design process of a roof with the tensegrity principle for recreational spaces

Processo de projeto de um telhado com o princípio de tensegridade para espaços de lazer

José Abraham Mercado Escandón; Arquitecto,
amercado.arquitecto@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-0362-3831>
Candidato a M.Sc en arquitectura.
Universidad Autónoma de Coahuila. México.

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

Recibido: Febrero 13 de 2019
Aceptado: Agosto 2 de 2019
Publicado: Diciembre de 2019

RESUMEN

El objetivo principal de este artículo es mostrar el procedimiento de diseño de una cubierta, soportada por el sistema estructural de tensegridad, e identificar la forma en que trabajan estas estructuras, además de analizar y desarrollar el procedimiento de patronaje para su construcción. Se plantea una cubierta destinada a espacios abiertos, tales como jardines, cafeterías o zonas de trabajo, utilizando una metodología, desde el diseño hasta la comprobación del funcionamiento y estabilidad estructural, por medio de un modelo a escala 1:5, con el cual se identifican áreas de mejora y criterios a tomar en cuenta para su construcción a escala 1:1.

Palabras clave: Tensegridad; Patronaje; Estructura; Cubierta; Membrana tensada.

ABSTRACT

The main objective of this article is to show the design procedure of a roof, supported by the structural tensegrity system, and identify the way in which these structures work, in addition to analyzing and developing the pattern procedure for their construction. A cover is intended for open spaces, such as gardens, cafeterias or work areas, using a methodology, from design to functional verification and structural stability, by means of a 1: 5 scale model, with which improvement areas and criteria to be taken into account for its 1: 1 scale construction are identified.

Keywords: Tensegrity; Pattern design; Structure; Cover; Tensioned membrane.

RESUMO

O principal objetivo deste artigo é mostrar o procedimento de projeto de um telhado, suportado pelo sistema de tensão estrutural, e identificar a maneira como essas estruturas funcionam, além de analisar e desenvolver o procedimento de padrão para sua construção. Uma cobertura é destinada a espaços abertos, como jardins, lanchonetes ou áreas de trabalho, usando uma metodologia, desde o projeto até a verificação funcional e a estabilidade estrutural, por meio de um modelo em escala 1: 5, com o qual são identificadas áreas e critérios de melhoria a serem levados em consideração para sua construção em escala 1: 1.

Palavras-chave: Tensegridade; Padrão; Estrutura; Coberta; Membrana tensionada.

Cómo citar (APA)

Mercado Escandón, J.A., Morales Guzmán, C.C. (2019). Proceso de diseño de una cubierta con el principio de tensegridad para espacios de esparcimiento. Procesos Urbanos. 6:92-100. DOI: <https://doi.org/10.21892/2422085X.460>



©2019 Los Autor(es). Publicado por [CECAR](#)

Revista Procesos Urbanos está distribuido bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0](#) Internacional.

INTRODUCCIÓN

La palabra tensegridad (*tensegrity* en inglés) fue un término acuñado por Fuller, citado por Torné (2008), la cual hace referencia a *tensional integrity*, y se define como un sistema estructural, el que está compuesto por elementos de compresión discontinuos, interconectados por continuos elementos de tensión. Estas estructuras se componen por cables como elementos de tracción, y postes a compresión (Rhode-Barbarigos, Veuve, Hadji Ali, Motro, & Smith, 2013), y por su versatilidad de forma, tienen diferentes aplicaciones.

Las membranas tensadas, o estructuras textiles son una solución para cubrir grandes claros, con elementos muy ligeros. Están compuestas por una estructura principal soportante, como lo son mástiles, postes, arcos y puntales, y la membrana (cubierta), la cual está realizando esfuerzos de tensión (Quivira Catalan, 2009) donde la estabilidad es a través de la canalización de los esfuerzos por medio de la membrana, haciendo un esfuerzo de tracción, hacia los elementos de compresión, creando un equilibrio en todas las fuerzas que actúan en este sistema (Bublik Abufon, 2012).

