

Diseño y desarrollo de cubiertas ligeras formadas con sistemas de tensegridad

Design and development of lightweight roofs formed with tensegrity systems

DOI: 10.17981/mod.arq.cuc.31.1.2023.01

Artículo. Fecha de Recepción: 1/1/2023. Fecha de Aceptación: 1/2/2023.

Carlos Cesar Morales Guzmán 

Universidad Veracruzana. Veracruz (México)

dr.arqmorales@gmail.com

Para citar este artículo:

Morales, C. (2023). Diseño y desarrollo de cubiertas ligeras formadas con sistemas de tensegridad. *MODULO ARQUITECTURA CUC*, 31, 9–52. <http://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.31.1.2023.01>

Resumen

El presente trabajo se desarrolló el diseño de cubiertas ligeras específicamente en el área de la tensegridad, ya que este tipo de estructuras pueden llegar a cubrir claros importantes, se estudiara su modelo de diseño para realizar un prototipo experimental, el cual podrá determinar qué tipo de uniones pueden manufacturar en este sistema estructural, este simulado por el software Robot Analysis Structural y Solid Work, por lo que esta disertación se centró en el estudio de una metodología del diseño para generar modelos constructivos estructurales, adecuados para realizar cubiertas de tensegridad, por lo cual se ejecutó una metodología para construir dichos sistemas y fuesen más sencillos de diseñar, con ellos generamos ejemplos de aplicación y uso de este tipo de sistemas estructurales, por lo que se presentan algunos casos académicos que se desarrollaron en los talleres de diseño de la carrera de Arquitectura y el tipo de cubiertas modeladas que pueden generar un uso practico.

Palabras clave: Estructuras de Tensegridad; Metodología de Diseño; Manufactura del Detalle Constructivo

Abstract

The present work developed the design of light covers specifically in the area of tensegrity, since this type of structure can cover important clearings, its design model will be studied to make an experimental prototype, which will be able to determine what types of joints can be manufactured in this structural system, it is simulated by the Robot Analysis Structural and Solid Work software, so this dissertation focused on the study of a design methodology to generate structural construction models, suitable for making tensegrity roofs, therefore which a methodology was executed to build these systems and they were simpler to design, with them we generate examples of application and use of this type of structural systems, for which some academic cases that were developed in the design workshops of the career are presented. of Architecture and the type of modeled roofs that can generate a practical use.

Keywords: Tensegrity Structures; Design Methodology; Construction Detail Manufacturing

INTRODUCCIÓN

En la siguiente investigación se desarrollará un modelo de cubierta ligera generada en una red de tensegridad. Esta propuesta se basa en las teorías del Arquitecto Kenneth Snelson (<http://www.kennethsnelson.net>), personaje el cual se tiene creada una serie de premisas las cuales permiten incorporar nuevas dimensiones a una red comprimida a base de tracciones; al basarse en este principio de postes y redes de cables atirantados se verifica que la ligereza y el peso propio de una construcción puede disminuir el tiempo de edificación en las cubiertas ligeras para cubrir grandes luces; cabe mencionar que dicha propuesta final se desarrollara con materiales reciclados y sostenibles, lo cual mejora la transportabilidad de estas estructuras, generando una reducción de peso en el sistema; esta implementación la hace menos agresiva al medio ambiente en comparación a otros materiales, mejorando el ciclo de uso de la reutilización de los materiales.

El propósito de esta disertación es el estudio de esta forma y su aplicación en el diseño, donde también se verifica sus propiedades constructivas en la arquitectura, pudiendo concluir en una propuesta tecnológica constructiva más sencilla de desarrollar, y también, verificar las ventajas que conlleva al realizar una serie de pasos para entender un sistema cerrado, para primeramente entender que es una tensegridad, ya que existe una variedad de

formas de realizar una sistema tensado, pero, para esta disertación se realizara en base a un modelo de tensegridad simple, el cual estara conformado solamente de elementos donde su figura se realizara a base de poliedros, los cuales pueden ser triangulares, cuadrangulares, pentagonales, hexagonales, etc., condicionando a realizar los modelos de diseño en formas más exactas para que el modelo puede ser un sistema cerrado, esto quiere decir que, cualquier punto de apoyo de dicho prototipo podrá ser anclado al suelo y no perderá su propiedad en el pretensado, a comparación de los modelos de sistema abiertos los cuales necesitan de un apoyo para poder anclarse y de ahí obtener el pretensado en el sistema.

Para conseguir esos objetivos se desarrollara una metodología de diseño para construir un sistema de tensegridad el cual se pueda desarrollar con una sencillas y facilidad para generar sistemas de tensegridad abiertos, los cuales puedan ser en cualquiera de sus puntos una apoyo de anclaje, lo cual conlleva a generar experimentaciones en la forma, desarrollando geometrías a base de poliedros de tensegridad simples, por lo que la construcción experimental desarrolla un papel especial en la presente disertación, y en consecuencia se generara un módulo experimental a escala 1:1 para demostrar la capacidad de manufactura y estabilidad constructiva, dando a una propuesta de cubierta de grandes luces o de implementación urbana para áreas sociales o recreativas.

METODOLOGÍA DE DISEÑO

Hipótesis: Definición y Teoría

Antes de presentar una metodología se definiran las características que deben cumplir en este tipo de sistemas estructurales para que se les pueda considerar tensegridad. La teoría dice:

La palabra tensegridad es un invento: es la contracción de integridad tensional. Tensegridad describe un principio estructural en el que la forma estructural está garantizada por un número finito cerrado, integral, con tensión continua en el sistema y no por las conductas exclusivamente locales de los miembros de compresión discontinua... (Fuller & Applewhite, 1975, p. 1).

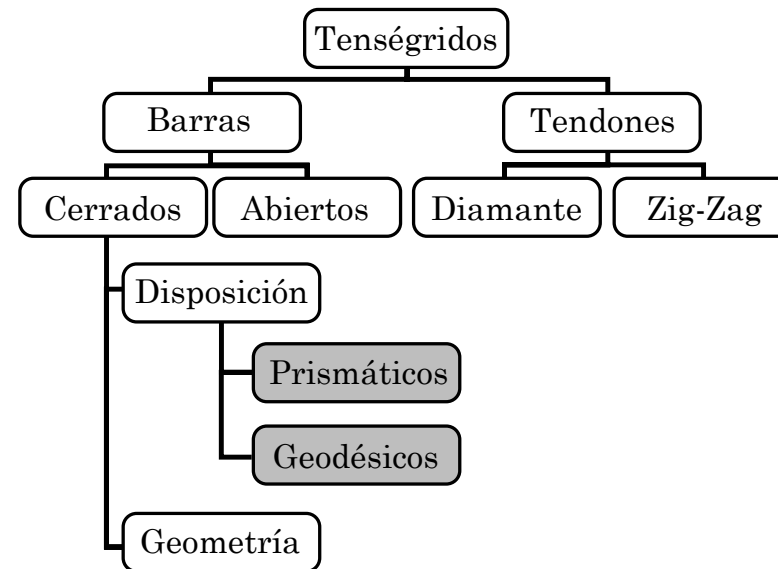
Primeramente, su primer característica: el equilibrio y su estabilidad, las cuales debe ser constante, porque el sistema se cimienta en su equilibrio para soportar movimientos externos, este equilibrio por sí mismo no necesita otra condición de sujeción y es independiente de fuerzas externas (incluso la gravedad) o anclajes debido a su estado inicial de pretensado la estabiliza su propia forma.

La segunda característica es que esta constituido por componentes y no elementos; en contraste al término ‘elemento’, puede ser una barra, un cable, una membrana, un volumen de aire, un ensamble de componentes elementarios, etc., por lo que un componente puede ser

comprimido o traccionado y reparte mejor ese esfuerzo que ejerce en la masa, generando una unidad estable de módulos por el pretensado inicial (Motro, 2013).

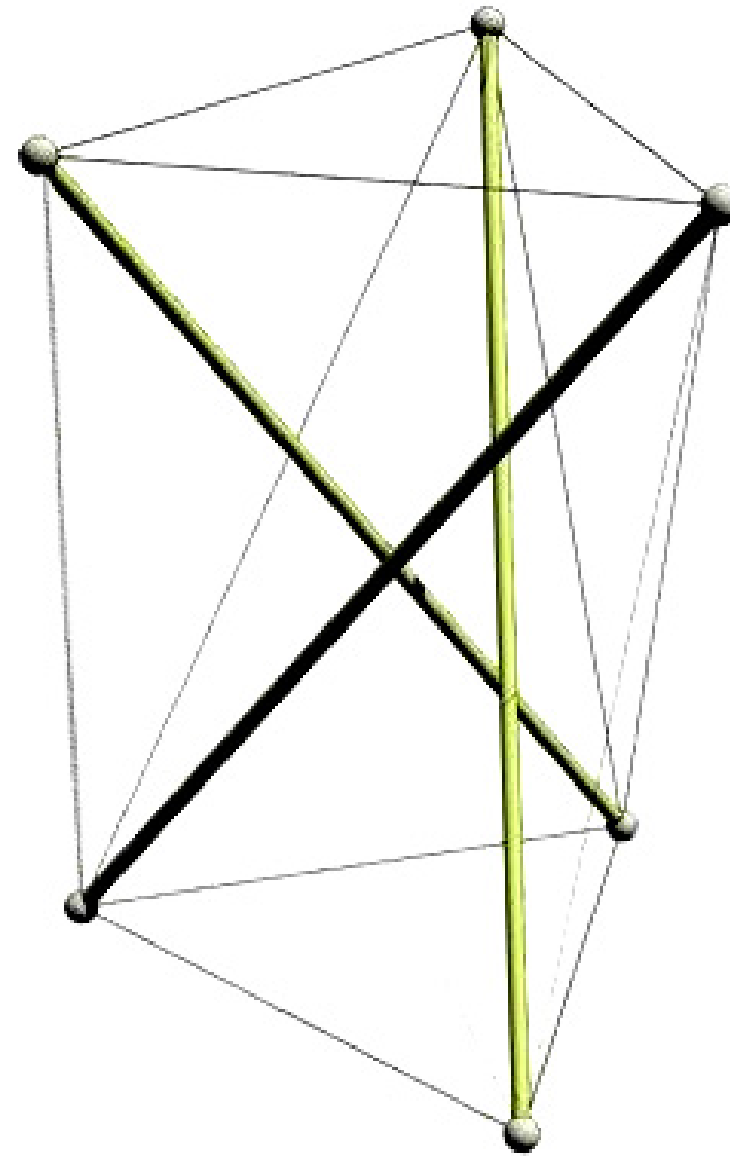
Una característica añadida al sistema es la utilización de barras de bambú como un elemento sostenible el cual puede sustituirse en algún momento por otro elemento de la misma especie de bambú, también ayuda a bajar el peso de dicho sistema estructural, mejorando la transportabilidad de la propuesta final, con ello obteniendo una mejora en la estética de la estructura, la cual mejorara la arquitectura de la construcción.

FIGURA 1.
Esquema básico de diseño de una Tensegridad.



