

Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tenso-estructura

Carlos César Morales-Guzmán

Universidad Veracruzana, Poza Rica. Veracruz, México

Facultad de Arquitectura

Morales Guzmán, C. (2018). Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tenso estructura. *Revista de Arquitectura*, 20(1), 71-87 doi: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.1.1544>



<http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.1.1544>

Arquitecto, Universidad Veracruzana (México).

Maestro en Diseño Arquitectónico y Bioclimatismo, Universidad Cristóbal Colón (México).

Máster en Ingeniería para la Arquitectura, Universidad Camilo José Cela (España).

Doctor en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México (México).

Doctor en Estructuras de la Edificación, Universidad Politécnica de Madrid (España).

Posdoctorado en Arquitectura Tensada, Universidad Politécnica de Catalunya (España).

Posdoctorado en Ingeniería y Arquitectura Transformable, Universidad de Sevilla (España).

Investigador-Académico en la Universidad Veracruzana, Facultad de Arquitectura.

 <http://orcid.org/0000-0002-4499-6968>

dr.arqmorales@gmail.com

Introducción

La siguiente investigación se desarrolló en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Veracruzana, del Cuerpo Académico Arquitectura y Urbanismo, en la línea de investigación de Tecnologías Arquitectónicas. Su objetivo fue desarrollar nuevos aportes arquitectónicos para la región, principalmente en el espacio universitario.

Las estructuras textiles son un sistema flexible que ayudó a desarrollar la arquitectura móvil, es por ello que esta investigación se genera a partir de una tenso-estructura, superficie delgada y flexible hecha de lona o material textil, que soporta las cargas a través de su área tensada. La clave del éxito es el material con el que se fabrican dichas estructuras en la arquitectura textil. Por ejemplo, para las membranas se recurre a tejidos de poliéster, a fin de hacerlas funcionales y lograr el objetivo de brindar seguridad y protección, por ello es necesario agregarle a estos tejidos algunas capas de PVC, tanto inferiores como superiores. El número y el espesor de los tejidos dependerán de la aplicación que se desee otorgar.

El PVC es el que permite mayor durabilidad ya que su función principal es brindar protección contra los rayos UV, así como contra los agentes atmosféricos y la abrasión, lo cual hará que la tenso-estructura tenga una vida útil mucho más larga y pueda ser funcional prácticamente para cualquier sitio donde desee colocarse. Existen materiales más avanzados como el ETFE (etileno-tetrafluoretileno) que es un polímero termoplástico transparente de extraordinaria durabilidad, con una elevada resistencia química y mecánica (al corte y a la abrasión), así como una gran estabilidad ante cambios de temperatura (soporta hasta 170 °C), por esta razón se utilizan recientemente en la arquitectura textil por su resistencia y bajo peso.

Las tenso-estructuras se realizan de diversas formas, estas pueden ser construidas de membranas textiles con cables pretensados, también se pueden combinar diferentes tipos de estructuras para dar rigidez a su forma, que van desde cables en forma de celosías o vigas, estructuras portantes o estructuras neumáticas soportadas por aire. Las tenso-estructuras son usadas de diversas formas, como en cerramientos y techos, estructuras suspendidas, en elementos decorativos o escultóricos y otros, y otorgan una eficiencia estructural y formas artísticamente estéticas.

La capacidad y facilidad de cubrir grandes espacios les da una característica adicional que resalta inmediatamente con otros sistemas estruc-

Resumen

Con el objetivo de crear una metodología de adecuaciones geométricas de las superficies mínimas, se planteó un método que parte de la sistematización de pasos realizada en un programa virtual, para luego formar modelos físicos a escala y tamaño real de tenso-estructuras hechas de lona o material textil y, con ello, generar una gama de diseños singulares de dichos modelos. La difícil adecuación de la forma ayudará a la creación del patronaje, ya que el patrón está sometido a medidas constructivas del material; a partir de este método se generarán los ajustes geométricos y se formarán los diseños modulares del patronaje. El método se puede sintetizar por medio de un *software* especializado llamado *Win Tess* que ayuda a generar el análisis y diseño de este tipo de estructuras. Para esta investigación experimental se desarrollaron varios tipos de modelos complejos a fin de familiarizarse con la forma singular de una velaría de doble curvatura. En consecuencia, se obtiene una aplicación práctica para el diseño constructivo de una tenso-estructura.

Palabras clave: arquitectura textil, construcción de velarías, investigación experimental, investigación-creación, metodología del diseño, modelos por simulación.

Design and pattern development of the shape of a tense structure

Abstract

Aiming to create a methodology for geometric adjustments of minimum surfaces, the paper proposes a method that starts with the systematization of steps carried out in a virtual program, to create then scaled and real size physical models of tense structures made of canvas or textile material with the purpose of generating a range of unique designs of said models. The difficult adaptation of the form helps to create pattern designing, since the pattern is subject to the constructive measures of the material; based on this method, geometric adjustments will be generated and modular pattern designs will be formed. The method can be synthesized by means of a specialized software called *Win Tess* that helps to create the analysis and design of this type of structures. For this experimental research, several types of complex models were developed in order to become familiar with the singular form of a double-curved canopy. Consequently, a practical application for the constructive design of a tense structure was achieved.

Keywords: Textile architecture, construction of canopies, experimental research, research-creation, design methodology, models by simulation.

Desenho e desenvolvimento de padrões da forma de uma tensoestrutura

Resumo

Com o objetivo de criar uma metodologia de adequações geométricas das superfícies mínimas, propôs-se um método que partisse da sistematização de passos realizada num programa virtual, para logo formar modelos físicos a escala e tamanho real de tensoestruturas feitas de lona ou material têxtil e, com isso, gerar uma variedade de desenhos singulares desses modelos. A difícil adequação da forma ajudará a criar a padronização, já que o padrão está submetido a medidas construtivas do material; a partir desse método, serão gerados os ajustes geométricos e serão formados os desenhos modulares da padronização. O método pode ser sintetizado por meio do *software* especializado chamado *Win Tess*, que ajuda a gerar a análise e desenho desse tipo de estruturas. Para esta pesquisa experimental, foram desenvolvidos vários tipos de modelos complexos a fim de familiarizar-se com a forma singular de uma velaria de dupla curvatura. Em consequência, obtém-se uma aplicação prática para o desenho construtivo de uma tenso-estrutura.

Palavras-chave: arquitetura têxtil, construção de velarias, pesquisa experimental, pesquisa-criação, metodologia do desenho, modelos por simulação.

Recibido: agosto 25 / 2017

Evaluado: noviembre 12 / 2017

Aceptado: febrero 27 / 2018

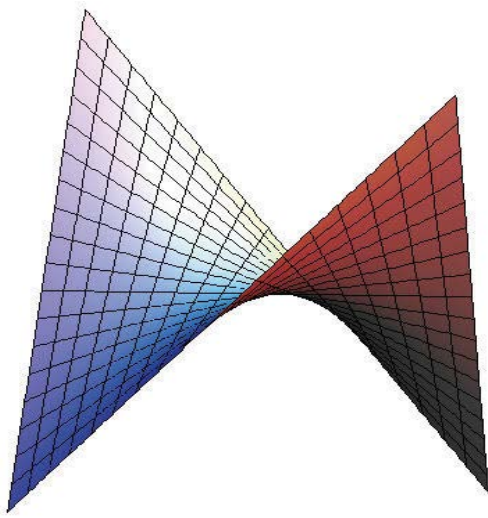


Figura 1. Tipo parabolóide
Fuente: Bautista, Castillo, Hernández y Pérez (2011).

Figura 2. Tipo conoide
Fuente: Tensoestructuras de diseño (s.f.a).



Figura 3. Con valles y crestas
Fuente: Tensoestructuras de diseño (s.f.b).

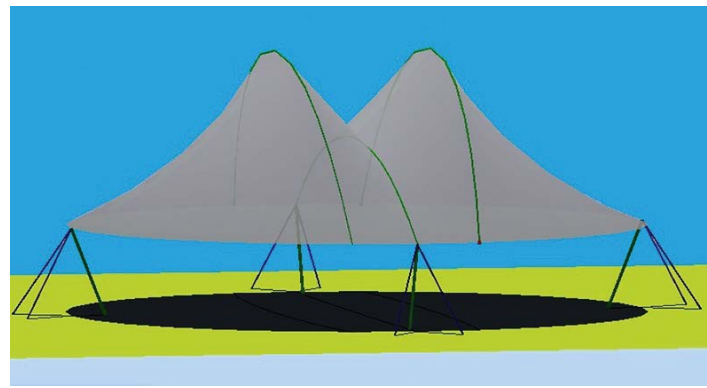
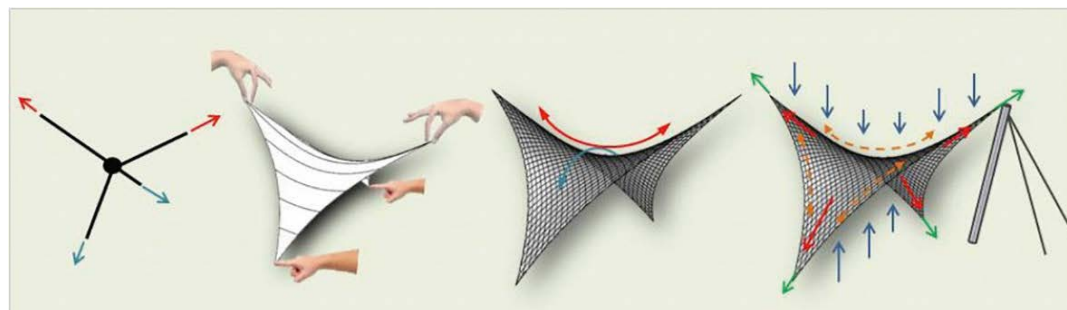


Figura 4. La superficie de una velaría está formada por dos fuerzas: tracción y compresión
Fuente: Tensile Structures Education (2018).



turales habituales, esto permite construir espacios de claros más extensos, como grandes estadios y pabellones de exhibición, hasta pequeñas cubiertas y marquesinas cuya función no va más allá de proteger del sol y la lluvia.