El sistema de *tensegrity* textil, es una combinación de las membranas tensadas y las estructuras *tensegrity*, en el que los cables o tensores son sustituidos por membranas textiles, creando posibilidades para ser utilizadas en espacios arquitectónicos habitables (Morales Guzmán, 2015). Para la búsqueda de la forma existen diferentes métodos que menciona Morales Guzmán (2018), como el método modelístico, el que consiste en realización de maquetas con materiales flexibles o deformables, como la tela, o el modelado con yeso o arcilla en donde se puede dibujar o diseñar un superficie tensada; el método geométrico, el que se utiliza comúnmente cuando ya se conoce la forma geométrica, y se traza mediante un *software* tipo *Computer-Aided Design* (CAD). Además, existen otros métodos de búsqueda de la forma como el que proponen Popovic & Sakantamis (2003) llamado método *Cacoon*, en el cual las barras de la *tensegrity* son rodeadas por una membrana textil como red de tensión, que permite omitir los cables ya que la membrana hace el mismo trabajo y, a su vez, crea una zona cubierta.

Uno de los arquitectos más importantes para este tipo de estructuras fue Frei Otto, quien después de la edad de 50 años, se dedicó a la investigación de estructuras ligeras, durante la segunda parte del siglo XX. En 1967, Frei Otto construyó el Instituto para Estructuras Ligeras en Stuttgart, en conjunto con un equipo de trabajo, este proyecto era un ensayo a escala real para el desarrollo de un pabellón alemán en la Expo Montreal en 1967. La estructura se compone por dos redes anticlásticas en forma de silla de montar, soportadas por un mástil de 17m de altura. Una vez que el ensayo terminó, Frei Otto hace las modificaciones para transformarlo en un edificio (Malmanger, 2005).

METODOLOGÍA

Esta investigación toma algunos puntos del proceso de diseño del doctor Llorens (2011), citado por Morales Guzmán (2018, pág. 72), siendo la determinación de la forma y el patronaje de la membrana, con fines de investigación y comprobación del funcionamiento estructural para ser construido a escala 1:1 en la siguiente etapa de este proyecto. Por lo que esta etapa corresponde a la experimentación.

Para el desarrollo de esta cubierta se utiliza el método modelístico el cual consiste en la creación de maquetas haciendo uso de materiales como tela, ligas y madera, para la exploración de diferentes geometrías y configuraciones, con el fin de encontrar la forma óptima para la cubierta; y el método geométrico dónde la geometría se construye a través de herramientas digitales de *Computer-Aided Design* (CAD), proceso que consistió en los siguientes pasos:

1. Búsqueda de la forma a través de una maqueta para encontrar la forma deseada, y así conocer los elementos de compresión y tracción que se utilizarán para la *tensegrity*.
2. Sustituir los cables por membranas, los cuales trabajan con el mismo esfuerzo.
3. Construcción de modelo digital para el cálculo de curvaturas.
4. Patronaje de membranas tensadas.
5. Confección de membranas a escala 1:5 para construcción del modelo.
6. Construcción del modelo de la cubierta a escala 1:5 y comprobación de funcionamiento de estructura.

Para la primera etapa, se utilizaron materiales comunes y fáciles de encontrar, siendo hilo, palillos de madera, tela de licra de algodón y ligas. Inicialmente se empezó a experimentar con los materiales, colocándolos de manera aleatoria y, al mismo tiempo, se buscaba una forma que pudiera funcionar como cubierta, obteniendo un módulo triangular que se repite tres veces de manera radial, repartidos equidistantemente (Figura 1) como geometría inicial, mediante el método modelístico.

Se añadieron postes flotantes en el centroide de las membranas con la intención de generar más tensión en ellas, crear una forma con mayor grado de complejidad y una estética más atractiva, esto sin perder la función principal que se buscaba, la de una cubierta ligera (Figura 2), lo que genera una estructura mixta entre membrana textil y tensegridad.

Este método de *form-finding* es utilizado por Morales Guzmán en sus talleres de diseño y patronaje de *tensegrities* y velarias, proceso en el que se realizan maquetas simples, sin escala, de forma que se pueda representar la curvatura de las mallas y de entender el funcionamiento de las estructuras (Figura 3) (Morales Guzmán, 2018).