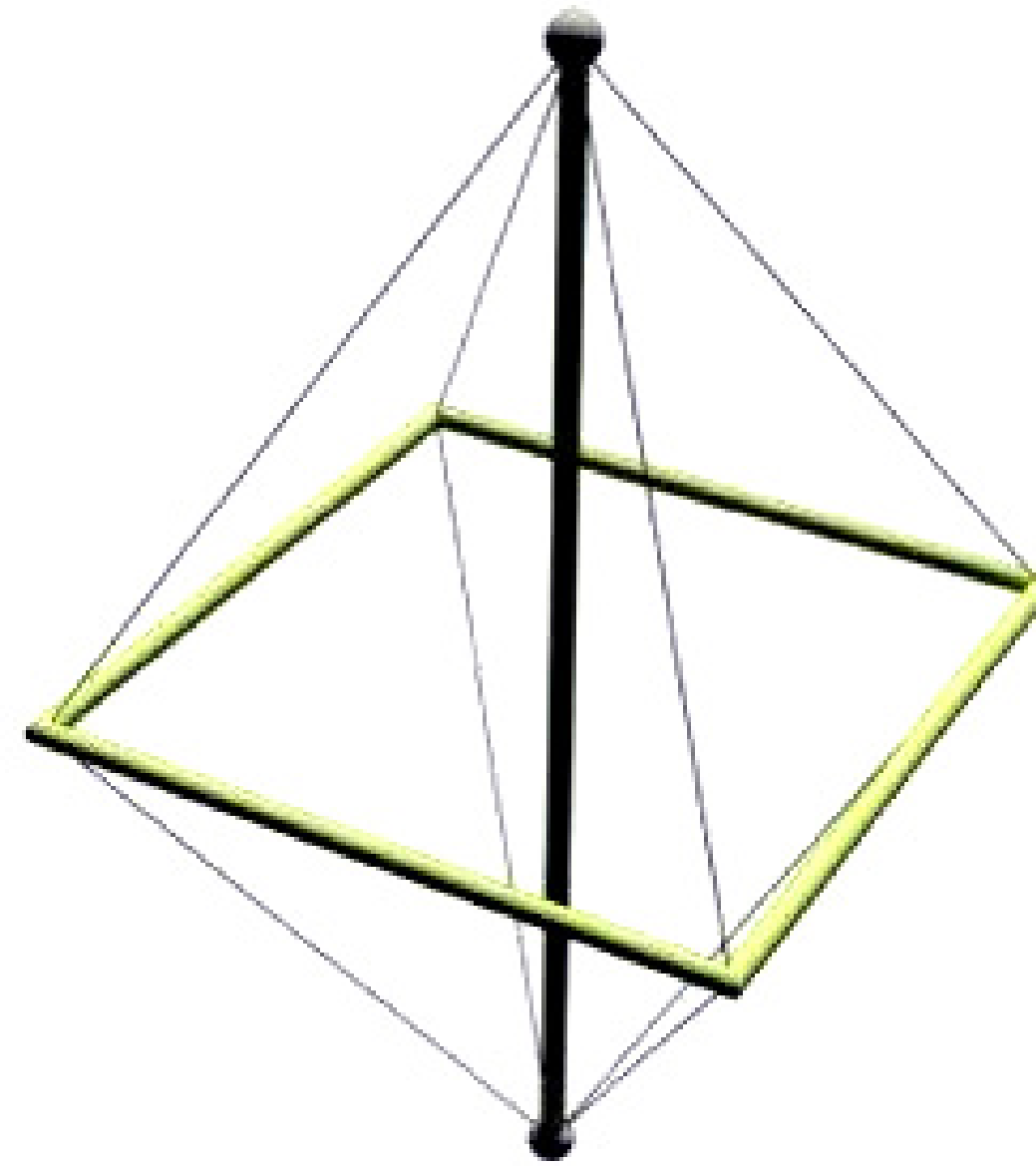
Fuente: Ricaño (2017).

FIGURA 2. Configuraciones básicas de la Tensegridad.



Fuente: Ricaño (2017).

FIGURA 3. Configuraciones básicas de la Tensegridad.



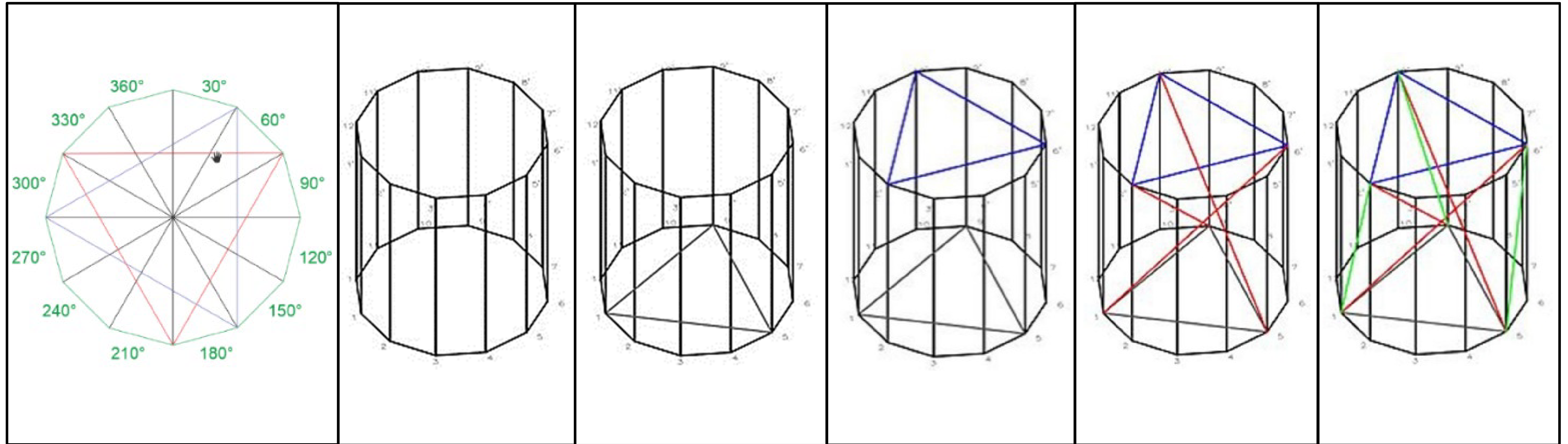
Fuente: Ricaño (2017).

Estas descripciones y características nos dan el componente de diseño para desarrollar el tipo de tensegridad que vamos a diseñar, por ello se describen los pasos de configuración a continuación (Figura 1): las barras podrán estar configuradas con un sistema cerrado o abierto con la posibilidad de tener una disposición primaria o geodésica (Figura 2; Figura 3); en cuanto a los tendones, pueden estar conectados a las barras en posición de diamante o en zig-zag dando el componente geométrico final, el cual para este caso desarrollara volúmenes prismáticos de base poliédrica para poder desarrollar una matemática simple en la geometría final, permitiendo construir un sistema de tensegridad cerrado (donde cualquier componente puede ser un apoyo de anclaje) y no un tensegridad abierto (el cual necesita de un anclaje para cerrar el sistema), por ello se evocara a los sistemas de tensegridad cerrada (Broto, 2006; Bustelo, 2005).

Búsqueda de la Forma

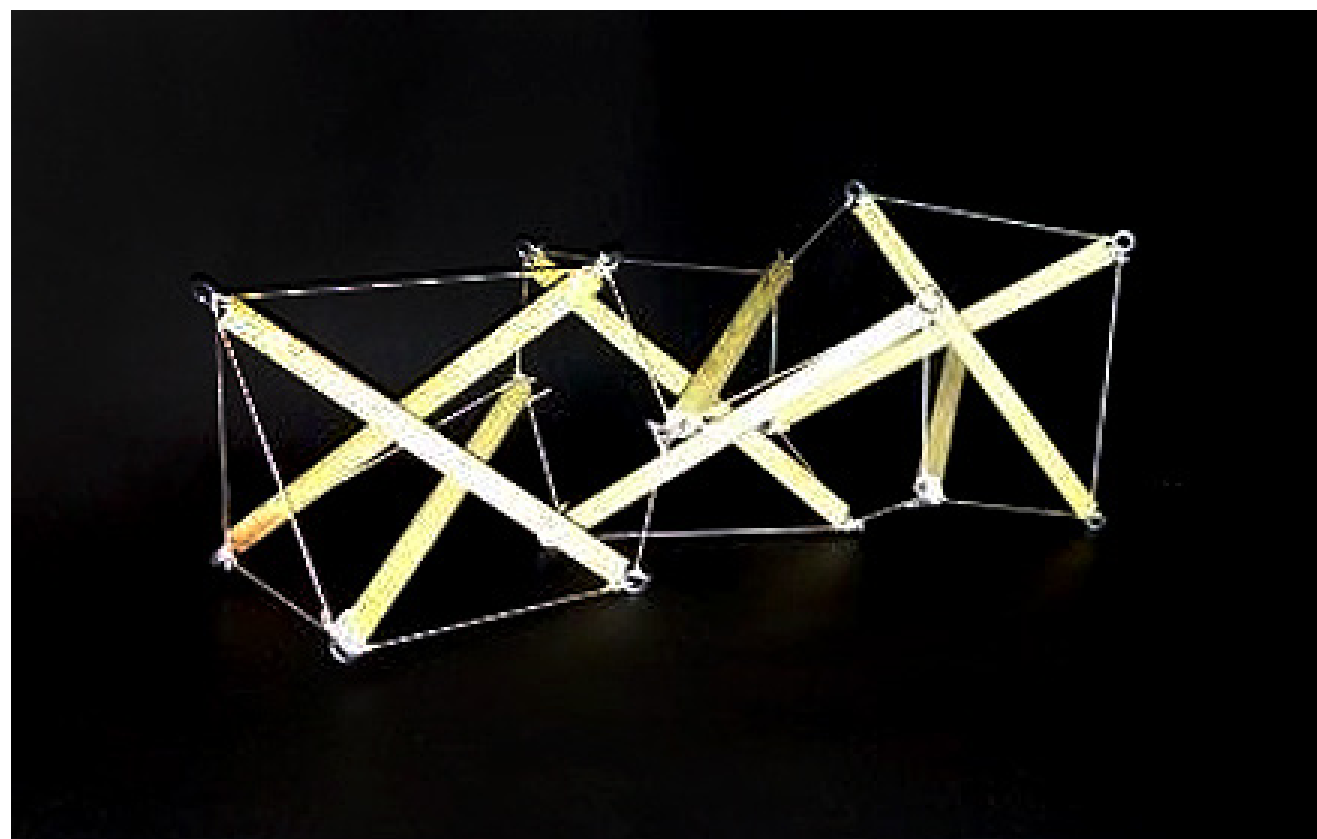
Para entender cómo desarrollar la forma de un sistema de tensegridad desarrollaremos modelos geométricos prismáticos, derivados de una tensegridad simple, la cual se genera con caras planas en su parte superior e inferior, permitiendo que la altura pueda variar, al igual que el tamaño de la cara superior e inferior (Figura 4), por lo que su configuración es bastante sencilla de ejecutar para realizar las primeras aproximaciones de diseño de este sistema geométrico (Figura 5; Figura 6; Figura 7).

FIGURA 4.
Geometrías prismáticas básicas para desarrollo de un módulo de tensegridad.



Fuente: Ricaño (2017).