Para entender este tipo de sistema estructural, la cubierta textil se define como una tenso-estructura que tiene una superficie delgada y flexible; gracias a las formas que adopta pueden llegar a soportar las diversas cargas a través de su membrana, ya que los esfuerzos que se generan dentro de sus miembros estructurales se reparten con mucha facilidad a sus basamentos.

El proceso de diseño de las tenso-estructuras puede resumirse, como lo aconseja el doctor Llorens de la Universidad Politécnica de Catalunya, en las siguientes fases:

1. Información previa: programa, emplazamiento, dimensiones, límites, materiales y medios disponibles.
2. Anteproyecto: establecimiento de la forma, curvatura y desagüe, características arquitectónicas, relación con el entorno, puntos de apoyo y anclaje.
3. Determinación de la forma.
4. Cálculo estructural: obtención de tensiones y deformaciones. Dimensionado.

5. Estrategia medioambiental, acondicionamiento e instalaciones: iluminación natural y artificial, acondicionamiento térmico, acondicionamiento acústico, resistencia al fuego, cableado, energía incorporada, emisiones, residuos.
6. Patronaje.
7. Detalles constructivos.
8. Especificaciones relativas a los materiales: la puesta en obra, el control y las tolerancias.
9. Plan de inspecciones y mantenimiento.
10. Medición y presupuesto (2011, p. 2).

Cuando el proceso de diseño sigue la secuencia indicada se presume que no se tendrán problemas para encontrar la forma adecuada y necesaria para el proyecto.

Para esta investigación solo se tomarán en cuenta los puntos 3, 6 y 7, ya que el desarrollo de la investigación es experimental y académico, y el punto es encontrar una forma de diseño más sencilla para proponer tenso-estructuras en los proyectos arquitectónicos. Cabe mencionar que el principal propósito de este proyecto no es desarrollar las adecuaciones geométricas sino explicar que, bajo diferentes métodos, se puede desarrollar la forma y la aplicación de un patronaje aproximado a la escala real. El objetivo de

esta investigación es el diseño de una superficie que se realizará por medio del patronaje de cortes modulares por gajos, y una aplicación de diferentes métodos que puede utilizar el diseñador para usarlos en arquitectura.

Como primera medida se presentarán las formas básicas para generar velarías:

1. Tipo paraboloide o anticlástica. Esta cuenta con una curva negativa y una curva positiva. La deformación de la membrana se da al elevar dos de sus extremos a puntos positivos y dos a puntos negativos del plano; así pues, contará con dos uniones altas y dos uniones bajas (Figura 1).
2. Tipo conoide. Al tener una membrana elástica, la deformación puntual se dará al aplicar una fuerza perpendicular en el interior de ella; es decir, existirá un punto de mayor altura en el espacio (Figura 2).
3. Con valles y crestas. La superficie de la membrana sufrirá una deformación lineal cuando se aplique una fuerza uniforme por medio de elementos como un arco (Figura 3).

El comportamiento de la membrana viene dado a lo largo de sus dos direcciones principales (Figura 4), con una relación directa luz-flecha, es decir, a mayor curvatura mayor absorción de cargas; entonces, en la membrana siempre actuarán dos tipos de fuerzas: la tracción y la compresión. Así, una regla fundamental para la estabilidad de las velarías es que una de las estructuras de las superficies esté formada por tensiones de dos curvas en direcciones opuestas, para lograr una mejor estabilidad estructural. Esto se define a menudo como “doble curvatura” o una forma “anticlástica” (Figura 1), y matemáticamente se conoce como un paraboloide hiperbólico; esta propiedad estructural es generada por dos esfuerzos encontrados de tracción y compresión, que permiten dicha estabilidad en la superficie.

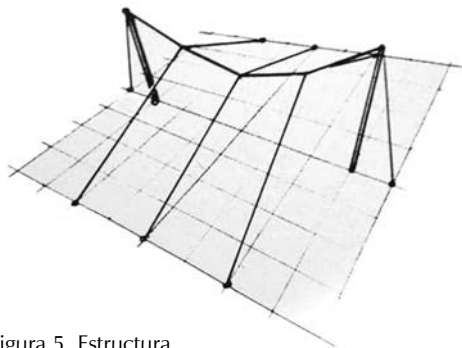


Figura 5. Estructura beduina, península arábiga

Fuente: Morales (2012a).



Figura 6. Frei Otto, Exposición Mundial, 1967

Fuente: Conrad (1979).

Las velarías se componen principalmente de elementos totalmente flexibles, entre estos tenemos la membrana textil y los cables. Además de ellos existen elementos rígidos, como el mástil y los puntos de anclaje que soportan y mantienen la tensión de los otros elementos. De esta manera se forma un sistema basado en la flexibilidad y la tensión (Berger, 1996; Conrad, 1979; Banco, 2007).

Antecedentes¹

En la línea de tiempo se encuentran tres etapas de la historia que fueron importantes para el desarrollo de la arquitectura tensada y de las cuales se obtienen los principales conceptos arquitectónicos que deberían tenerse en cuenta en la arquitectura textil y que se verán reflejados en el proyecto final.

Flexibilidad: en la primera etapa de la línea de tiempo se encuentra que los beduinos fueron una de las culturas que utilizó los materiales textiles para autoconstruir sus espacios provisionales (Figura 5); asimismo, en el coliseo romano se tuvo otra aplicación de la estructura provisional, utilizando el principio importante de que dicha estructura debía ser flexible para adecuar el espacio a otros requerimientos.

Prefabricación: en la segunda etapa de la línea de tiempo nos encontramos con el uso de la geometría aplicada a la tecnología industrial. Con el descubrimiento de materiales más fuertes y más ligeros surgieron innumerables prototipos prefabricados que ayudaron a construir este tipo de espacios grandes con gran rapidez; poco después, la aparición de materiales ligeros ayudó a generar geometrías más autoequilibradas. El doctor Frei Otto (1962), con su sistema de tenso-estructura, cubría espacios arquitectónicos más rápido en la construcción (Figura 6). Estas aplicaciones demuestran que una estructura geometrizada y bien diseñada puede cumplir con varias funciones y se ajusta a diferentes entornos fácilmente.

Transformación: en la última etapa de la línea del tiempo se encuentra que las estructuras plegables tienen la capacidad de transformar el espacio, esto porque la sociedad demanda áreas más dinámicas y multifuncionales. En la actualidad se desarrollan pocos sistemas plegables debido a su difícil fabricación e interpretación de análisis estructural.

¹ Estos antecedentes han sido objeto de una publicación previa y se considera necesario traerlos a colación ya que son soporte común a los proyectos de investigación desarrollados en esta línea de trabajo (Morales, 2016, pp. 99-100).

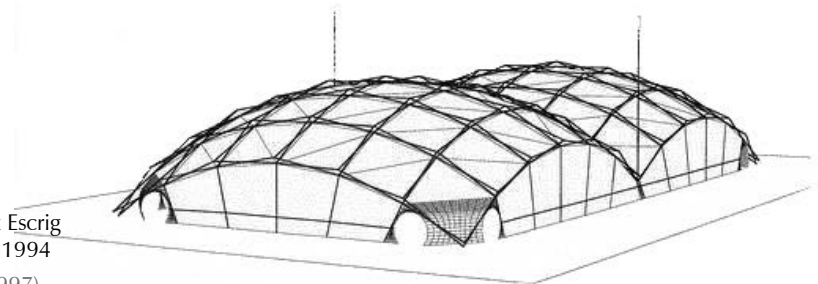


Figura 7. Félix Escrig Pallares, España, 1994

Fuente: Escrig (1997).

En este campo de investigación y desarrollo aparece el doctor Felix Escrig (1997), quien es uno de los exponentes más importantes en la actualidad y realizó estructuras transformables de manera aplicada y eficiente (Figura 7). Cabe mencionar que en el perfeccionamiento de su investigación deja pautas para seguir evolucionando en la generación de las estructuras plegables.

Por tanto, la investigación se beneficia de la línea de tiempo por la conceptualización de las premisas de diseño que debería tener nuestro proyecto, a fin de desarrollar las siguientes experimentaciones y formalizar una serie de pasos que ayudarán al proyecto final y a justificar el proceso de diseño como una metodología y una herramienta de trabajo para los diseñadores de la arquitectura (Escrig, 1997; Morales, 2013).

Justificación

El diseño de una cubierta textil tiene varias condiciones que anteriormente se mencionaron; en esta etapa se justificará el tipo de proceso que existe para diseñar una tenso-estructura.

Determinación de la forma: esta se puede desarrollar con distintos métodos ya aplicados por varios investigadores; así, para conseguir una velaría, Otto (1962) aplica lo que llama la "búsqueda de la forma" (*form finding*).