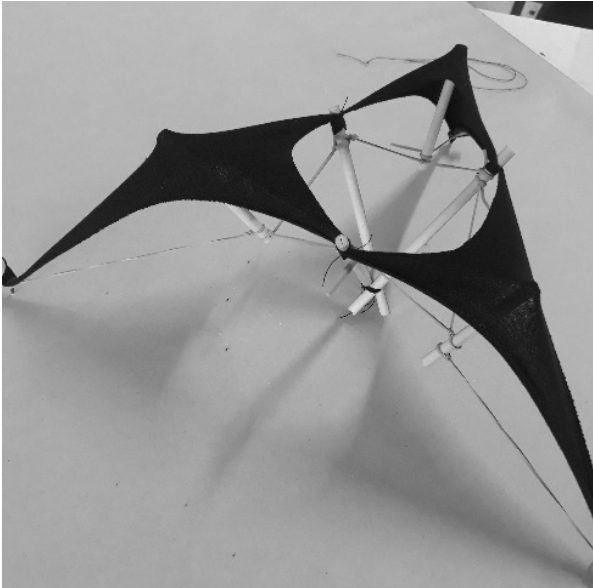


Figura 1. Modelo de figura resultante en taller de *Tensegrity*.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, noviembre 2018.

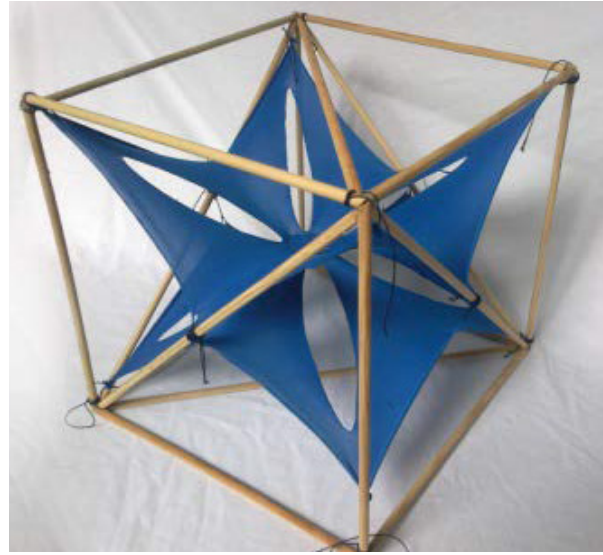


Figura 3. Maqueta experimental para entendimiento de comportamiento de mallas.
Fuente: Morales Guzmán (2018).

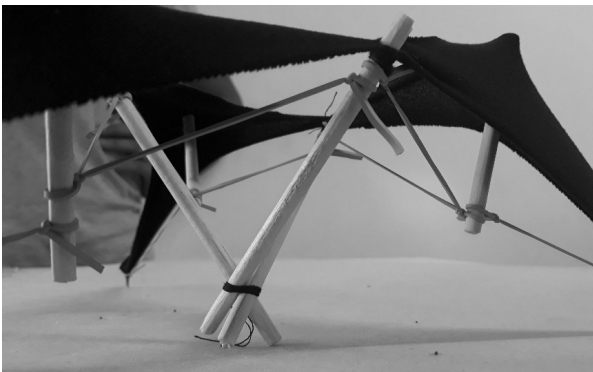


Figura 2. Vista de los postes flotantes del modelo.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, noviembre 2018.

Una vez obtenida la forma, se define el tamaño que ocupará en escala real utilizando la herramienta digital AutoCAD de Autodesk®, siguiendo los pasos mostrados (Figura 4), donde se define el radio de la circunferencia igual a 7.50m. y una circunferencia menor de 2.50m. de radio para definir las geometrías de las membranas como se muestra en el segundo recuadro. Una vez obtenidas las figuras, se saca la línea curva de corte, la cual delimitará la membrana tensada, la cual representa el 10% de un círculo (Morales Guzman, 2018), para lo que se traza un triángulo isósceles con dos ángulos de 72° y uno de 36° (que representa el 10% de un circunferencia), en el que se utiliza el vértice como centro y las aristas más largas para trazar la curva, paso que se repite en todas las aristas de los triángulos, resultando la figura en el último recuadro.

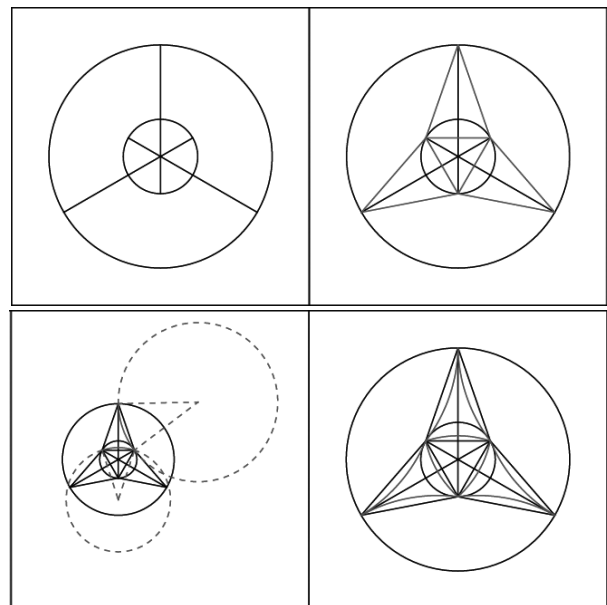


Figura 4. Pasos de dibujo 2d para estructura.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, noviembre 2018.