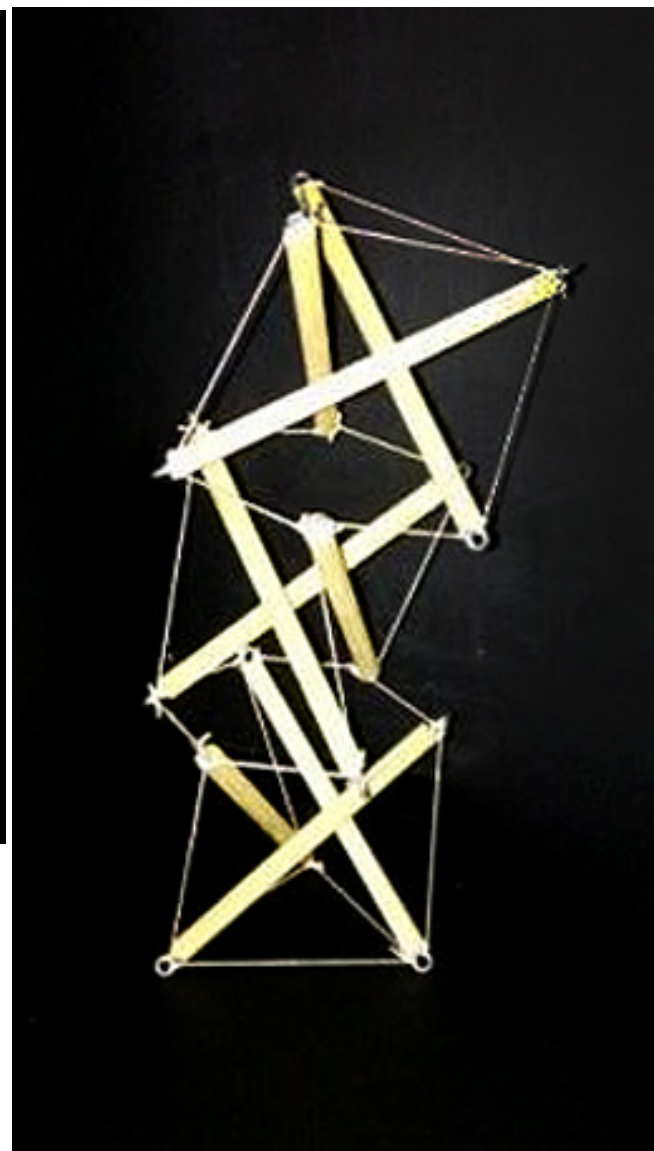
FIGURA 5. Modelación de un módulo prismático tensado.



Fuente: Ricaño (2017).

Posteriormente, se construye una tensegridad simple de cara triangular en la parte superior e inferior del prisma, configurando los tendones en zig-zag para generar la tensión en las barras y comprimirlas al grado de que traccione todo el componente en varias direcciones, dando la estabilidad y auto equilibrio en su propio sistema,

FIGURA 6. Modelación de un módulo prismático tensado.



Fuente: Ricaño (2017).

FIGURA 7. Modelación de un módulo prismático tensado.



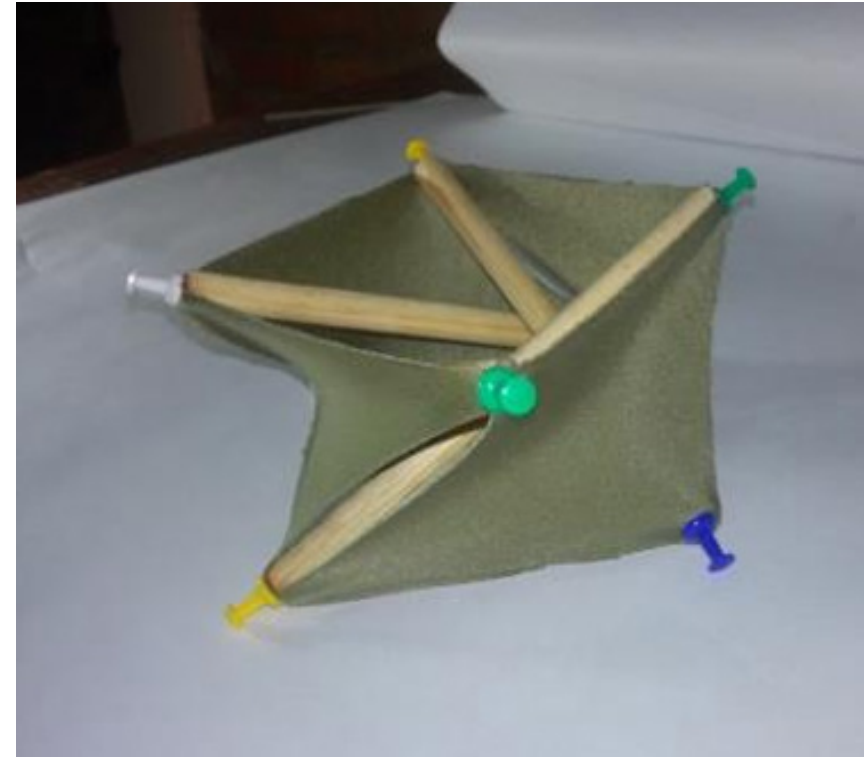
Fuente: Ricaño (2017).

FIGURA 8. Configuraciones más complejas partiendo del módulo básico prismático.



Fuente: Ricaño (2017).

FIGURA 9. Configuraciones más complejas partiendo del módulo básico prismático.



Fuente: Ricaño (2017).

FIGURA 10. Configuraciones más complejas partiendo del módulo básico prismático.



Fuente: Ricaño (2017).

FIGURA 11. Configuraciones más complejas partiendo del módulo básico prismático.



Fuente: Ricaño (2017).

por lo que, el siguiente paso se desarrolla una serie de configuraciones de este prisma (Figura 8; Figura 9; Figura 10; Figura 11). Primeramente se superponen los componentes en forma

vertical hasta formar una columna tensada que se puede tener en diferentes posiciones gracias al sistema cerrado que se está aplicando en los modelos, la cual tiene la propiedad de que

cualquier cara puede ser apoyada en una base; en consecuencia se realiza una configuración geométrica de forma de arco cerrado con los mismo componentes prismático tensados,

por lo cual se puede notar que una figura simple y modular puede volverse compleja pero mejor equilibrada si se combina adecuadamente a la forma todos sus componentes.

FIGURA 12. Desarrollos más complejos.

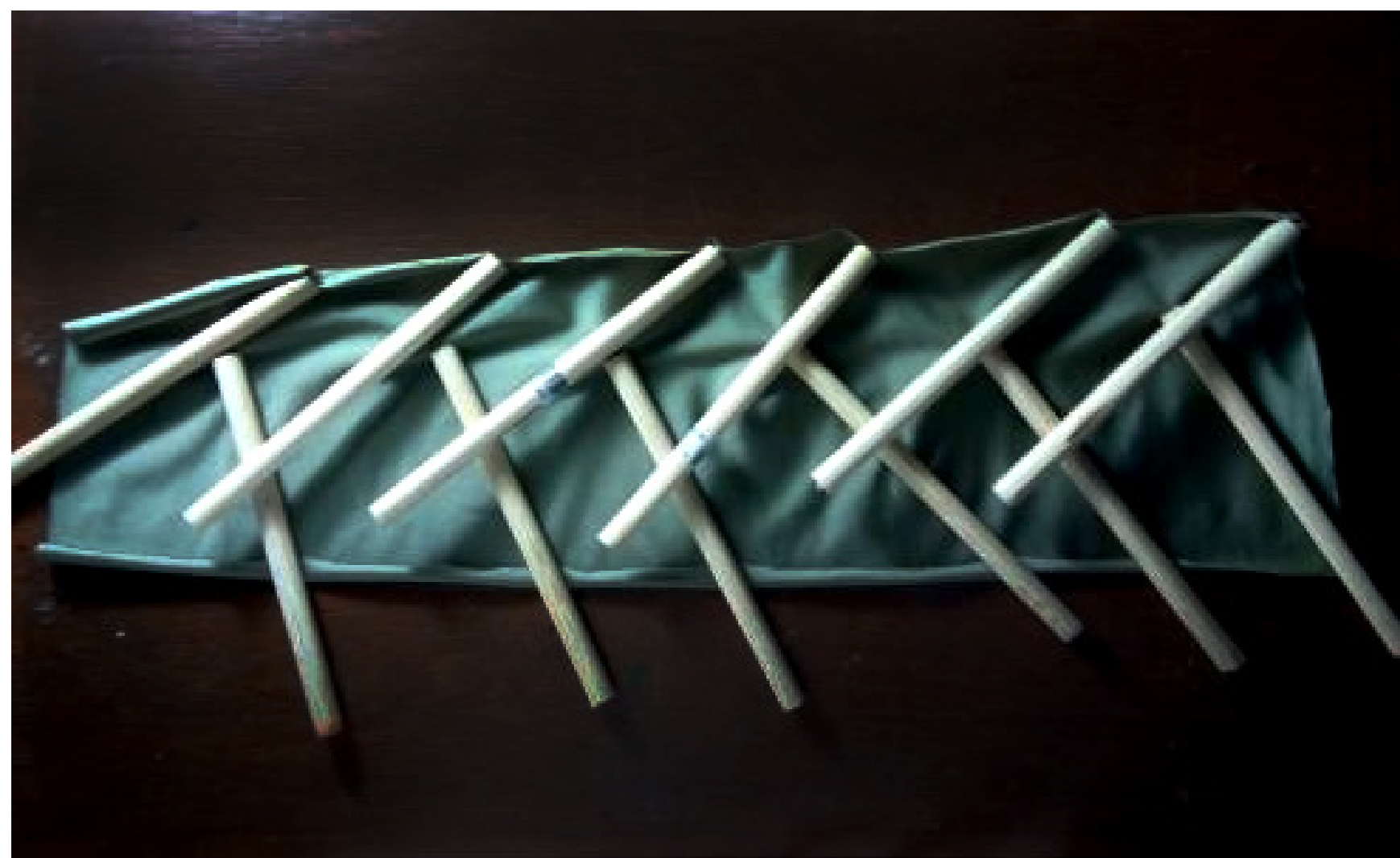


Fuente: Ricaño (2017).

Se realizaron también modelos en donde los tendones o cables son una membrana y la configuración del componente generaba aún más estabilidad y equilibrio al sistema

y una aplicación más funcional a los futuros modelos arquitectónicos que se podrían desencadenar si se toma en cuenta desde un principio el modelado de una membrana

FIGURA 13. Desarrollos más complejos.



Fuente: Ricaño (2017).

dentro de una tensegridad (Figura 12; Figura 13); para estos ejemplos se construyeron con primas cuadrados, hexagonales y decágonos, cuya característica constructiva del modelo

fue interesante ya que se pudo realizar un patronaje para pretensar la geometría final de los modelos elaborados (García-Diego et al., 2000; Morales, 2019a).

Desarrollo Geométrico Analítico

La construcción de la forma dentro de la tensegridad necesita alcanzar estados de equilibrio y de estrés para mantener su equilibrio, cuando se cambian las distancias de los componentes de este sistema, la interacción entre los componentes produce el denominado estrés; en sí lo que se busca es la manera de equilibrar los esfuerzos de los componentes que interactúan. [Motro \(2013\)](#) dice: “que los sistemas tensegrity se encuentran en un estado de auto equilibrio estable, esto mismo describe el equilibrio de los nodos, el auto estrés es tridimensional ya que en casi todos los sistemas tensegrity son de sistema espacial” (p. 10).