En la estructura tensada, el proceso de diseño puede variar dependiendo de la singularidad y complejidad del proyecto que se va a realizar. Se ha decidido utilizar un tipo de arquitectura en la cual la mayoría de los esfuerzos son de tracción, es muy posible que la mayor parte de los elementos estructurales sean del tipo cable, lámina, tendón, etc., los cuales solamente admiten esfuerzos de tracción.

Si es así, deberemos diseñar formas que garanticen que en cualquier momento y bajo cualquier tipo de carga, la estructura y sus elementos estén sometidos a esfuerzos de tracción, por ello se presentan una serie de métodos ya aplicados por investigadores como Escrig (1997), Llorens (2011 y 2015) y Sastre (1981), que ayudan de alguna manera a generar la forma de una tenso-estructura.

Método-geométrico: es utilizado en aquellas formas donde la geometría es conocida (Figura 8), tal es el caso, por ejemplo, de las cubiertas neumáticas esféricas, cilíndricas, elipsoides, etc. Con un programa de CAD y conocimientos geométricos no demasiado avanzados, se pueden generar fácilmente este tipo de formas.

Método-constructivo: de la misma forma como se construyen los encofrados para las cáscaras de hormigón armado (Figura 9), utilizando las propiedades de las superficies regladas, en donde un conjunto de rectas que se mueven sobre unos bordes no paralelos producen unas superficies alabeadas complejas, es posible generar superficies alabeadas tensadas. El caso del paraboloide hiperbólico es un ejemplo paradigmático de este método.

Método-modelístico: es el más antiguo, usado sobre todo cuando los ordenadores no existían o no eran asequibles para el diseñador (Figura 10). A partir de maquetas hechas con materiales deformables (licra, látex, etc.), o simplemente modelando yeso o arcilla, se obtenían formas alabeadas o soportes sobre los que se podía dibujar y diseñar una superficie tensada. De hecho, este método se utiliza actualmente, ya que muchas

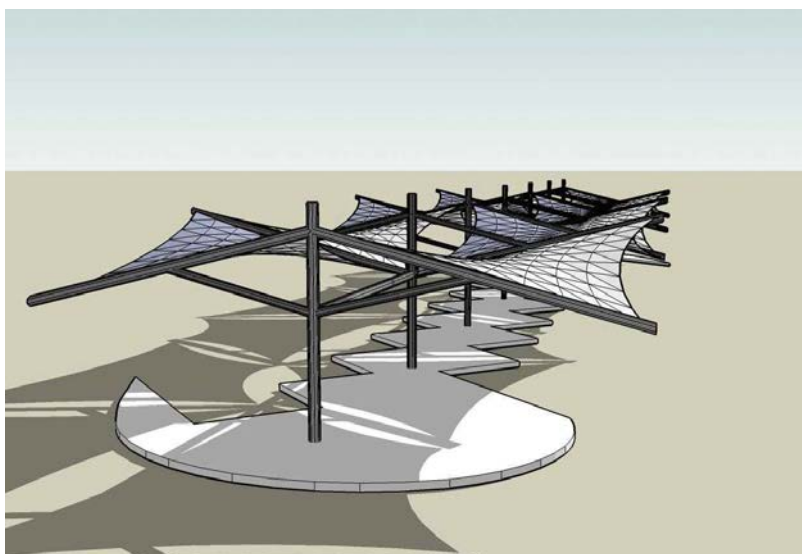


Figura 8. Método geométrico
Fuente: Sombrared (2014).



Figura 9. Método constructivo
Fuente: Carpattec (s.f.).



Figura 10. Método modelístico
Fuente: Eyssautier Petit (2012).

veces el disponer de una maqueta es una necesidad para el proyectista o para el cliente.

Método-simulación: es el método más utilizado hoy en día. Se trata de usar un programa informático especializado para generar este tipo de formas (Figura 11). Aunque hay una gama de *software* en el mercado, en esta investigación se utilizará el programa educativo WinTess3, como la mejor opción por el uso más amigable para el descubrimiento de la forma por simulación.

Método-pompas-jabón: es un método muy antiguo, utilizado a fondo en las investigaciones de Frei Otto. A partir de cualquier marco rígido o deformable, sumergido en agua jabonosa, obtenemos superficies que, debido a la tensión superficial, son mínimas y, al mismo tiempo, son óptimas como superficies tensadas. Evidentemente tienen el grave problema de ser efímeras, en la actualidad ya no se utilizan, solo se mencionan de manera pedagógica (Engel, 2006; Moore, 2000; Otto, 1969).

Metodología

El desarrollo de la metodología se basa en dos grandes partes, la primera es la experimentación por descubrimiento dada la forma en que entra el proceso de diseño de una tenso-estructura –puntos 3 y 6 de Llorens (2011, p. 2), citado supra–: descubrimiento de la forma y propuesta de patronaje, donde el diseñador podrá obtener herramientas metodológicas para generar anteproyectos arquitectónicos. El segundo bloque metodológico es el método por simulación y construcción, donde se toma el punto 7 del proceso de diseño de una tenso estructura anteriormente expuesta (Llorens, 2011, p. 2); en este bloque se desarrolla la forma de patronaje con el *software* WinTess de Sastre. El programa tiene la capacidad de desarrollar, calcular y realizar el patronaje de una tenso-estructura.

Experimentación por descubrimiento de la forma

Método modelístico

Antes de entrar al desarrollo de la experimentación del método propuesto se llevó a cabo un

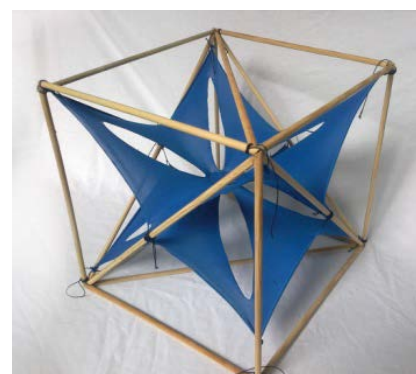
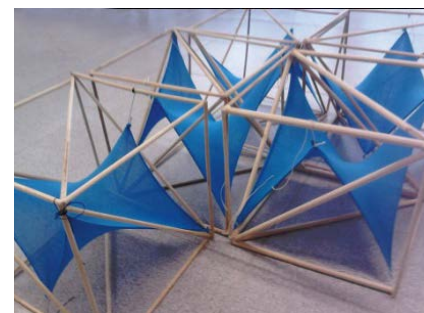


Figura 11. Modelo por simulación
Fuente: Rosenfiel (2016).

curso de diseño de velarías en el taller de Diseño Arquitectónico de licenciatura y posgrado de la Facultad de Arquitectura, el cual está basado en el método modelístico, para sensibilizar y familiarizar al alumno y al diseñador con la forma de la tenso-estructura, y así poder lograr formas funcionales.

Con el objetivo de comprender el sistema de tenso-estructuras se analiza la geometría para generar la forma, para ello se desarrollaron varios experimentos y se utilizaron los puntos de un cubo de madera, ya que ellos tenían el propósito de buscar una solución de localización para los puntos de anclaje de una velaría y así encontrar un método de descubrimiento de las formas. Este se basó el *form finding* (búsqueda de la forma), que podrá responder a una proyección compleja, la cual brindará inmediatamente el aprendizaje sobre este tipo de sistemas, en el que se podrá analizar la forma de la superficie textil y su comportamiento geométrico.

Cabe mencionar que las maquetas conceptuales elaboradas se hicieron sin escala, son claramente representativas, con formas simples que ayudaron, mediante la experimentación, a desarrollar la sensibilidad visual de cómo conformar una velaría y su descubrimiento de la forma geométrica.



Figuras 12, 13, 14.
La experimentación de la forma con cubos para formar velarías
Fuente: Morales (2013a).



Figuras 15 y 16. La experimentación de la forma

Fuente: Morales (2013a).

En primer lugar, la forma más óptima para generar una velaría es la “silla de montar” o “hiperboloides de doble curvatura” (Figura 12), en donde se encuentran las dos curvaturas de tracción y compresión; para analizar cuáles son las fuerzas que actúan y los puntos de tensión que le dan esa doble curvatura se utilizaron los puntos de referencia del cubo, y de allí se partió con la segmentación de sus puntos cardinales y se generaron más anclajes, así se obtienen varias formas de superficie hiperbólica. Para ello se hicieron rectángulos de 20 x 20 cm con la tela de licra y se procedió a ligarlos a los vértices del cubo de madera para buscar esa forma particular de doble curvatura.

Posteriormente se desarrollaron más conjuntos de velarías con los cubos (Figura 13), se manejaron piezas de tela de igual dimensión, con esto se buscaron más puntos de referencia para generar un conjunto modular de sillas de montar y, por medio de estas, formar cubiertas más flexibles; la experimentación de los diferentes puntos de ligadura en los cubos se hizo para generar más subdivisiones y descubrir más formas modulares de las velarías. Esas figuras surgidas con base en las representaciones visuales se utilizaron para construir un diseño de tenso-estructura; la última etapa de la experimentación de los cubos se dio posteriormente en la segmentación de los cubos dentro de sus espacios (Figura 14), esto generó los puntos de anclaje finales de las estructuras tensadas.