Una vez obtenida la forma base, se procede a dar las alturas a los vértices y se traza la superficie de cada membrana, paso realizado en la herramienta digital Rhinoceros de McNeel®, como se muestra (Figura 5) teniendo 3.00 metros en la parte más alta y 0.50 metros en la parte más baja.

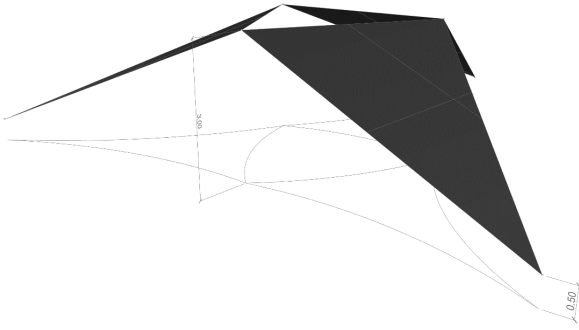


Figura 5. Alturas de los vértices para trazo de las membranas.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

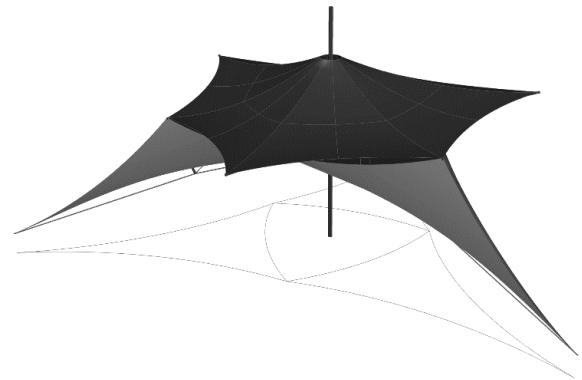


Figura 7. Modelo final de la cubierta propuesta.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

Para la ubicación de los postes flotantes, se hace un trazo en la normal del centroide de la superficie de la membrana, obteniendo una geometría compuesta por tres superficies, a las cuáles se les sustrae una parte con la curva trazada que representa el respectivo 10% (Figura 6), posteriormente se dibuja la estructura y al final se propone una membrana tensada en la parte superior para cubrir el hueco (Figura 7). Para el trazo de la parábola en las uniones de las membranas, se traza un plano de referencia en los ejes YZ, y con la herramienta *Set CPlane to Surface* se selecciona la superficie trazada y se unen los puntos con la herramienta *Parabola*, paso que se repite en cada una de las uniones, regresando el plano de referencia original con el comando *Previous CPlane*.

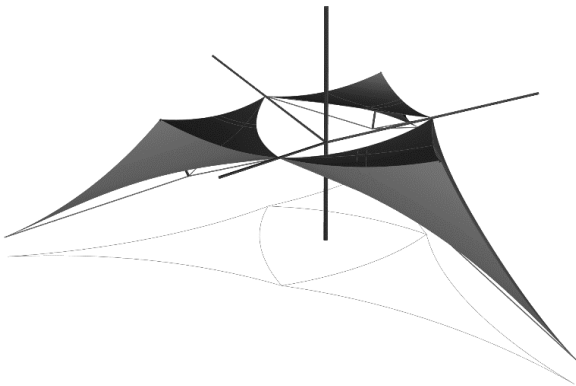


Figura 6. Geometría de las membranas con postes flotantes y estructura rígida.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

Para el armado del modelo a escala 1:5, se realizan el patronaje de las membranas con la misma herramienta digital con los siguientes pasos:

Haciendo el trazo de una superficie perpendicular a la normal ya extraída, se define un *CPlane* que sirve como referencia para trazar otras geometrías auxiliares para el patronaje de las membranas (Figura 8).