Para poder elaborar un modelo de tensegridad simplex en un software se necesita determinar la altura (h) y el radio superior o inferior definido anteriormente, se realizarán las siguientes ecuaciones para poder obtener las longitudes de los elementos traccionados externos (t) y comprimidos (p), los ángulos de torsión (a), y en consecuencia se utilizarán dichas ecuaciones para determinar las figuras mediante un software básico como AutoCAD o Sketchup. Por lo que aplicaremos las siguientes fórmulas:

Para obtener la longitud de los elementos a compresión se aplica la fórmula (1):

$$p = \sqrt{r1^2 + r2^2} + 2(r1)(r2)\text{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2 \quad (1)$$

La longitud de los elementos a tracción se consigue utilizando la ecuación (2):

$$t = \sqrt{r1^2 + r2^2} - 2(r1)(r2)\text{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2 \quad (2)$$

El ángulo de torsión emplea la fórmula (3):

$$a = 90^\circ - \frac{180^\circ}{n} \quad (3)$$

La longitud de los tensores que delimitan los polígonos superior e inferior ([Kenner, 1976](#)), se obtiene con la ecuación (4):

$$e = d\text{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \quad (4)$$

Donde:

p = Longitud de los puntales.

$r1, r2$ = Radios del polígono inferior y exterior.

n = Número de lados del polígono.

h = Altura del cilindro.

t = Longitud de los elementos tensores que unen el polígono inferior con el superior.

e = Longitud de los elementos traccionados tensores que delimitan los polígonos inscritos en la tapa superior e inferior del cilindro.

d = Diámetro del cilindro ([Kenner, 1976](#)).

Para comenzar con la elaboración del modelo y poder averiguar tanto la cantidad y módulos simplex a utilizar, se realiza mediante un tipo de figura geométrica para este ejemplo el triángulo, de igual manera teniendo un radio deseado y la altura; se aplican las cuatro (4) fórmulas matemáticas de la ecuación anterior permitiendo obtener la longitud de los elementos de tensión y de comprensión que interactúan entre sí en del sistema de tensegridad. Para obtener resultados más rápidos para la creación de módulos de tensegridad se simplificaron las fórmulas en una tabla elaborada en Microsoft Excel, para así lograr obtener de ma-

nera más rápida y sencilla los elementos mencionados y así si se requiere se colocan los números de los módulos a utilizar para saber la cantidad total de puntales y tensores (Tabla 1).

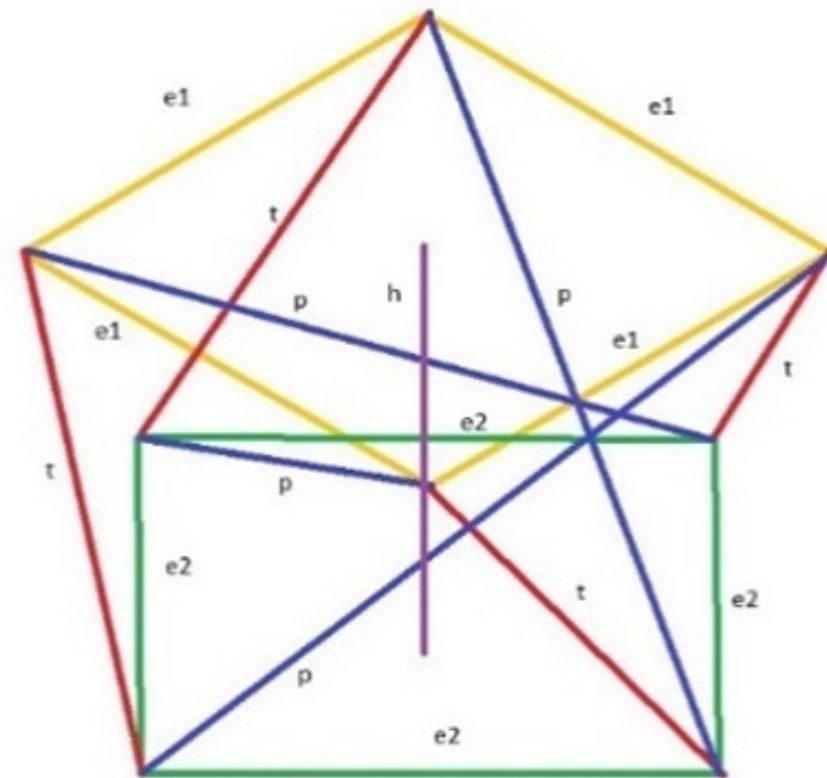
En consecuencia, se diseña un módulo de tensegridad simple el cual al incrustar con otros módulos se genera una cubierta compleja a partir de un módulo estándar, que puede variar en su forma final (Figura 14; Figura 15; Figura 16), dependiendo de la forma en que se parametrize el modelo y que tipo de utilidad se quiera dar a la propuesta arquitectónica (Chilton, 2000; Gómez, 2013; Fuller, 2000).

TABLA 1.
Cálculo del módulo de tensegridad en Excel.

Número de lados = n	Altura = h	Ángulo torsión = a	Radio superior = $r1$	Radio inferior = $r2$	Diámetro superior = $d1$	Diámetro inferior = $d2$
			6	12	12	24
4			Long • Puntales = p	Long • Tensores externos = t	Long • Tensores = $e1$	Long • Tensores . Base = $e2$
	20	45	26.1117	21.8673	8.4853	16.9706
Módulos				Total de puntales	Toral de tensores	
3				12	36	

Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 14. Configuración matemática del módulo.

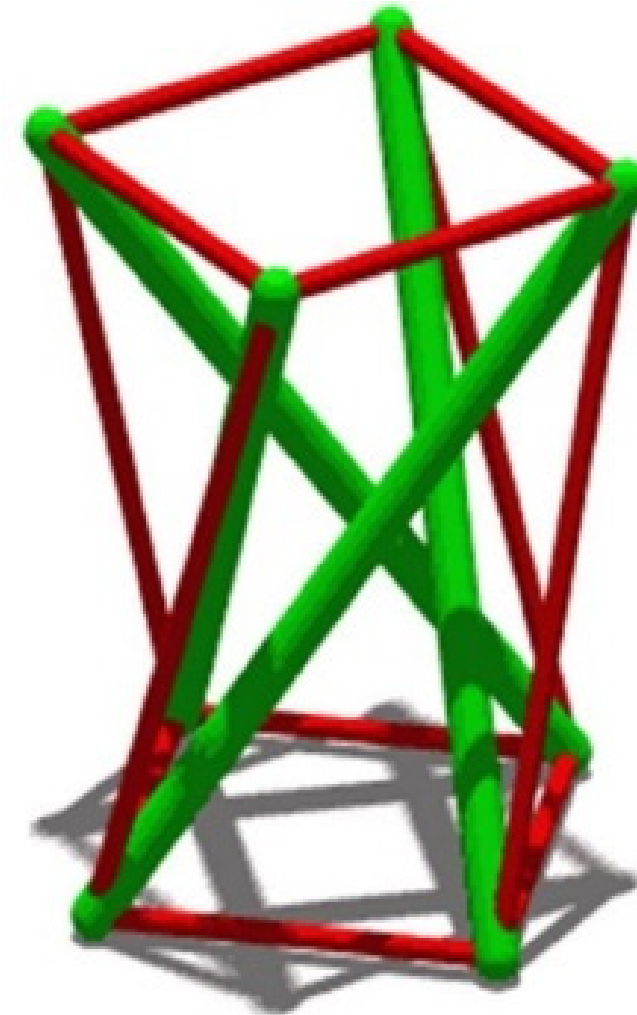


Fuente: Morales (2019a).

Geometría Aplicada

Extrapolado para construir la propuesta final se desarrolló una tensegridad prismática cuadrada, con una curvatura radial para desarrollar

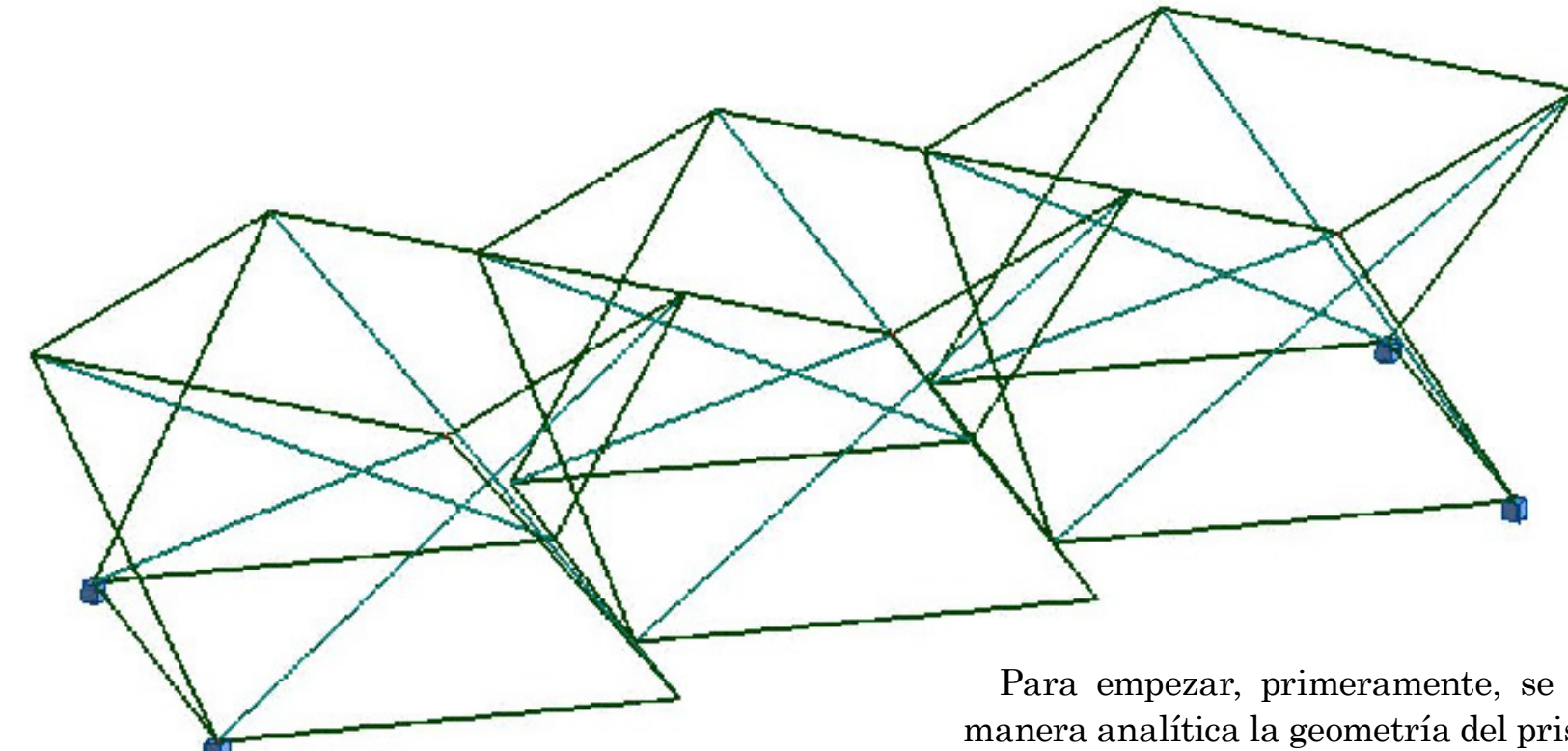
FIGURA 15. Configuración matemática del módulo.