En el siguiente paso se moduló una forma básica a través del ejercicio del cubo para poder realizar la primera maqueta aproximada, en ella se representaron los detalles tanto de los anclajes como de las uniones articuladas; el resultado de ello fue una velaría muy básica y sin funcionamiento, pero que permitió terminar su construc-

ción. En consecuencia, se experimentó más con la búsqueda de la forma, tratando de gestar los modelos por medio de los puntos de referencia y así formar la maqueta adecuada. En esa etapa experimental se obtuvieron resultados apropiados para generar superficies estructuralmente estéticas y funcionales (Figuras 15 y 16); para ello se utilizaron también tipologías de anclajes y conexiones de forma singular a fin de representar las conexiones que se podrían utilizar en una escala mayor; en esta parte de la experimentación son importantes tales ensayos de conexiones, pues sirven para representar las tensiones que se pueden encontrar en las superficies de la velaría. Para realizar dicho diseño se realizó el trazado en la licra para recortar las partes que conformarían la velaría; de la misma forma, se hizo el trazo en la base para construir e indicar los anclajes, mástiles y tensores que la ayudarían a sujetarse a la tenso-estructura.

Siguiendo el desarrollo de la experimentación de las velarías se analizaron conexiones especiales en las uniones, se realizaron varias perforaciones en las superficies donde van sujetos los mástiles flotantes, e inmediatamente se colocó un tensor para representar el pretensado de la velaría; al tensarse para darle la estructura se formó la figura estética de la velaría y se equilibraron las tensiones que ocurren en las superficies de la membrana (Morales, 2013a).

Método geométrico

El método de adecuación explicado a continuación se desarrolló desde los principios físicos de una velaría anticlástica, anteriormente descrita (paraboloide hipernólico); este se desarrolló para construir la forma de una tenso-estructura mediante la ayuda del software AutoCAD 2010², que permite generar dibujos en 3D, aunque también se propone un software distinto de dibujo como Rhinoceros 5³, el cual proporciona los mismos resultados pero en menor tiempo, ya que el programa tiene un ambiente virtual más noble en el dibujo 3D, mismo que será solo mencionado; para esta investigación se utilizó como herramienta que ayudó a formar un método de traslación geométrica de una superficie mínima y no el aprendizaje de los programas, aquí solo se le dará énfasis al proceso de patronaje de la velaría.

Cabe mencionar que este modelo geométrico necesita la ayuda de los modelos físicos para realizar la traslación geométrica, ya que los programas mencionados solo sirven para realizar la forma ya obtenida y conocida, por ello facilita la generación de la forma y posteriormente el patronaje de esta realizada en un entorno virtual, adecuando dicho patronaje a las medidas del material de la membrana textil.

² Software de diseño asistido por computadora, <http://mexico.autodesk.com/adsk/servlet/pc>

³ Software de diseño asistido por computadora, <https://www.rhino3d.com/>

Para conseguir las parábolas tensadas se genera una primera propuesta física; posteriormente se genera el modelo a escala 1:1, con las medidas ya calculadas y con la fórmula que se expondrá más adelante.

Para desarrollar el ejercicio se toma una figura conocida, como la silla de montar, ya que es una superficie simple de la cual se pueden generar otras formas singulares para desarrollar la forma de una velaría. Como primera medida se proyecta en un plano virtual de trabajo en donde posteriormente se aplicará la geometría de la parábola; en principio, la parábola se forma por una serie de puntos situados en el espacio por coordenadas; expresada de otra manera, es la que está en un punto equidistante a un plano cualquiera. Para estimar el modelo propuesto es necesario calcular dos parábolas, que se analizan mediante la siguiente ecuación (Figuras 17, 18 y 19); esto sirve para obtener una gráfica que arrojará puntos para poder dibujar la parábola, el orden de colocación de estas curvas no es importante ya que, a la hora de hacer la traslación al programa, este tiene la virtud de manipular la geometría en ambos planos.

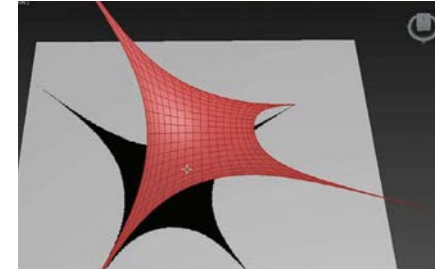
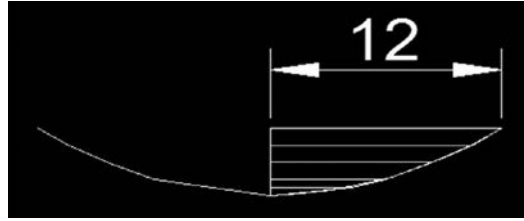
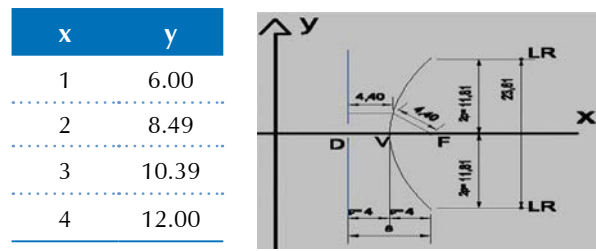
Simplificando la ecuación anterior, y obviando su desarrollo, ya que esta investigación muestra un esquema de todos los métodos (en este caso se escogió también Rhinoceros 5) (Figura 20), mediante el uso del software se grafica y se obtiene la parábola hiperbólica, esta se diseñó por la ecuación aplicada anteriormente, la cual servirá de parámetro para dimensionarla.

Después de generar el volumen, se da un parámetro de diseño más exacto para desarrollar el patronaje. Para llevar a cabo esto es necesario sustraer la primera parte que se realizó a fin de alinear dicha sección en un plano horizontal, es decir se divide el volumen en planos y se superponen en un plano en 2D virtual, para obtener la longitud efectiva de la geometría parabólica del modelo y así ejecutar el resto de las partes que se necesitarán para formar la superficie completa.

Se inicia con la sustracción de una sección de la velaría (Figura 21), la que se dividirá y seccionará lo más corto posible para poder manipular mejor cada pieza por separado y así poder alinearlas a un plano horizontal virtual en 2D para posteriormente unir las.

Dicha sección se dividirá en 12 partes horizontales (Figuras 22 y 23), y se cortarán y separarán para poder trabajar, esto con el fin de eliminar la curvatura hecha por la velaría. Una vez hechos los cortes verticales se seguirá cortándola por su vertical en 8 partes, para tener fragmentos más pequeños con el objeto de que el alineamiento sea preciso y poder evitar algún error en el patronaje.

Con todas las partes de las superficies cortadas, pasarán a alinearse en un plano horizontal para generar la unión de todas ellas, esto gracias al uso del comando alinear (Figura 24); con la ayuda



Figuras 17, 18, 19, 20. Imagen de la parábola p1, calculada y diseñada para la realización de velaría
Fuente: Morales (2013a).



Figura 21. Imagen vista en corte, primera mitad de una sección de velaría
Fuente: Morales (2013a)

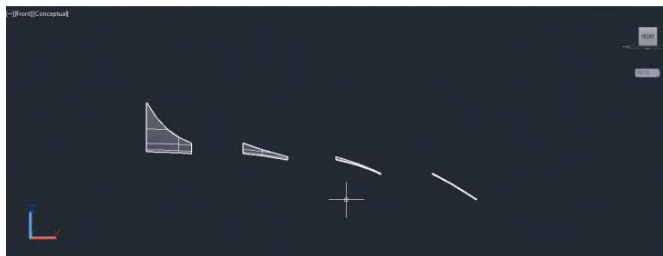


Figura 22. Imagen vista isométrica cortada en 12 partes, primera mitad de una sección de velaría
Fuente: Morales (2013a).

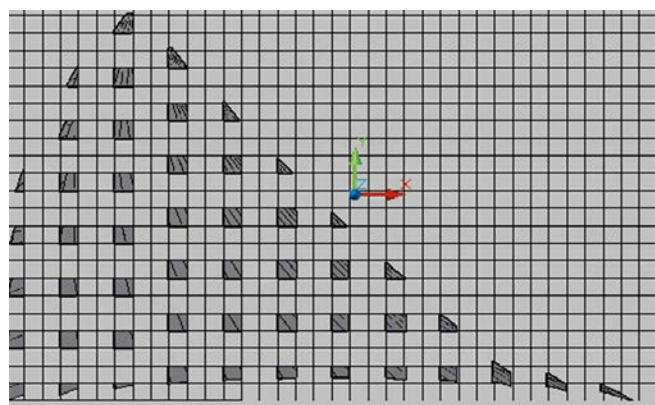


Figura 23. Imagen vista en planta, primera mitad de una sección de velaría, en cortes horizontales y verticales
Fuente: Morales (2013a)



Figura 24. Imagen vista en planta. Sección unida para formar el primer módulo de patronaje
Fuente: Morales (2013a).