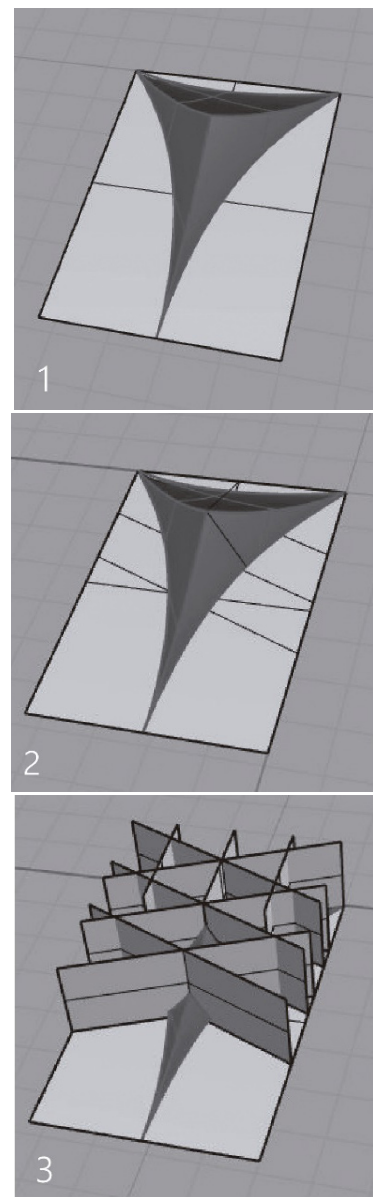


Figura 8. Pasos 1 al 3 para patronaje de membranas.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

Haciendo el trazo de una línea recta, desde la punta hacia el vértice, en forma perpendicular, se usa el comando *Project* para que se transfiera hacia el plano horizontal, después se extiende hasta el perímetro de la superficie de referencia y se hacen un desfase de 1.20m con el comando *Offset* para obtener tres líneas, paso que se repite en cada una de las caras de la membrana.

Una vez obtenidas las superficies de referencia, se divide la superficie con el comando *Split* donde se selecciona primero la superficie que será dividida seguido de un *Enter* para seleccionar, posteriormente, las referencias de corte. Esta secuencia de comando se repite en cada cara por separado.

Ya teniendo las secciones de las membranas, se obtienen una serie de superficies que, para poder trazarlas en el material textil, es necesario desdoblarlas con el comando *UnrollSrf*, se recomienda hacerlo de una a la vez para evitar el empalme de las piezas, y al mismo tiempo, acomodarlas (Figura 9).

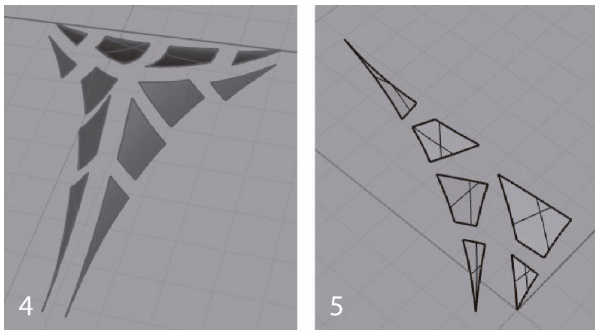


Figura 9. Paso 4 y 5 para patronaje de membranas.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

Al ser una geometría simétrica, solo es necesario desdoblar la mitad de las secciones (Figura 11), y una vez obtenidos los patrones, se utiliza el comando *DubBorder* para crear una polilínea alrededor de las superficies con el fin de manipular mejor los patrones, además, se agrega un *ID* a cada lado del patrón para evitar confundir las piezas (Figura 10).