Fuente: Morales (2019a).

una inclinación y no se estanque el agua de lluvia en la cubierta, y también funcione como protector solar, la utilidad de este prototipo puede variar desde un parador o un estante comercial, etc.; para esta premisa geométrica se empleara la

FIGURA 16. Configuración matemática del módulo.



Fuente: Morales (2019a).

metodología antes explicada pero realizada con las anotaciones de la Dr. Katherine Liapi, la cual realizó una serie de paso que parametrizó en un modelo complejo de repetición, y en este caso se realizara con geometría descriptiva y analítica, para así obtener una estructura modular más rápida (Fuller, 2000; Liapi et al., 2009).

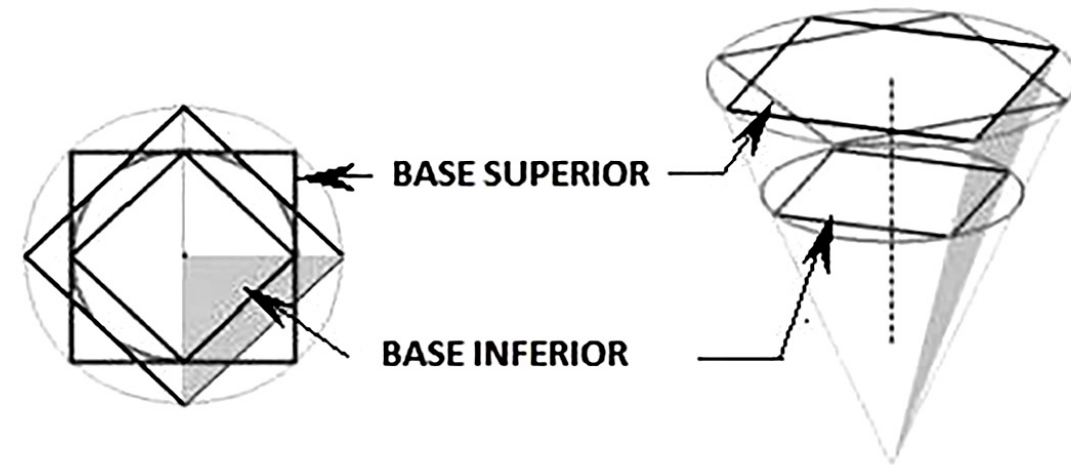
Para empezar, primeramente, se calcula de manera analítica la geometría del prisma, con la fórmula anterior, para obtener el primer módulo, logrando esto se configura el primer módulo de la geometría, para posteriormente desfazar el cono inscrito en la malla tensada de base cuadrada, las líneas que conectan la punta del cono y los vértices de la base más pequeña de la unidad, también deberán coincidir a la base del cono a 4 puntos que forman un cuadrado inscrito en la base circular del cono y es rotada 45 grados con respecto al base de la unidad. Siguiendo con dicha composición se desarrolla el esquema de la Figura 17 y Figura 18 donde se muestra dos filas de unidades de tensegridad con bases superiores superpuestas a lo largo del eje del cilindro.

FIGURA 17. Desarrolló geométrico del modelo.



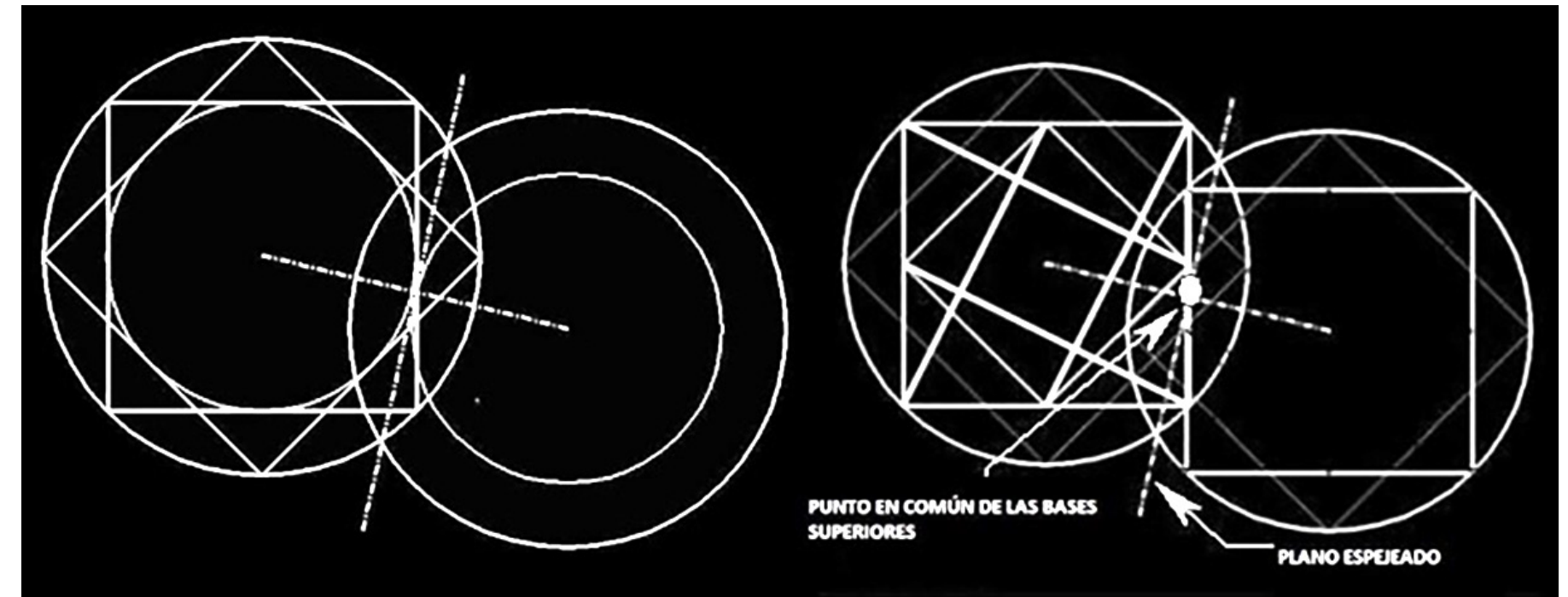
Fuente: Liapi & Jinman (2003), Morales (2019a).

FIGURA 18. Desarrolló geométrico del modelo.



Fuente: Liapi & Jinman (2003), Morales (2019a).

FIGURA 19. Desarrolló geométrico del modelo.



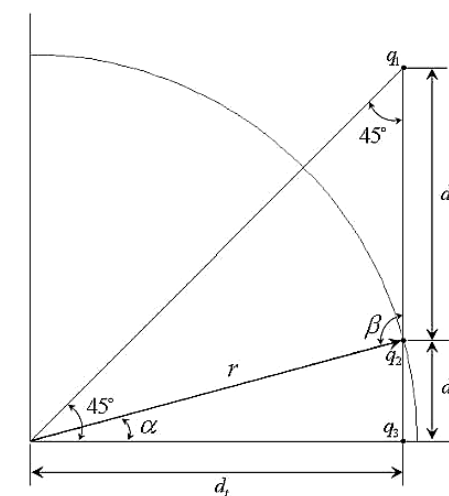
Fuente: Morales (2019a), Liapi et al. (2009).

Cuando se dan las dimensiones de las unidades de tensegridad, se establecen las superposiciones de base superior e inferior a lo largo del eje del cilindro y calculando y siguiendo la función trigonométrica indicada en el esquema de la Figura 19, Figura 20 y Figura 21. Específicamente, si d_1 es

$$d = -2d + \sqrt{\frac{4d_1^2 - 8(d_1^2 - r^2)}{1}} \quad (5)$$

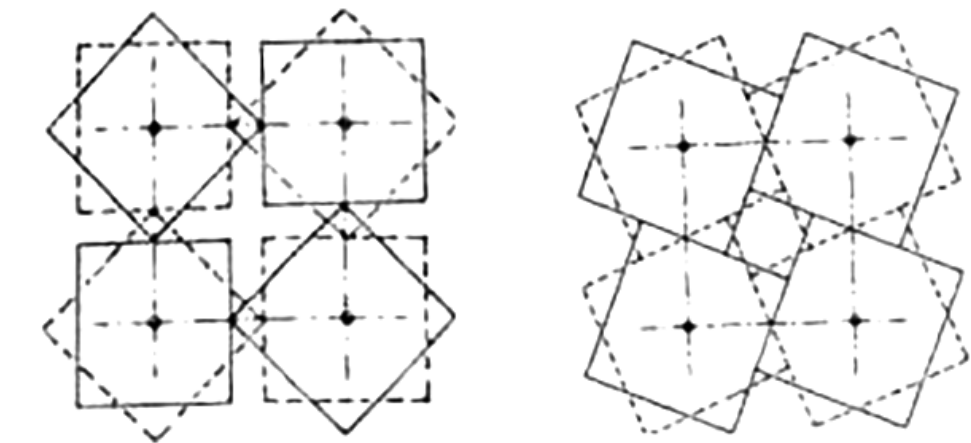
la mitad del tamaño de la superposición, dt es la mitad de la base superior y r es la mitad de la longitud entre los centros de las unidades adyacentes, la incógnita d_2 , calculada a partir del triángulo o , q_2 , q_3 , es como se observa en la fórmula (5) (Khabazi, 2011; Liapi & Jinman, 2003):

FIGURA 20. Desarrolló geométrico del modelo.



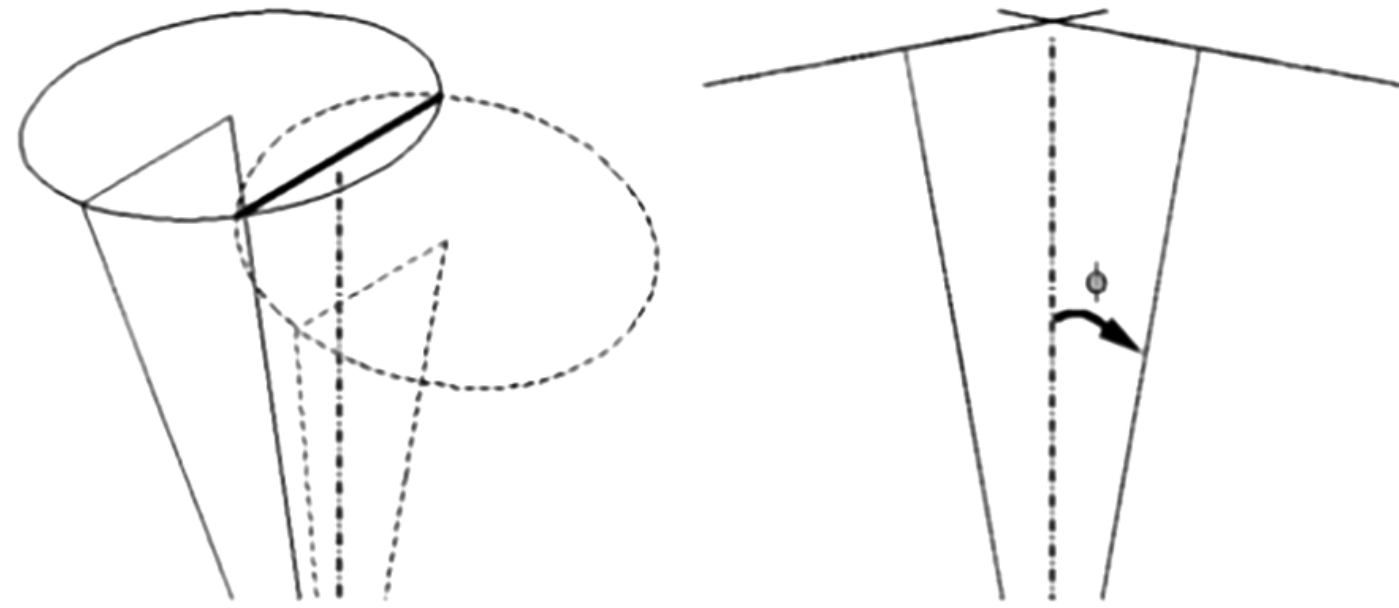
Fuente: Morales (2019a), Liapi et al. (2009).