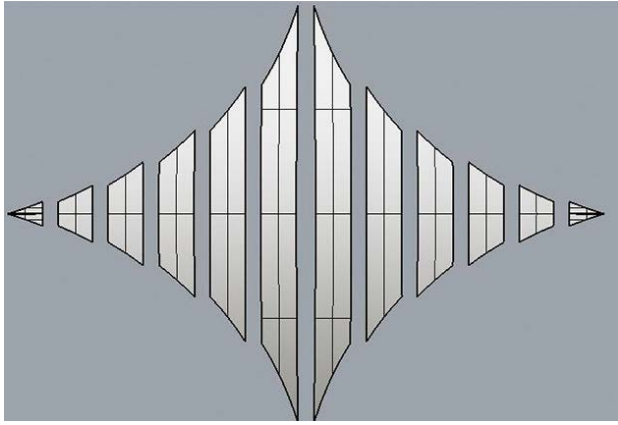


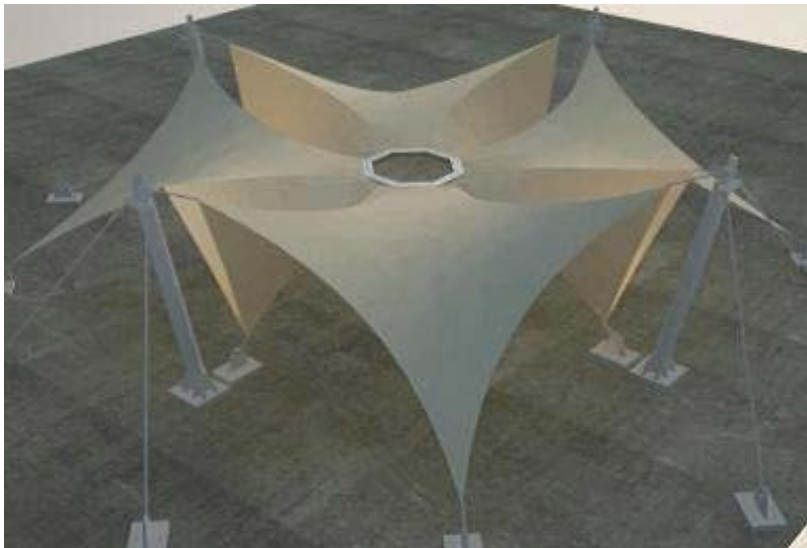
Figura 25. Imagen de la sección alineada y acomodada de la primera pieza de la velaría, vista en planta

Fuente: Morales (2013a).



Figura 26. El desarrollo del patronaje en esta investigación fue el punto de partida para desarrollar el prototipo final

Fuente: Morales (2013a).



Figuras 27, 28. Desarrollo del modelo en 3D

Fuente: Morales (2013b).

de una línea puesta como eje horizontal se alinearán de manera individual y consecutiva hasta volver a unir todas las piezas que se generaron en los cortes antes realizados. Así se conseguirá la alineación de la mitad de la primera sección. En seguida, se procede a unir las y el resultado da la unión se completa con las 4 partes de la original, esto con el fin de obtener secciones de unión para generar la curvatura deseada en la superficie.

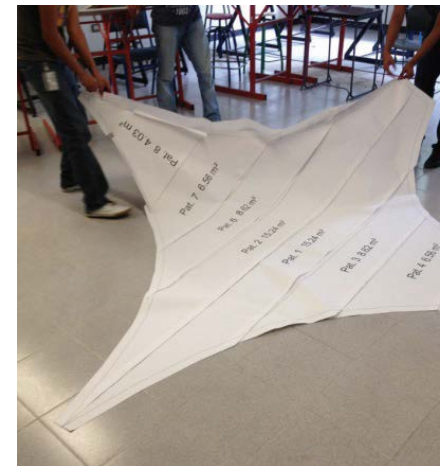
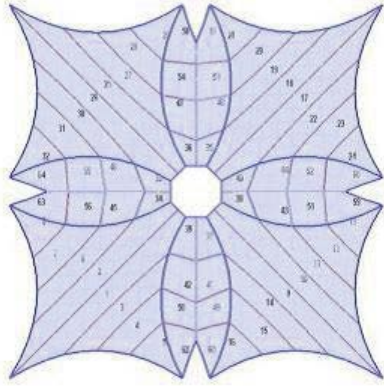
Esta semiunión constará de cuatro partes, que en un principio eran una sola (Figura 25). Posterior a la unión se tendrá que efectuar un corte de sección, esto para obtener el contorno de las secciones; teniendo el contorno, en las márgenes

nes de los costados de las partes proporcionales se dejarán puntos de fijación para el cocido de la superficie (Figura 26). Esto se hace para que posteriormente se puedan unir y no se alteren las dimensiones iniciales. Dichos márgenes se tienen en cuenta pues el traslape es necesario para que la velaría mantenga el mismo diseño del software y del modelo físico; los resultados deben ser exactos en unión y dimensiones para que la impresión del resultado sea efectiva y se pueda reproducir en un material adecuado a una escala más grande (Morales, 2013a; Morales, Martínez, Rivera y Flores, 2017).

Método por simulación y construcción

Diseño y modelación de una velaría. A partir de la experimentación anterior del método geométrico se define el siguiente ejercicio por medio del diseño de un software especializado y la construcción física de una velaría. El prototipo está compuesto de cuatro sillas de montar y su unión singular de valles entre ellas, en el centro se plantea una linternilla de tracción suspendida soportada por la fuerza de tensión que se genera en la superficie de la misma velaría. Primero se plantea realizar el patronaje de la superficie con el software WinTess⁴, este programa se desarrolla por densidad de fuerzas para generar la forma de la tenso-estructura, este ejercicio servirá para generar los detalles de unión de las velarías y la especificación del montaje de dicha tenso-estructura (Figuras 27 y 28), en consecuencia, se generan referencias conceptuales y constructivas que ayudarán a crear un modelo de tenso-estructura que podrá reescalar la forma, calcular su estructura y realizar el patronaje de la velaría del proyecto final; el mismo programa genera un render sencillo para observar cómo quedará en escala real la tenso-estructura (Figura 29), por ello se realizó el render, para así verificar cómo se integraría la estructura tensada al espacio físico de la facultad.

⁴ Software de diseño y análisis estructural de tenso-estructuras, <http://www.wintess.com>



Figuras 29, 30, 31. Manufactura de la velaría del proyecto de investigación
Fuente: Morales (2013b).

Posteriormente, al terminar, se crea el modelo físico virtual de la tenso-estructura, se desarrolla el patronaje en el programa y se hace la impresión de este patrón en hojas moduladas para dibujarla en el material. En este caso de estudio experimental se utiliza una manta de mezclilla blanda, la cual tiene la resistencia suficiente para soportar tensiones de $45 \text{ kg} \times \text{m}^2$, la escala escogida de este modelo es de 1:5, por lo que se plasmaron en la tela 64 piezas diferentes para formar la superficie (Figura 30); el proceso de costura fue detallado y laborioso, ya que se fueron dejando espacios para los cerramientos y las relingas, esto porque la costura de la membrana fue hecha en una máquina industrial que no era apta para la manta pero se ajustaba al presupuesto; también se realizó doble costura en las partes que llevan los sándwiches metálicos, así como en la linternilla, esto para reforzar la tela. Se agregó tela demás para obtener la inercia suficiente sobre la manta para el desgarramiento de las conexiones (Figura 31). Una vez concluida la superficie textil se extendió para saber las longitudes de la velaría y localizar sus puntos de anclaje.



Figuras 32, 33, 34. Conexiones metálicas de la tenso-estructura
Fuente: Morales (2013b).

Posteriormente se ejecutaron las conexiones metálicas y la manufactura de los mástiles metálicos, dichos postes se fabricaron con una unión articulada. En los sándwiches metálicos se realizaron articulaciones en bisagra paralelas a la cara de la conexión metálica. Estas últimas piezas se obtuvieron a partir del análisis del programa WinTess (Figuras 32 y 33), que arroja el dato de esfuerzo que soporta la unión, el siguiente paso fue obtener el patronaje impreso, así se procedió a calcular las medidas y los ángulos que debían tener los sándwiches (Figura 34).

Por último, las piezas de conexión se elaboraron en lámina de acero de 1/8" de calibre. En total fueron 28 piezas, las cuales se pintaron con anticorrosivo Primer y, posteriormente, con pintura normal; varios izamientos de las tenso-estructuras tuvieron múltiples perances, uno de ellos fueron las arrugas en la membrana, las cuales provocaron errores que no se deben tener



Figura 35. Conexiones diseñadas para el montaje
Fuente: Morales (2013b).

en la superficie de la velaría, lo cual se resolvió de la siguiente manera: el error estaba en una de las esquinas, su fijación estaba mal anclada y por ello se tuvo que corregir por medio de un tensor más largo donde el cable pudiera tener mayor recorrido y generar la tracción en todos los puntos (Figura 35); todos estos intentos de izaje ayudaron a mejorar la práctica académica de este ejercicio, apoyado por el programa virtual de Sastre.

Este ejercicio permitió ofrecerle al alumno un método de construcción más moderno para el sistema de tenso-estructuras (Morales, 2013b).

Resultados

Construcción de una tenso-estructura

A fin de comprobar que el método de simulación es el más eficiente y óptimo, se toma la decisión de realizar una tenso-estructura dentro de las instalaciones de la Facultad de Arquitectura. El desarrollo final de la investigación culmina con la construcción de una velaría y la realización del montaje de esta.