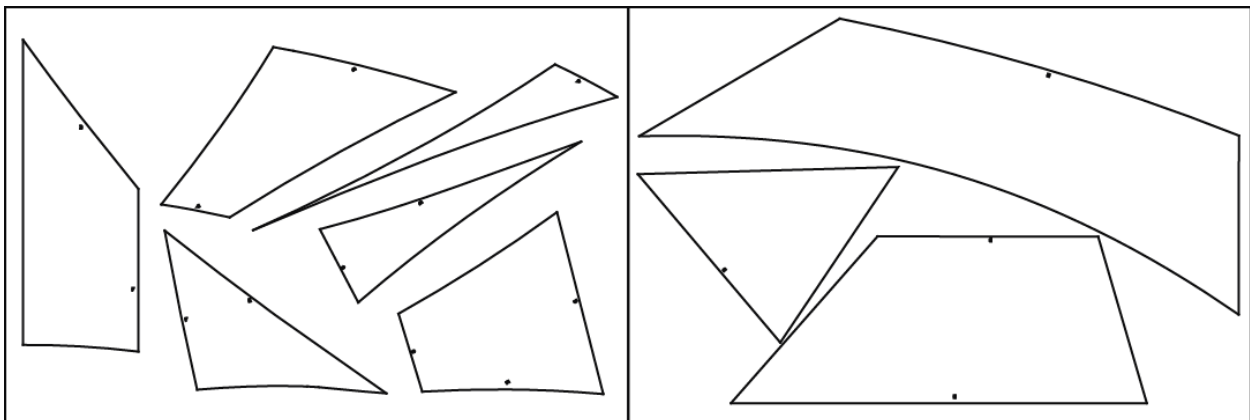


Figura 10. Despiece de patrones de la membrana tensada.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

Posterior al proceso de patronaje, se seleccionaron los materiales a usar para los tensores, anclajes, postes y membrana, siendo cordón de polipropileno, bastones de 2 pulgadas de madera y tela de manta los materiales principales.

Con los patrones obtenidos se hace el trazo de todos los módulos a cortar en la tela de manta (Figura 11) obteniendo 51 piezas, las cuáles fueron cosidas y preparadas para montarse.



Figura 11. Proceso de corte y unión de patrones.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como primer paso para el montaje, se ubicaron los puntos fijos en los cuales se coloca la estructura, y se fijaron al piso (Figura 12), durante el proceso de montaje, la longitud de los tensores y la tensión misma, se fueron ajustando conforme se colocaban las piezas, cuidando que no sobrepasara la fuerza para evitar romper los diferentes elementos.



Figura 12. Proceso de montaje de la estructura.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

Cada uno de los elementos de la estructura representa gran importancia para mantener el equilibrio de las fuerzas a las que se someten para dar la forma planteada. Para entender el funcionamiento y como se transmiten los esfuerzos, se hace un análisis conforme a lo observado durante el proceso de construcción del modelo a escala, y se toma una sección del modelo para comprenderlo mejor.

En los postes de la estructura (color azul) el central es el encargado de transmitir la mayoría de las cargas hacia el suelo al tener todos los elementos conectados a el mismo por medio de los postes inclinados como se muestra (Figura 13). por otro lado, el poste flotando genera un esfuerzo casi en sentido opuesto, lo que le da la tensión a la membrana, y cerrando el sistema por medio de anclas a los extremos hacia el suelo.

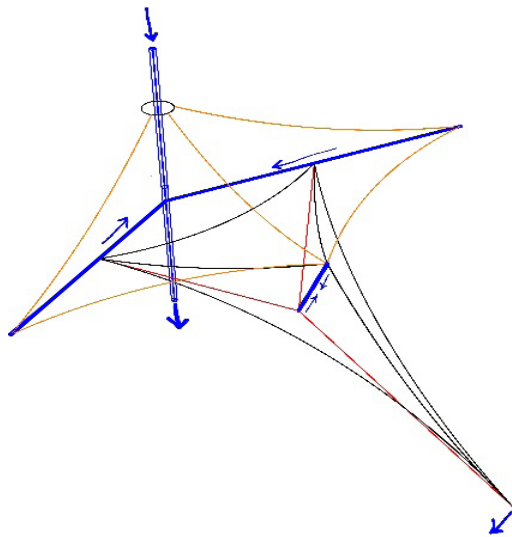


Figura 13. Fuerzas en los elementos rígidos.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

Para darle rigidez y estabilidad a los postes, se plantearon los tensores, donde los primeros se colocan junto con el poste principal para elevar los inclinados y, al mismo tiempo, ayuda a generar la tensión en el resto de los tensores, los cuales están anclados en la parte inferior del poste flotante, la tracción es generada hacia el lado contrario del origen donde coinciden para poder elevarlo (Figura 14).