FIGURA 21. Desarrolló geométrico del modelo.



Fuente: Morales (2019a), Liapi et al. (2009).

FIGURA 22. Empalme e incrustación de los módulos.

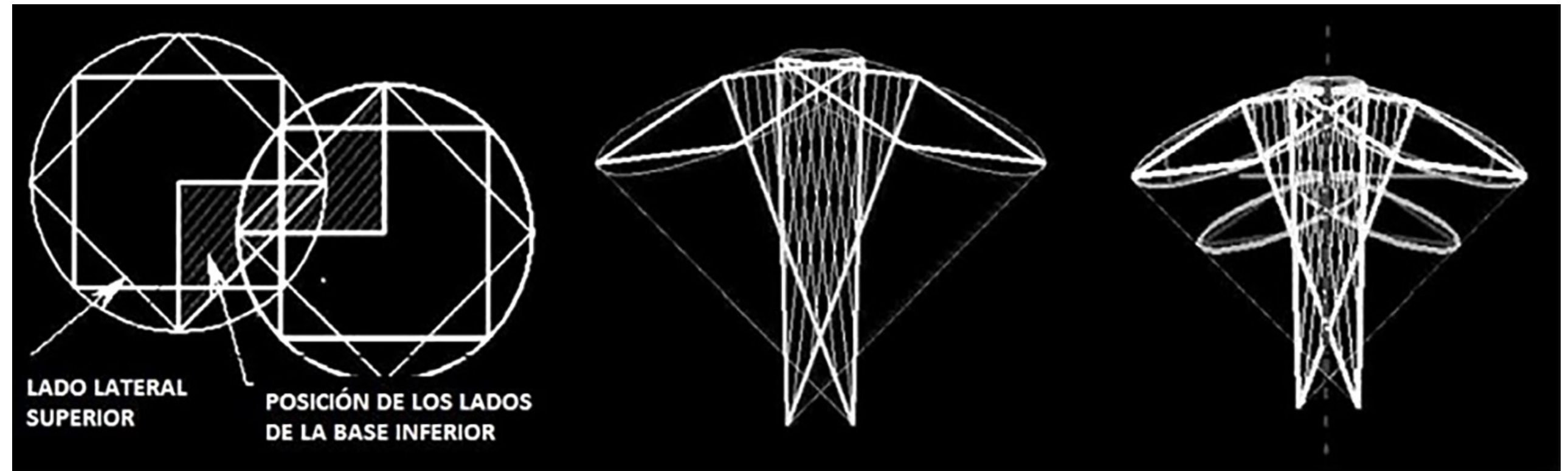


Fuente: Morales (2019a), Ricaño (2017).

Obteniendo la curvatura de los módulos de tensegridad se puede conseguir el eje de todas las unidades en la red, pero se necesitan interceptar a un punto fijo en el espacio que será el centro de la curvatura de la estructura. En adición a esto, las bases superiores e inferiores de las unidades adyacentes necesitan sobre-

ponerse parcialmente. Por la rotación de las bases de una unidad típica, determinando la sobreposición (solape) de las bases inferiores, cuando las bases superiores se solapan y la curvatura es dada, no puede ser resuelto como un problema de espacio empaçado (Figura 22, Figura 23) (Ricaño, 2017).

FIGURA 23. Empalme e incrustación de los módulos.



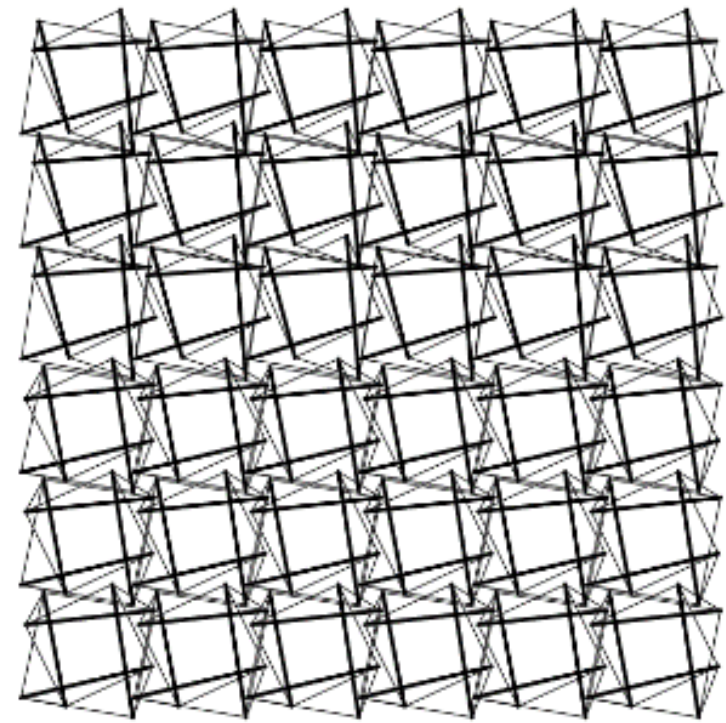
Fuente: Morales (2019a), Ricaño (2017).

Modelación Aplicada

Se propone un modelo aproximado a escala 1:20 para desarrollar las posibles configuraciones geométricas de los componentes del sistema de tensegridad, y cuáles serían las conexiones adecuadas para desarrollar en un prototipo a escala 1:1, por lo que se conforma un proceso de búsqueda de formas para al-

canzar estados de equilibrio en el pretensado, por los cuales se cambian las distancias de los componentes de la tensegridad de la parte superior e inferior y se desarrolla la curvatura final de la cubierta; la interacción entre los componentes produce el denominado estrés. En sí lo que se busca es la manera de equilibrar los esfuerzos de los componentes que interactúan (Tang, 2018).

FIGURA 24. Modelo a escala 1:20.



Fuente: Morales (2019a).

Cada barra está sometida a la tensión que se genera sobre ella y los tirantes atados a sus extremos funcionan como una celosía tridimensional, en donde a cada nudo, y para cada barra, debe haber al menos tres cables garantizando su estabilidad, aunque para este modelo las condiciones de equilibrio son de cuatro barras para los tres tensores conectados en cada punto de las barras, haciendo posible tener el pretensado que auto estabiliza el componente. Snelson dice que se necesita un mínimo de tres cables en cualquier extremo de cada barra (Peña, 2012).

FIGURA 25. Modelo a escala 1:20.



Fuente: Morales (2019a).

La anterior regla se cumple al ser la resultante de cada nudo tiene cuatro cables, añadidos a la insignificante influencia del peso de los componentes alineados con el eje longitudinal de cada barra (Figura 24; Figura 25), porque de otro modo estarían sometidas a una fuerza oblicua que generaría un momento flector en las mismas y provocaría que el sistema, inestable, intentase acomodarse a las tensiones internas hasta encontrar el equilibrio. El mismo razonamiento

FIGURA 26. Modelo terminado con columnas.



Fuente: Morales (2019a).

podría ser aplicado a los tirantes, los cuales están atados a los extremos de las barras y bajo la influencia de, al menos, otros cables más por cada nudo. Como consecuencia, cada tendón

FIGURA 27. Modelo terminado con columnas.



Fuente: Morales (2019a).

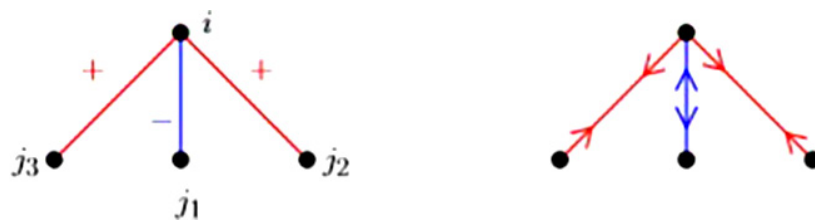
se encuentra en equilibrio si está sometido a una determinada tensión la cual suele estar ocasionada por un esfuerzo de pretensado. Por último, se desarrollaron postes que ayudaran a equilibrar la estructura de la cubierta y a sostenerla, al menos en teoría (Figura 26; Figura 27) (Mercado y Morales, 2019).

Fundamentos Estructurales de Equilibrio

En este tipo de estructuras el equilibrio es estable por sí mismo, por tanto, como se puede observar en la [Figura 28](#), se desarrolla cada punto el cual tiene que estar en equilibrio con las fuerzas, por lo que el equilibrio de fuerzas sobre un punto debe estar sometida por miembros a tracción para tener el efecto a compresión. Para que este en equilibrio entonces se emplea la ecuación (6):

$$F \rightarrow ij_1 + F \rightarrow ij_2 + F \rightarrow ij_3 = \rightarrow 0 \quad (6)$$

FIGURA 28. Esquema de relación de fuerzas.



Fuente: [Morales \(2019a\)](#).

El sistema es capaz de recuperar su posición original de equilibrio pese a la aparición de perturbaciones externas. Esto otorga a las estructuras una idónea capacidad de soportar situaciones de vibraciones y cargas dinámicas, siendo capaz de soportar acciones susceptibles como el sismo o cualquier movimiento del terreno ([Correa, 2001](#); [Morales, 2019b](#)).

Simulación Estructural

Para este estudio se desarrolla solo el análisis estático no lineal en el software [Robot Structural Analysis \(2022\)](#) donde se obtienen los valores de los esfuerzos y deformaciones de la propuesta para posteriormente realizar un análisis por elemento finito de un módulo de la propuesta final, el cual se ejecutara con el programa [SolidWorks \(versión 28\)](#), el cual es un software de diseño mecánico industrial asistido por CAM (Computer-Aided Manufacturing); para este primer modelado bastara este tipo de análisis, ya que, el fin es manufacturar las uniones adecuadas para el prototipo.