En primer lugar se hace el modelado de la velaría y su patronaje para realizar posteriormente su manufactura. Se determina realizar el ejercicio con el *software* de cálculo y diseño WinTess que genera la figura por densidad de fuerza, y determina la membrana y el patronaje de la figura propuesta para este ejercicio; con este *software* es posible realizar el modelo final, y es el mismo que se usará para representar físicamente la práctica. Para este modelo se usa una membrana resistente que ayuda a ajustarse al patrón de la plantilla realizada, por ello la primera actividad es escoger el material de la membrana que se va a utilizar, en este caso se selecciona a partir del material que hay en la región, por lo cual se opta por malla sombra con 95% de cerramiento solar; este material simula

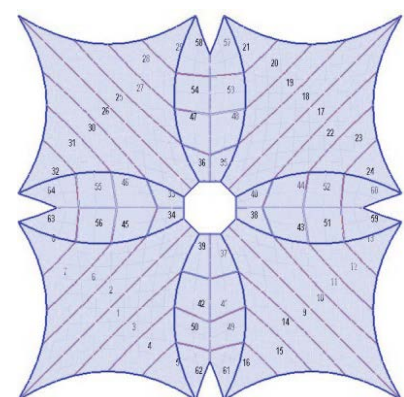
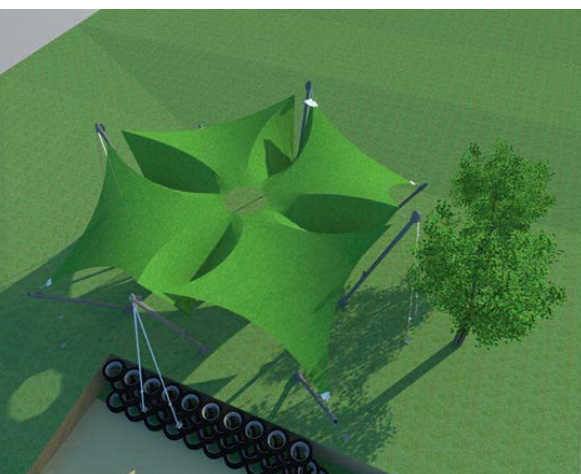
la membrana Serge Ferraria⁵, pero no tiene su misma durabilidad, esta tiene 5 años de desgaste, pero aun así sirve para desarrollar el modelo físico e imprimir el patrón obtenido, pero ahora a escala real (Figuras 36 y 37). Con este material se pueden generar las 8 piezas necesarias para construir la superficie parabólica; el material se pidió a una empresa de lonas que lo manufacturó con la guía de los patrones. En esta etapa fue de mucha importancia para los alumnos de licenciatura y de posgrado recordar o aprender que la supervisión continua es esencial para realizar las tenso-estructuras, ya que uno de los errores comunes en la fabricación es la inadecuada costura de los moldes, lo cual retrasa considerablemente la construcción de esta membrana, por lo que es de mucha ayuda la etapa práctica constructiva para aplicar la buena supervisión de obra.

Después de la manufactura de la membrana de la velaría se realizan las siguientes etapas de construcción y armado de la tenso-estructura (Figura 38): la construcción de la cimentación, el armado de uniones y el montaje del modelo. Dentro de la primera están los factores condicionantes en la construcción de la tenso-estructura, estos fueron:

Las cimentaciones estaban ya hechas por un ejercicio anterior, y se encontraban distribuidas en un rectángulo de 6 x 6 m, esto llevó a que por la escala la membrana tendría que cubrir un claro de 81 m² (9 x 9 m), tener una altura mínima de 2 m y una altura máxima de 5 m, por lo cual sus postes tendrían que descansar en el rectángulo de cimentación de 6 x 6 m.

Se encuentra un muro de contención a una distancia muy cercana al rectángulo de cimentación que limitaba el anclaje de los contravientos que sujetan uno de los postes principales, esto requiere una intervención de diseño sobre los postes para la resolución pertinente del problema.

⁵ Material elaborado con PVC y ETLs, que son derivados plásticos reforzados para resistir tracciones mayores en el material, <http://www.sergeferraribourse.com/>



Figuras 36, 37, 38. Diseño de la velaría y render del patronaje del prototipo
Fuente: Morales (2014).

Tales condiciones tuvieron consecuencias de diseño dentro de la construcción de la tenso-estructura. Como primera medida se realiza la velaría de una forma compuesta por un conjunto de cuatro paraboloides unidos por crestas, mediante diseño asistido por computador, en este caso, para la repartición de secciones de la membrana (patronaje). La membrana contiene un patronaje distribuido en 64 secciones las cuales fueron modeladas anteriormente en papel, para que los estudiantes pudieran verificar el ensamble de las partes de la velaría y la figura final del modelo de la tenso-estructura.

Luego se manufactura en malla sombra de color verde, que fue unida por medio de una costura industrial (Figuras 39, 40, 41); estas costuras fueron necesarias para que al momento de izar la membrana las fuerzas de tensión y compresión se generaran de una manera más adecuada en la velaría, y que la linternilla levitara en el centro de la membrana, ya que en este punto se comprueba el equilibrio de toda la estructura de una manera funcional. La supervisión de obra fue de mucha importancia para que no hubiera errores de corte y costura dentro de las uniones de la membrana; en los bordes se dejaron espacios para el paso de cables de acero forrados que tienen la función de relingas tensoras.

Detalles constructivos

Los detalles constructivos son uno de los puntos importantes del proceso de diseño de una tenso-estructura, y constituyen uno de los diez pasos para diseñar una velaría; en la práctica académica es importante que el alumno y el diseñador conozcan los diferentes tipos de soluciones que se pueden tener para dibujar los detalles constructivos; en este caso, esta base de datos (Llorens Duran, 2011) se extrajo del grupo de investigaciones de tecnología y arquitectura de la Escuela Técnica de Arquitectura en Barcelona de la Universidad Politécnica de Catalunya.

Una vez estudiadas las uniones por detallar se realizaron las piezas de los puntos de con-

exión de la membrana, estas eran en su mayoría de conexiones de borde y esquina simples que se pudieron resolver; la conexión de valle fue uno de los puntos donde se tuvo que realizar un detalle especial, que se verá más adelante, esta conexión se hizo con articulación de bisagra, posteriormente se marcan en la tela las uniones de esquina que tendrá la velaría, por lo cual se procede a la manufactura de la tenso-estructura con una malla sombra de 95 % de recubrimiento solar, y se refuerzan las esquinas con lona de PVC para que no sufra desgarramiento por tensión. El diseño de las uniones que componen la tenso-estructura ayuda para que la membrana pueda ser tensada en los puntos de apoyo del poste articulado. Las relingas ayudan a generar la forma de la vela en el borde y mantienen equilibrada la repartición de los esfuerzos que se producen en esta, en este caso se tuvo que colocar un acostillamiento⁶ en el que se introdujo

6 Cerramiento constructivo para reforzar las membranas con formas muy singulares, este detalle aumenta la resistencia a la tracción de la membrana (Morales, 2013b).



Figuras 39, 40, 41. Representación de la membrana dividida en secciones en las que se une la tela malasombra por medio de una costura industrial Fuente: Morales (2014b).



Figuras 42, 43, 44. Montaje de las uniones metálicas en la membrana Fuente: Morales (2014b).



Figuras 45, 46, 47.
Conexiones de refuerzo y accesorios de tensión para velaría

Fuente: Morales (2014b).

un cable de acero número 15 forrado en plástico dentro de la membrana. Este llega hasta las uniones de esquinas y se acopla a los reguladores que tensan la membrana.

Las uniones metálicas se diseñaron de la siguiente manera: para el área de los valles de la velaría, los puntos altos y los puntos bajos se manufacturaron con solera de acero con un espesor de 1/4" (Figuras 42, 43, 44).

Los mástiles encargados de dar pie a los soportes elevan la membrana, los contravientos sostienen el poste y deben tener una inclinación de 30 grados, con la finalidad de que los postes anclados sean estables y el viento no intervenga como un factor de fallas futuras dentro de estos anclajes. Los trabajos de tensión que generan los contravientos requieren de una fricción proveniente de la cimentación, por lo que se hace un cálculo aproximado de los agujeros que se excavarán para poder colar los contravientos; aquí se investigó cuál podía ser la proporción perfecta del concreto a fin de que tuviera una resistencia adecuada para sostener el contraviento correctamente. Se anclan los mástiles a la cimentación a base de pernos de 5/8" (Figura 45).

Para el armado de los contravientos se usa una varilla de 3/8" de 1,20m de longitud, con sus respectivos bastones de 5 cm de largo; para 6 contravientos ubicados en zona firme basta con un agujero de 30 cm de diámetro con una profundidad de 80 cm, mientras que en zona de pendiente irregular (colina artificial hecha a base de relleno compactado naturalmente) se colocan los agujeros de 50 cm de diámetro por 1,50 m de distancia; como es tierra de relleno y no está 100% compactada carece de buena fricción.

El segundo proceso que se realiza es planear y diseñar el anclaje de los postes a las conexiones metálicas de membrana, y diseñar los postes que sean útiles para retener los esfuerzos de la membrana. Estos anclajes deben ser articulados para poder controlar el ángulo de inclinación (figura 46); tienen que estar bien reforzados ya que el esfuerzo de tensión de la parte más alta de la con-

exión de la membrana con los postes es de aproximadamente 13 toneladas. Para esto, la solución fue una placa de 15x15 m soldada a los lados. Esta, al ser soldada por los dos lados, tiene un refuerzo para soportar el peso que cargan los postes de la membrana a la cimentación.

Posteriormente se colocaron los contravientos con listones de carga para camión con una resistencia de 8 toneladas de tensión. En la Figura 47 se puede apreciar que el poste se mantiene equilibrado gracias a que está fijo con contravientos anclados al suelo, lo que produce más resistencia de inercia ante la carga generada por los vientos, esto se debe a que el diseño triangulado del poste y los contravientos reparten su carga en tres puntos, y forman una figura estructural estable y precisa para soportar tensiones de 13 toneladas desde un solo punto para distribuir la carga a tres puntos. Cabe resaltar que para realizar un soporte se requirió de un tubo de 2" en el punto medio y los cables se sostienen por medio de "orejas" adosadas al tubo, 2 orejas en el poste más pequeño adosadas de extremo a extremo en la boca del tubo, y una oreja adosada al centro de la boca de este.