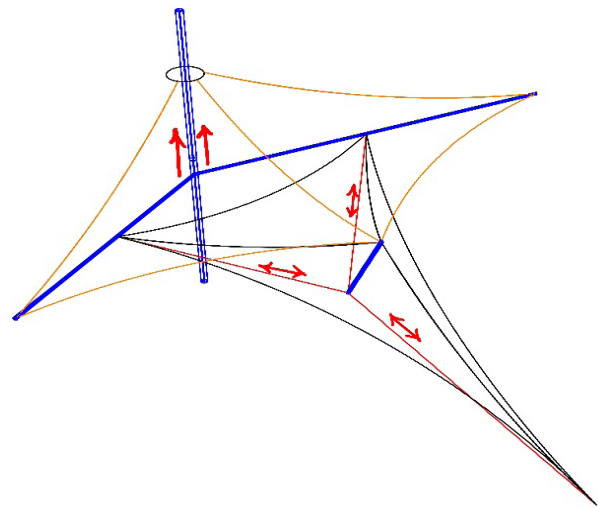


Figura 14. Fuerza en tensores
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

En el último punto de este análisis, se obtuvo como resultado que las membranas generaban la tensión de sus extremos hacia el interior de esta como se muestra (Figura 15), teniendo que generar compensaciones de esfuerzos a través del resto de los componentes como lo son los postes y los tensores, y así lograr una estructura estable, equilibrada y funcional.

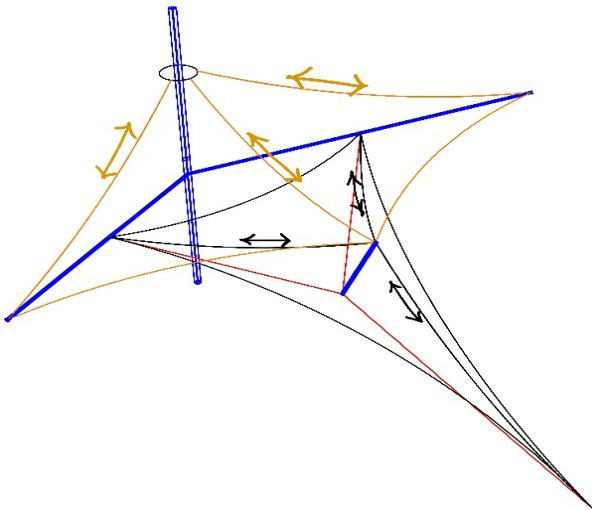


Figura 15. Fuerzas en las membranas.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, diciembre 2018.

Para facilitar el montaje en la siguiente etapa de proyecto, se propone un sistema de anclajes tipo sombrilla, uno en la parte inferior (Figura 16) el cual soportará los brazos de la estructura por medio de una articulación a 1 eje, y otro en la parte superior del poste principal de la estructura (Figura 17), que al ser ajustados, generará tensión en el resto de los elementos de la cubierta, lo que podrá facilitar su montaje a escala 1:1. Al ser una cubierta simétrica y modular, se proponen anclajes simples para el resto de los elementos.

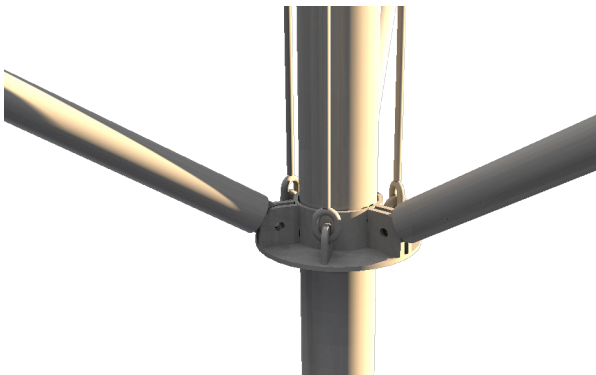


Figura 16. Anclaje inferior tipo sombrilla.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, marzo 2019.

Cabe mencionar que esta primera etapa de proyecto, correspondiente a la experimentación, se desarrolló en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro, como parte de proceso de investigación, y se pretende ejecutar la construcción final dentro de un campus universitario en esta misma ciudad o en la Universidad Veracruzana en conjunto con Morales Guzmán, quien ha llevado a cabo diferentes proyectos utilizando los mismos principios de

tenseguridad y procesos de patronaje, tal es el caso de una tenso-estructura realizada por parte de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Veracruzana, como parte de una investigación de Tecnologías Arquitectónicas, en que de la misma forma que esta investigación, se realiza un modelo a escala 1:5, con apoyo de una empresa de manufactura de lonas, con el fin de comprobar su funcionamiento (Figura 18). Y una vez obtenidos los datos finales de la experimentación inicial, se procedió a la construcción del modelo escala 1:1 con materiales disponibles en la región (Figura 19).