Primeramente, se realiza el análisis estático no lineal donde se selecciona un material con barras de *bambú angustifolia*, el cual tiene una resistencia a la flexión de 340 kg/cm, 590 kg/cm a la tensión paralela a la fibra y 25 kg/cm paralelo al cortar a la fibra; dichos datos fueron encontrados en el Reglamento de Construcción en las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Madera ([Secretaría de Obras y Servicios-SIOP del Gobierno de la Ciudad de México-CDMX, 2020](#), Cap. 6). Se propuso un cable de acero 5/16" con una carga de ruptura 4 120 kg, con cuyas premisas se pasa a seleccionar el tipo de combinación de cargas más efectivo para este tipo de estructura, cuyos casos de estudio para su diseño serán de tres cargas por ser estructuras denominadas no transitables; una será permanente y tendrá una carga 40 kg/cm²; una

carga accidental de 60 kg/cm^2 y de viento nominal de diseño de 95 km/h , no se toma en cuenta el sismo, ya que este tipo de estructuras son autoequilibrantes ante el movimiento sísmico. La combinación propuesta para desarrollar dicho calculo se puede observar en la [Tabla 2](#) ([McCormac, 2000](#)).

TABLA 2.
Combinaciones de carga de la estructura.

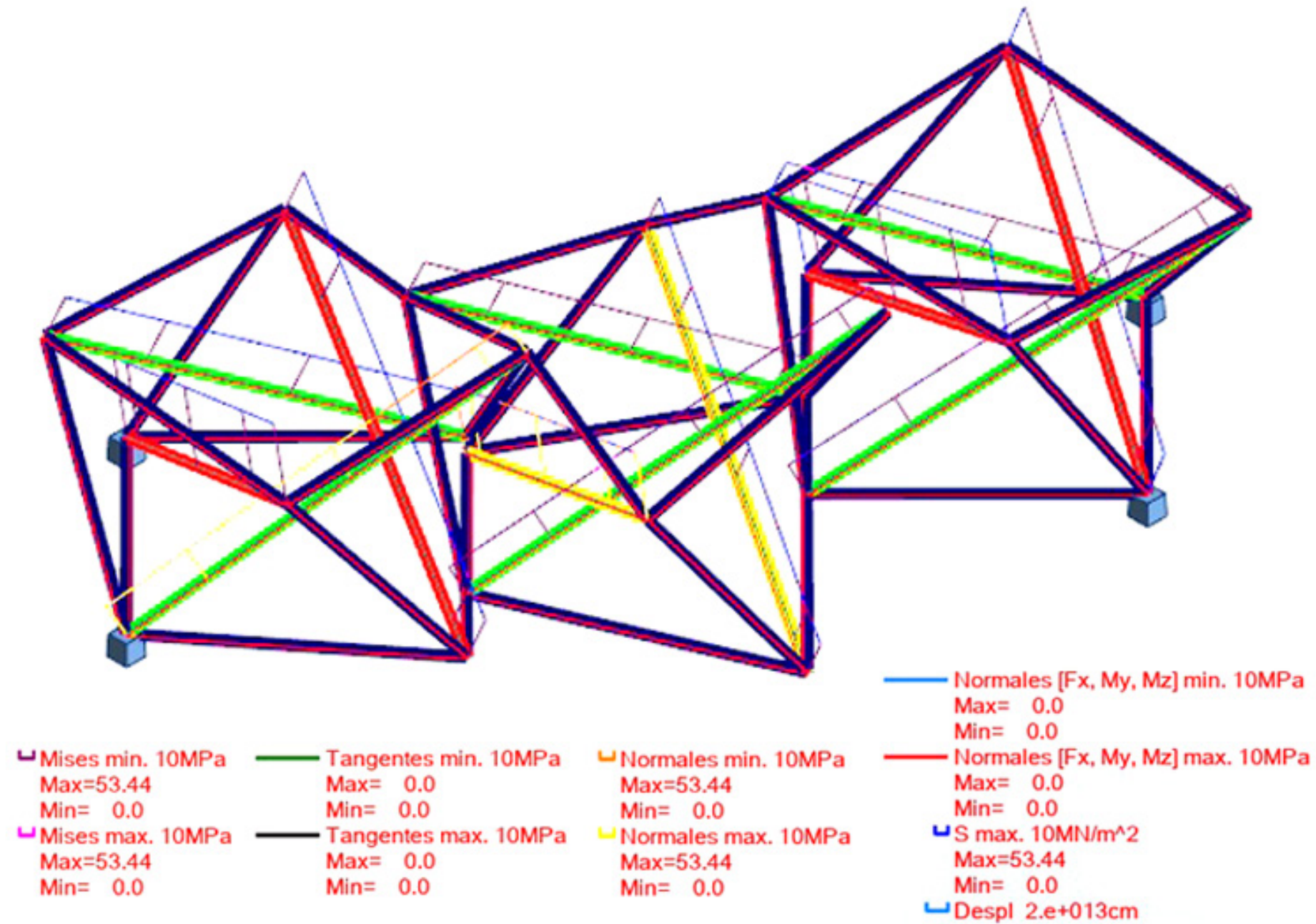
Tipos de combinaciones reglamentarias: completo	
Lista de los casos activos:	
Lista de los modelos de combinaciones:	
ELU	1. 1.4D
ELU	2. & 4. $1.2D+1.6W+0.5(L) \& 1.2D+1.0W+L+0.5(L)$
ELU	3. $1.2D+1.6(L)+L/0.5W$
ELU	5. $0.9D+1.0W$
ELU	6. $1.2D+E+L+0.2S$
ELU	6. $1.2D+E+L+0.2S$
ELU	7. $0.9D+1.0E$
ELS	SLS
Lista de los grupos definidos:	
Lista de las relaciones definidas:	
Permanente:	D
Accidentales:	E
Viento:	W
Carga viva y muerta	L
Sísmica	S

Fuente: [McCormac \(2000\)](#).

Ya desarrollado el análisis estático no lineal se puede observar los resultados de la deformación ELU global, lo cual nos da un rango de

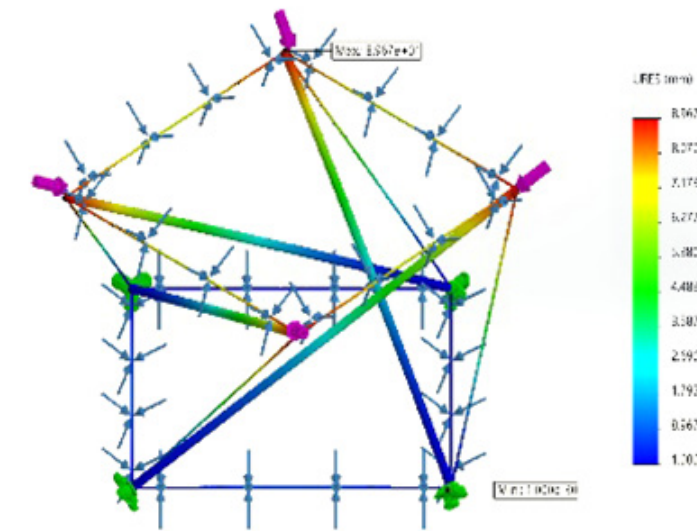
30 mm de desplazamiento en dirección X, que, según la Normas Técnicas Complementarias ([SIOP, 2020](#)) el rango máximo de una estructura es de 55 mm de desplazamiento global en las estructuras no transitadas ([Figura 29](#)), con lo cual se puede verificar por los resultados del programa que, todas las barras y cables no exceden el ratio de seguridad de 1.05, como la propuesta dada por tener elementos de acero con cierto comportamiento de resistencia parecido al del bambú ([Tabla 3](#)). El siguiente paso es realizar la simulación del modelo con el método de elemento finito en [Solid Work \(versión 28\)](#), para verificar el estar en el rango de seguridad propuesta anteriormente, razón por la cual se selecciona un módulo de poisson de 0.26 para el bambú, coeficiente que puede variar en base a las pruebas que se realizan en el material, las cuales para este caso se tomara como 0.26, colocando un módulo de elasticidad de $310\,000 \text{ kg/cm}^2$, según las pruebas de referencia del laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia. Para el bambú angustifolia, ya identificado y configurado el material, se hace un estudio estático, en el cual se obtiene que los desplazamiento en los nodos no superan los 8 mm y las tensiones máximas en los miembros de bambú no superan el estrés de módulo de seguridad el cual es un factor de 1; en cuanto al cable se verifico un estrés en el pretensado, pero que no genera estrés en el modelo y no provoca fallas en el sistema ([Figura 30](#); [Figura 31](#)) ([SIOP, 2020](#); [Blanco, 2011](#); [Díaz, 2013](#)).

FIGURA 29. Grafica de esfuerzos y desplazamiento de la estructura.



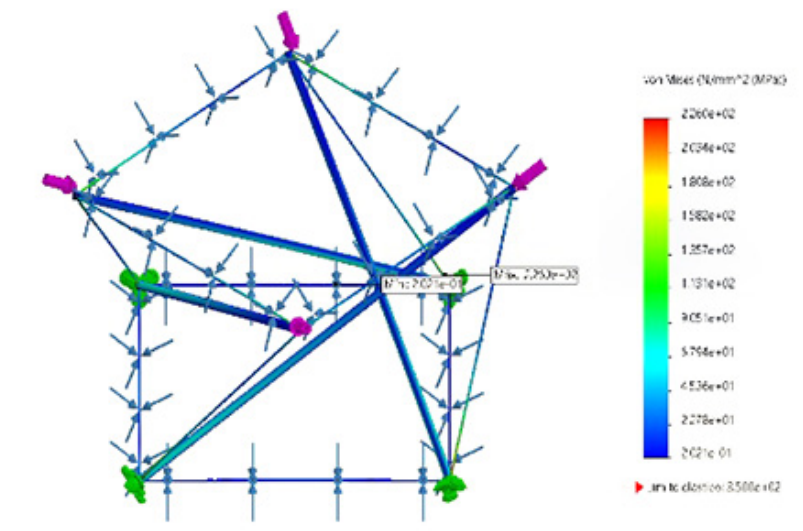
Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 30. Simulación por elemento finito de un módulo para verificar conexiones.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 31. Simulación por elemento finito de un módulo para verificar conexiones.



Fuente: Morales (2019a).

TABLA 3. Tabla de resultados de las barras y cables del sistema estructural.

Nudo/Caso	FX (kN)	FZ (kN)	Barra/Nudo	Ratio
2/ 1	1.21	0.21	8/ 4/	.85
3/ 1	-2.71	-0.12	10/ 3/	.78
17/ 1	2.78	-0.03	11/ 1/	.95
20/ 1	-1.92	-0.22	24/ 16/	1
Caso 1	Viento		Tensiones/Barra	Tensiones/Cable
Suma final	-0.65	-0.16	Maxima: 2.260e + 02N/mm ²	Maxima: 2.001e + 01N/mm ²
Suma de reacción	-0.65	-0.16	Mínima: 2.021e - 01N/mm ²	Mínima: 3.009e - 01N/mm ²
Suma de esfuerzo	-0.00	-0.13		
Verificación	-0.65	-0.29		
Precisión:	9.78039e-01	1.12841e + 00		

Fuente: Morales (2019a).