Montaje

El montaje es una fase importante tanto para el aprendizaje de los alumnos como para la práctica de supervisión constructiva, en esta fase se debe considerar desde el principio el lugar donde se va a realizar el montaje, y el tipo de tecnología o los materiales que se van a utilizar, por lo cual es importante tener claros los siguientes conceptos:

- La facilidad del montaje: que determinará la complejidad del diseño desde el inicio del proyecto.
- Introducción de la tensión: esta determina cuándo empezar a regular las conexiones para que la membrana empiece a tensar.
- La obtención de la forma final: se debe evitar la aparición de arrugas y se debe verificar si las conexiones se están colocando de manera adecuada.

A continuación se presenta el desarrollo del montaje de la velaría, el cual se llevó a cabo en dos tiempos, ya que se ejecutó con personal estudiantil y hubo varios errores. Estos errores sirvieron para reforzar el aprendizaje del alumnado y generaron el autoaprendizaje de dicha práctica innovadora.

En el primer montaje el izaje no tuvo éxito porque las esquinas no estaban correctamente alineadas a los postes más altos en donde se anclaría la velaría, esto provocó que la vela no se tensara y quedara aguada, lo que generó arrugas en la superficie (Figuras 48-52); el peligro de las



Figuras 48-52. Primer montaje de la velaría
Fuente: Morales (2014b).

arrugas es que la superficie delgada de la membrana no puede tener pliegues ya que sus tensiones no estarían equilibradas y entrarían esfuerzos externos que ayudarían a que las presiones de los vientos causaran un fallo en la estructura colapsando todo el sistema; por esta razón fue necesario desmontar completamente la membrana y reiniciar todo el montaje de dicha construcción. Se evidenció que no se cumplió el último paso –la búsqueda de la forma final–, por lo cual no se pudo mantener la tenso-estructura en equilibrio.

Posteriormente se realizó un segundo montaje en el cual se corrigieron las conexiones en las uniones y se redireccionó la unión en el sentido adecuado, por lo cual se tensó correctamente la velaría y se pudo adquirir la forma final deseada. Esta construcción final confirmó y comprobó que el programa que procesó el diseño por simulación es más práctico que los otros métodos, aunque en algunos casos específicos es deseable realizar más de un proceso de diseño, esto dependerá de la complejidad de la forma de la velaría; en este caso su forma coincidió en el modelo final que se montó (Figuras 53-57). Este método ayuda a que el diseñador adquiera una metodología de diseño que genere formas singulares para una tenso-estructura, y para manufacturar el diseño de una superficie mínima, orientada hacia las diferentes posibilidades en las que se pueden generar las geometrías de este tipo de estructuras. Este método también comprobó que los modelos más pequeños se comportan casi de la misma forma que uno de escala real, solo que su manufactura es mucho más larga, ya que en la construcción de una tenso-estructura los materiales definen los parámetros constructivos de estos proyectos de arquitectura (Morales, 2014b).

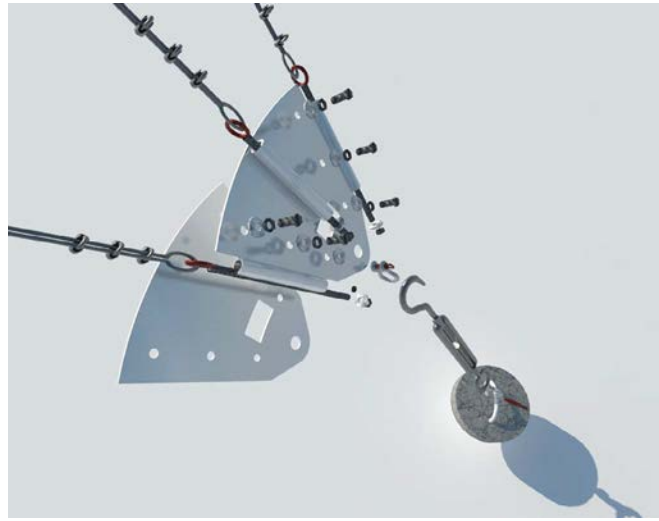
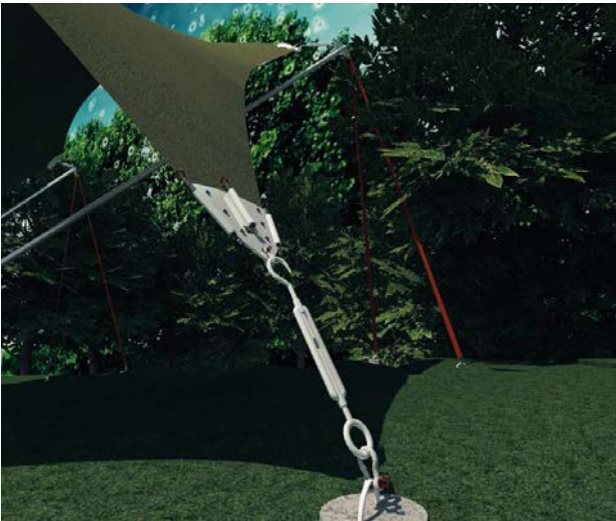
Discusión

Esta investigación se definió para espacios académicos y de aprendizaje aplicado. Su objetivo fue generar una metodología para el proceso de diseño de las tenso-estructuras con algunos



métodos ya utilizados, a fin de dar aportes que faciliten la propuesta de proyectos de velarías, por ello se abordan los métodos modelístico, geométrico, constructivo y de simulación. En un proceso anterior se expusieron las aplicaciones de dichos métodos que fueron pauta para la propuesta de diseño, por lo cual se desarrolla una superficie existente a través de un modelo a escala real, por medio del estudio de la geometría analítica, para encontrar coordenadas de modelos físicos modelísticos; esta es una de las herramientas más útiles para la realización de la forma de una velaría y su patronaje, por esto fue importante verificar el proceso de traslado de la forma del modelo a un entorno virtual y

Figuras 53-57. Segundo montaje de la velaría
Fuente: Morales (2014b).



Figuras 58-61.
Desarrollo del diseño de una velaría
Fuente: Morales (2014b).

darle medidas y formas para poder manufacturar (Figuras 58-64). Posteriormente, con el objeto de configurar la superficie mínima en un velaría se utilizaron varios ejemplos para solucionar el modelo final, como el uso de maquetas, el desarrollo de modelos en *software* como AutoCad 2010, Rhino 5 y WinTess, llegando a diferentes propuestas experimentales que ayudan a entender la forma de las tenso-estructuras y crean una metodología de diseño para formar su superficie modulada para su posterior producción.

El método adecuado para el diseño de una tenso-estructura dependerá de las condiciones del terreno y su función, en este caso se implementó el uso de la modulación por geometrías básicas como la parábola hiperbólica, por ello es importante tener en cuenta el espacio en donde se vaya a crear dicha estructura. Para formar los modelos aproximados se deben tener en cuenta características tales como la funcionalidad y la temporalidad de la estructura, con esto se determina de manera condicional y definitiva la forma de su diseño.

Es importante destacar que las tenso-estructuras se diseñan, la mayoría de las veces, de forma libre, es decir por el método modelístico, ya que el mismo proceso es tan versátil que se presta para efectuar dicha adaptación. Esta es una característica elemental que ayuda a formar diferentes posibilidades de tenso-estructuras, hasta llegar a disponer de una serie de formas complejas en las que se puede resolver un espacio arquitectónico; sin embargo, siempre se deben respetar las geo-

metrías con las que se crea una forma óptima, por ello se vincula el método geométrico, el cual ayuda corregir o confirmar si el modelo y la forma serán los mismos que se podrán obtener al final, con esta premisa se hace un desarrollo metodológico de la traslación de la forma física del modelismo a un entorno virtual, con programa tan común como el AutoCAD, y así desarrollar el patronaje de la traslación de los modelos físicos.

Por último, se analizaron los métodos de simulación y construcción, estos presentan la facilidad de realizar propuestas arquitectónicas de las tenso-estructuras en los proyectos de arquitectura. La mayor parte del aprendizaje de estos sistemas estructurales nuevos es la utilización de *software* especializado en el tema –en este caso el WinTess–, hay una variedad en el mercado, y cada alumno o diseñador puede utilizar el deseado, esto dependerá de qué tipo de proyectos quiere hacer; en este caso, el WinTess tiene una buena capacidad de resolver modelaciones físicas, esto se puede observar en los proyectos realizados por Sastre. Lamentablemente, no se enseñan en la mayoría de universidades por la falta de recursos financieros o desconocimiento del tema por falta de profesorado capacitado. Este método, combinado con el método constructivo, y afinado por la simulación, ayuda a que el proceso de diseño sea más objetivo para generar mejores propuestas (Figuras 65-69).

En la academia son pocas las universidades en la actualidad que realicen un método singular de



adaptación y de traslación por simulación y construcción, la mayoría utiliza los métodos modelístico y geométrico. Algunas que sobresalen en América Latina son: Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Ricardo Palma, Universidad Central de Venezuela, Universidad de São Paulo. Asimismo, algunas instituciones en Europa ya implementan este tipo de ejercicio práctico, como la Universidad Politécnica de Catalunya, el Politécnico de Milán y la Universidad de Anhalt; sin embargo, en lo disciplinar y en lo práctico no todos los profesionales o estudiantes tienen al alcance estos *software* especializados para desarrollar propuestas constructivas de tenso-estructuras de sus proyectos, por lo cual los enfoques metodológicos vistos aquí son una ayuda para el diseñador o el estudiante; estos ofrecen una infinidad de posibilidades de generar formas de superficies mínimas y aplicarlas a la arquitectura (Llorens, 2015).