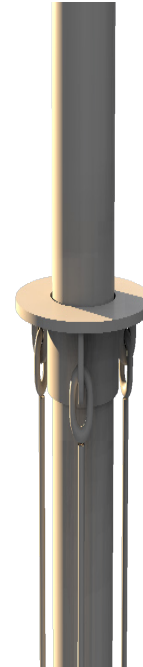


Figura 17. Anclaje superior.
Fuente: Mercado Escandón J. Abraham, marzo 2019.



Figura 18. Modelo escala 1:5 de tenso-estructura.
Fuente: Morales Guzmán (2018).



Figura 19. Modelo escala 1:1 de tenso-estructura.
Fuente: Morales Guzmán (2018).

De esta misma forma, es posible abordar la construcción del modelo propuesto en esta investigación, ya que se lleva a cabo una metodología similar a la descrita en el antecedente de la tenso-estructura. Sin embargo, es necesario trabajar en áreas de oportunidad como lo son los sistemas de anclaje y de tracción, esto último con la intención de crear un sistemas más estable y óptimo para el funcionamiento del principio de tensegridad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la construcción del modelo a escala 1:5, se pudo comprobar que la configuración de la estructura es estable y funcional, por lo que es viable para su construcción a escala real, ya que, por su forma, puede funcionar correctamente como resguardo en espacios abiertos. No obstante, la tensión en las membranas fue insuficiente, lo cual es apreciable en las arrugas que presenta en algunos módulos, situación que no se

debe presentar en una membrana tensada, y que fue en consecuencia por el factor humano en la precisión durante la confección de la tela.

Una de las ventajas que ofrece el método modelístico combinado con el método geométrico, es que se puede realizar sin la necesidad de comprar algún *software* de simulación para comprobar el funcionamiento de la estructura. Para quienes están interesados en estas estructuras, puede ser de gran utilidad iniciar con este método ya que permite la exploración y experimentación de diferentes formas, conocer cuales geometrías son más estables, y posteriormente, diseñarlas directamente a través de un *software* CAD o de simulación.

Se espera que, al término de este proyecto de investigación, este tipo de estructuras puedan ser implementados en mayor cantidad de espacios abiertos, tanto en público o privados, debido a que este sistema permite abarcar una gran extensión de áreas, sin la necesidad de colocar elementos pesados.

REFERENCIAS

- Bublik Abufon, N. (2012). *"Fachadas Activas"*. Tesina, Universidad Politécnica de Catalunya, Escola Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Barcelona. Recuperado el 14 de noviembre de 2018, de <http://hdl.handle.net/2099.1/16136>
- Malmanger, N. (octubre de 2005). *Centro Nacional de las Artes*. Recuperado el diciembre de 2018, de http://cmm.cenart.gob.mx/delanda/textos/frei_otto.pdf
- Morales Guzmán, C. C. (2015). Estancia Post Doctoral: Tensegrity en la Arquitectura. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Morales Guzman, C. C. (octubre de 2018). Andamiaje. *Simbiosis, Universidad Autónoma de Querétaro*. Santiago de Querétaro. Recuperado el octubre de 2018
- Morales Guzmán, C. C. (1 de enero de 2018). Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tenso-estructura. *Revista de Arquitectura, 20(1)*, 71-87. doi:1657030-8
- Quivira Catalan, V. (2009). *Membranas tensadas: construcciones flexibles, sutiles raptos de luz*. Tesis, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Arquitectura y Diseño, Valparaíso. Recuperado el 13 de noviembre de 2018, de http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-5500/UCH5766_01.pdf
- Rhode-Barbarigos, L., Veuve, N., Hadj Ali, N. B., Motro, R., & Smith, I. F. (septiembre de 2013). A transformable tensegrity-footbridge system. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/281992128_A_transformable_tensegrity-footbridge_system
- Sakantamis, K., & Larsen, O. P. (16 de octubre de 2003). The Cocoon Method: A Physical Modelling Tool for Designing Tensegrity Systems. *International Journal of Space Structures, 19 (1)*, 11-20. doi:<https://doi.org/10.1260/026635104322988335>
- Torné, L. (2008). Tensegridad. *Revista IPP(1)*. Recuperado el 13 de noviembre de 2018, de http://www.ub.edu/revistaipp/l_torne.html