Conclusión

Las tenso-estructuras son sistemas estructurales que se distinguen por la singularidad de su forma, por lo que su diseño es difícil de realizar sino se tienen bien claros los conceptos preliminares de cómo proponer una velaría. Dada esa dificultad, esta investigación generó una metodología más amigable para el diseñador a la hora de aplicarlos en los proyectos arquitectónicos, de la cual podrá derivar diferentes formas para diseñar una tenso-estructura y poder conseguir la generación de la forma óptima de una superficie mínima por varios métodos que se pueden utilizar como herramientas metodológicas para los diseñadores, lo que permitirá desarrollar detalles constructivos más acordes y congruentes con la generación de proyectos arquitectónicos.

El aporte en la arquitectura está influenciado por el constante desarrollo de la tecnología, ya en las últimas décadas los materiales han sido un factor cada vez más determinante dentro del sistema constructivo; la aparición de materia-



Figuras 62-64. Desarrollo del diseño de una velaría
Fuente: Morales (2014b).

les como el ETFE y el PVC reforzado con membranas elásticas o de multicapas ayuda a hacer eficiente la durabilidad y capacidad estructural de las tenso-estructuras. En la actualidad, esta mejora constante del material hace que sea cada vez más recurrente su utilización. Las estructuras de tracción son sistemas fáciles de montar en la construcción y generan un aporte estético mucho más relevante que otros sistemas constructivos. La singularidad de las formas y la ligereza generan un carácter arquitectónico único para espacios arquitectónicos y urbanos dentro de la ciudad, sus aplicaciones pueden ser tanto para espacios urbanos –parques, plazas y teatros al aire libre– como para espacios arquitectónicos –fachadas de rascacielos, azoteas de edificios o patios interiores, etc.–.

Todas estas ventajas llevan a la conclusión de que al desarrollar una metodología de diseño que permita hacer una propuesta formal de una superficie mínima aplicable a la arquitectura, esta debe tener la viabilidad de manufacturar y construir dicha modelación hasta llegar a realizar la estructura con todos sus detalles constructivos; esto no obvia la etapa de cálculo, pero el tener una idea de cómo concebir una tenso-estructura y cómo

proponerla ayuda a mejorar su concepción de diseño. Por esta razón se pensó en generar una práctica académica que aplicara los métodos de diseño para crear una velaría y encontrar la forma más óptima de utilizarla en un proyecto, por ello se recurrió a la ayuda de *software* (AutoCAD 2010, Rhino 5 y WinTess), encontrando herramientas virtuales que ayudan a generar modelos de velarías en 3D, y permiten saber las dimensiones exactas de todos sus lados como son distancias, ángulos de inclinación, alturas, curvaturas y longitud de superficie, etc.

En consecuencia, con el uso de datos de los programas que se utilizaron y el método de tras-

laciones que se generó se pueden desarrollar los patrones y módulos que ayudarán a construir una propuesta de tenso-estructura, y manufacturar sus partes de anclaje y soporte, esto ayudará a tener grandes posibilidades de interpretación del espacio arquitectónico y creará parámetros de diseño que se puedan aplicar a los proyectos de arquitectura.

Por último, cabe señalar que la innovación de esta investigación es que la aplicación del proyecto se hizo con alumnos de licenciatura y posgrado, y que la creación y aplicación del conocimiento se trasladó a una nueva generación de talentos humanos que tendrá una competencia innovadora en su praxis profesional.



Figuras 65-67. Segunda propuesta de velaría en la Facultad de Arquitectura
Fuente: Morales (2014b).



Figuras 68 y 69. Segunda propuesta de velaría en la Facultad de Arquitectura
Fuente: Morales (2014b).

Referencias

- Banco, A. (2007). *Arquitectura textil. Transformación del espacio*. Madrid: Poseidón.
- Bautista, L. D., Castillo Rosas, J., Hernández Morales, M. O. y Pérez Flores, A. G. (2011). Paraboloides hiperbólicos [figura]. Recuperado de <http://losguaposdedibujos601b.blogspot.com.co/2011/09/paraboloides-hiperbolicos.html>
- Berger, H. (1996). *Light Structures - Structures of Light: The Art and Engineering of Tensile Architecture Illustrated by the Work of Horst Berger*. Suiza: Basel.
- Carpatex (s. f.). *Cubiertas textiles para colegio* [figura]. Recuperado de <http://carpatex.es/wp-content/gallery/membrana-textil-en-colegio/membrana-textil-2.jpg>
- Conrad, R. (1979). *Frei Otto: estructuras, estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Engel, H. (2006). *Sistema de estructuras* (4 ed.). México: Gustavo Gili, S.A.
- Escrig, F. (1997). *Star: Structural Architecture*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Eyssautier Petit, C. (2012). *Velaría de exposición. Licra y madera / 60 x 30 cm* [figura]. Recuperado de <http://www.claudetteeyssautier.com/obra/arquitectura/maqueta10G.jpg>
- Llorens Duran, J. I. (2011). Los detalles constructivos de las tenso estructuras. IV Simposio Latinoamericano de Tenso Estructuras, Universidad de la República, Facultad de Arquitectura. Montevideo, Uruguay. Recuperado de: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/15512/PONENCIA_LLORENS.pdf
- Llorens Duran, J. I. (2015). VI Simposio Latinoamericano de Tenso-estructuras. Realizado conjuntamente con el Congreso de la IASS, Brasilia, 2014. *Revista Informes de la Construcción*, 67 (537), 4-5 Recuperado de: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4059/4626>
- Moore, F. (2000). *Compresión de las estructuras en la arquitectura*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Morales Guzmán, C. C. (2012). *Diseño de sistemas flexibles en el espacio arquitectónico*. Madrid: Editorial Academia Española
- Morales Guzmán, C. C. (2013a). Estancia posdoctoral: arquitectura tensada. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Morales Guzmán, C. C. (2013b). Estancia posdoctoral: arquitectura transformable e itinerante. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Morales Guzmán, C. C. (2014a). Desarrollo y construcción de una tenso estructura en la práctica académica. Congreso Internacional de Ciencia y Sustentabilidad. *Academia Journal*.
- Morales Guzmán, C. C. (2014b). *Experiencia educativa: diseño arquitectónico. Detalles*. Veracruz: Universidad Veracruzana, Poza Rica.
- Morales Guzmán, C. C. (2016). Construcción experimental de un sistema transformable tensado plegable. *Revista de Arquitectura*, 18 (1), 98-110. doi: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2016.18.1.9>
- Morales Guzmán, C. C. y Rivera Torres, H. (2013). *Generación de patronajes para las cubiertas ligeras tensadas*. Congreso Internacional de Ciencia y Sustentabilidad. *Academia Journal*, 578-584. Recuperado de: <https://drive.google.com/drive/folders/0B4GS5FQQLif9fnlJTFVpS-k5LM2YtTWN2NW1GQTVKaENsanU-1dEc0OHplQnAxR0FaZEJ1Slk>
- Morales Guzmán, C. C., Martínez Cruz, C., Rivera Torre, H. y Flores Gutiérrez, A. (2017). Desarrollo de la forma de una tenso-estructura en el diseño por computadora. *Revista Procesos Urbanos*, 4, 250-272. <https://doi.org/10.21892/issn.2422-085X>
- Otto, F. (1962). *Cubiertas colgantes*. Barcelona: Labor.
- Rosenfiel, K. (2016). Pabellón de Filamento de Élitros, render, V&A Jardín John Madejski. Imagen © ICD/ITKE University of Stuttgart [figura]. En *Plataforma Arquitectura*. Achim Menges crearán pabellón robótico para V&A Recuperado de [https://images.adsttc.com/media/images/56b2/4f1f/e58e/cee7/e100/084a/slideshow/Elytra_Filament_Pavilion_render_V_A_John_Madejski_Garden_2016_%C2%A9_ICDITKE_University_of_Stuttgart_\(2\).jpg?1454526216](https://images.adsttc.com/media/images/56b2/4f1f/e58e/cee7/e100/084a/slideshow/Elytra_Filament_Pavilion_render_V_A_John_Madejski_Garden_2016_%C2%A9_ICDITKE_University_of_Stuttgart_(2).jpg?1454526216)
- Sastre Sastre, R. (1981). *Software Tensile Architecture WinTess 2*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de <https://tecno.upc.edu/profes/sastre/tensile.php>
- Sombrared (2014). *Estacionamiento isla* [figura]. Recuperado de https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-05-08_01-03-2299859.jpg
- Tensile Structures Education (2018). *Textile architecture* [figura]. Recuperado de <https://tensilestructureseducation.files.wordpress.com/2015/03/cropped-tensile-structures-education.jpg>
- Tensoestructuras de diseño (s. f.a). *Conoide* [figura]. Recuperado de https://fotos.habitissimo.com.mx/foto/conoide_44129
- Tensoestructuras de diseño (s. f.b). *Velaría de dos crestas y un valle de arco en planta circular* [figura]. Recuperado de https://fotos.habitissimo.com.mx/foto/velaria-de-dos-crestas-y-un-valle-de-arco-en-planta-circular_44099