RESULTADOS

Alternativa Tecnológica

Para este ejercicio se toma como material alternativo el bambú angustifolia, el cual es uno de los materiales con un menor impacto en la huella de carbono en la construcción y, el cual, en los últimos años, en la región, ha tenido un buen uso en la comunidad. También, en el área se encuentran varias empresas dedicadas a los cultivos de dicho material, y de igual manera estas tienen un tratado de conservación del material para su vida útil. Dicho esto, y ya realizado el diseño estructural de la propuesta, se configura el proceso de manufactura de la propuesta final. Este modelo se construye con barras de bambú angustifolia de 100 cm perfil. Las conexiones de las barras son de acero de cedula de 40 con varillas soldadas con pestañas de barras lisa de 3/8", ahogadas con cemento grout y con una resistencia de 300 kg/cm^2 , con tan solo tres días de secado rápido, para darle una mayor resistencia a la compresión; los tendones o cables son de acero de 3/16", con un carga de ruptura de 3 700 libras, sujetas con tres accesorios de grapa de acero al carbón de 1/8"; con el objetivo de darle una mayor resistencia al pretensado del cable en el componente modular.

FIGURA 32. Simulación por elemento finito de un módulo para verificar conexiones.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 35. Simulación por elemento finito de un módulo para verificar conexiones.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 33. Simulación por elemento finito de un módulo para verificar conexiones.



Fuente: Morales (2019a).

El primer paso fue cortar los miembros del bambú a 1.70 m y manufacturar el nodo de conexión que va a ir ahogado dentro del poste (Figura 32; Figura 33; Figura 34; Figura 35), nivelado

FIGURA 34. Simulación por elemento finito de un módulo para verificar conexiones.



Fuente: Morales (2019a).

y llenado con cemento grout, para darle mayor resistencia a la compresión por la tracción que va a ejercer los cables en las conexiones (Morales, 2022).

FIGURA 36. Armado del primer módulo de tensegridad.



Fuente: Morales (2019a).

Posteriormente, ya secados los postes del sistema constructivo, se conectan los cables a las barras, estas dispuestas primeramente en una disposición en planta, para ver como es el desarrollo del componente, el cual se hace para verificar la primera prueba de montaje, con los cables sujetos a las cara superior e inferior de un módulo, lo cual se realiza para observar que

FIGURA 37. Armado del primer módulo de tensegridad.



Fuente: Morales (2019a).

la forma de la tensegridad vaya de acuerdo a las medidas propuestas. En consecuencia, se unen los cables diagonales en los nudos para generar el pretensado del componente (Figura 36; Figura 37; Figura 38; Figura 39). El método para pretensar este primer módulo fue hecho con una matraca o tensor de 2" de espesor, con una resistencia a tracción de 3750 kg/m², para de

FIGURA 38. Armado del primer módulo de tensegridad.



Fuente: Morales (2019a).

esta forma se fueran pretensando los siguientes módulos del sistema de tensegridad. Se hicieron pruebas de carga con tres personas, con un peso promedio de 75 kilogramos por cada indi-

FIGURA 39. Armado del primer módulo de tensegridad.



Fuente: Morales (2019a).

viduo, aunque este tipo de estructuras entran en la denominación de cubiertas no transitables para el reglamento de construcción de CDMX (Morales, 2022; Tibert, 2002).

FIGURA 40. Armado terminado y prueba de carga empírica.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 41. Armado terminado y prueba de carga empírica.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 42. Armado terminado y prueba de carga empírica.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 43. Armado de los módulos continuos y detalles de percance de uniones.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 44. Armado de los módulos continuos y detalles de percance de uniones.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 45. Armado de los módulos continuos y detalles de percance de uniones.



Fuente: Morales (2019a).

También se realizaron las intercepciones de los módulos de la estructura, que para este caso solo se realizaron con tres componentes con el fin de obtener un claro de 7.50 m de largo (Figura 40;

Figura 41; Figura 42); uno de los percances que se pudo observar fue que algunas barras no soportaron la tensión que se ejercía y se quebraron, por lo cual tuvieron que ser remplazadas por otro miem-

bro y realizar todo el proceso de unión con grout para poder obtener una resistencia adecuada a la compresión y a la tracción (Figura 43; Figura 44; Figura 45) (Morales, 2022; Burkhardt, 1994).

FIGURA 46. Composición de armado de pilar.

FIGURA 47. Composición de armado de pilar.

FIGURA 48. Armado de pilar terminado.

FIGURA 49. Armado de pilar terminado.

FIGURA 50. Armado de pilar terminado.



Fuente: Morales (2019a).

Fuente: Morales (2019a).

Fuente: Morales (2019a).

Fuente: Morales (2019a).

Fuente: Morales (2019a).

Se fabricaron los apoyos que podrían sostener la cubierta modular de la tensegridad compuestos con una prisma triangular con un poste levitando en su centro (Figura 46; Figura 47);

se ejecutó el mismo procedimiento de pretensado que los módulos cuadrados, pero con una variación: primeramente se pretensó con las matracas y se fueron sustituyendo por cables

en sus conexiones, parecía que podría ser una buena aplicación de soportes, pero a la hora de colocarlos con la otra modulación no fue muy efectivo el auto equilibrio del modelo, ya que,

dejaban que se articularan demasiado a la hora de realizar el levantamiento de la estructura (Figura 48; Figura 49; Figura 50) (Llorens et al., 2003; Morales, 2019a).

FIGURA 51. Ajustes en las uniones de la estructura.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 52. Ajustes en las uniones de la estructura.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 53. Ajustes en las uniones de la estructura.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 54. Levantamiento de la estructura.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 55. Levantamiento de la estructura.



Fuente: Morales (2019a).

Por último, se ejecutó la maniobra y alzado de la estructura pretensada y la unidad con el soporte, y se colocó de un costado para realizar los últimos ajustes en las conexiones de los postes y la cubierta (Figura 51; Figura 52; Figura 53); para

ello se apretaron todas las conexiones a fin de no tener ningún problema en la ejecución del levantamiento de la estructura. Este proceso de alzado se realizó con matracas unidas en los nudos de la cubierta y en la base de los soportes (Figura 54;

Figura 55), para jalar la estructura aun lado y poder sostenerse en vertical y tener la función de auto equilibrarse por sí misma. El prototipo aguantó este proceso y pudo sostenerse por su pretensado, aunque los puntos de unión de soporte no fueron

del todo óptimos, ya que de cierta manera afectaba su forma de puntal, aun así, el caso fue un éxito y la cubierta pudo sostenerse por sí misma sin ningún anclajes de sujeción al suelo (Figura 56; Figura 57; Figura 58) (Morales, 2019a).

FIGURA 56. Estructura final armada.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 57. Estructura final armada.



Fuente: Morales (2019a).

FIGURA 58. Estructura final armada.



Fuente: Morales (2019a).

DISCUSION

Dentro del desarrollo del conocimiento en la arquitectura falta mayor difusión y redacción del conocimiento adquirido de este tipo de componentes de tensegridad. Si bien, hay muchas propuestas de diseño experimental y de aplicaciones de estructuras temporales con este tipo

de estructuras, la falta de una difusión de una metodología de diseño intuitivo el cual desarrolle la facilidad de aplicar rápido su geometría a los proyectos de arquitectura adolece en cierta manera su aplicación, por lo que la disertación de esta investigación trata de ver la virtudes de este tipo de geometrías a las que se puede analizar con un rigor científico.

segridad construidas físicamente usan formas preestablecidas, porque este tipo de aplicaciones se pueden realizar pero aún no en una función arquitectónica.

En cuanto en Latinoamérica hay pocas facultades de arquitectura que hacen la labor de crear un desarrollo constructivo de estos componentes autoequilibrantes; solo para mencionar algunos de ellas: la Universidad de Camagüey en Cuba, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (México) y la Universidad Nacional Autónoma de México, son algunas instituciones que realizan modelos geométricos simples con icosaedros aplicados con materiales alternativos para desarrollar en arquitectura, por lo que vale la pena determinar una metodología de diseño más eficiente y rápida para diseñar los sistemas de tensegridad.

Por lo tanto, determinada una metodología de diseño en el sistema de tensegridad y el comportamiento estructural que podría tener sus conexiones con los componentes de una estructura pretensada, esta disertación configuro una propuesta de diseño aproximado para posibles aplicaciones dentro de la Universidad Veracruzana (Figura 59). Para este caso, una cubierta de uso múltiples en el patio y estacionamiento de la Vicerrectoría de la región de Poza Rica en Tuxpan, donde el requerimiento de diseño nos permite salvar un claro grande con este tipo de configuraciones simples, que al modularse y repetirse se vuelve una sistema más complejo pero fácil de incluir en los proyectos de diseño.

A nivel global existe el desarrollo científico de procesos geométricos y constructivos de este tipo de estructuras singulares, como ejemplo, la Universidad de Kent en Reino Unido, con el proyecto novedoso de una forma escultórica que se suma a la creación de lugares únicos de este proyecto: El TensegriTree. Es tal como está, una forma y geometría completamente nueva en la taxonomía de las tensegridades, cuando casi todas las demás estructuras de ten-



FIGURAS 59. *Prototipos y propuestas para proyectos arquitectónicos en Vicerrectoría.*

Fuente: Ricaño (2017).

CONCLUSIONES

La investigación se basó desde el principio en la base metodológica del Arquitecto Kenneth Snelson, ya que es un punto de referencia para configurar estructuras de tensegridad simplex, por cual esto ayudo a generar componentes para proponer esta disertación.

La idea conceptual, expuesta en este documento fue realizar un diseño experimental el cual ayudara a crear modelos físicos y geométricos de las estructuras de tensegridad, llevando a implementar una metodología de diseño para manufacturar dichos modelos y así generar una premisa teórica constructiva para desarrollar este tipo de sistemas estructurales, ya sea con la búsqueda de la forma o el con el desarrollo de una geometría analítica-matemática.

Con la teorización analítica expuesta se crearon propuestas a escalas 1:5 para verificar su geometría, en las cuales se observó que tenía una estabilidad constante en sus componentes, por lo que el siguiente paso fue realizar las si-

mulación estructural con [Robot Structural Analysis \(2022\)](#) bajo la norma NOGDMX (Normas Técnicas Complementarias de Construcción del Reglamento de la CDMX [[SIOP, 2020](#)]), normas que se aplican dependiendo del uso de la estructura, para nuestro caso, la utilidad de nuestra estructura, es de mobiliario urbano, por lo que entra en la categoría de cubiertas no transitables.

Se ejecuto otra simulación por medio de elemento finito en software llamado [Solid Work \(2022\)](#), en donde se realizaron una serie de análisis en sus componentes de conexión, para verificar que no se tengan problemas por pandeo o aplastamiento, y posteriormente el mismo programa nos ayuda a generar esquema de manufacturación de manera precisa, dejándo las conexiones que se necesitan para la estructura, ya que este tipo de sistemas tiende a ser deformable en sus conexiones, dado a que reciben mucho esfuerzo en la uniones y necesita de una resistencia alta en los enlaces.

En cuanto a las aplicaciones tecnológicas en la fase de diseño final, se realizó una propuesta que derivo a la construcción de un modelo a escala 1:1, donde se cotejaron aspectos tales como su armado y correcciones de nudos; el alcance de este modelado ayudo a adquirir experiencia y conocimiento en la manufactura de los miembros estructurales del modelo; y también contribuyo a implementar materiales alternativos los cuales se pueden utilizar para un menor consumo de materiales no tan sostenibles al medio ambiente.

Por último, el tema deja varias líneas de investigación a desarrollar y mejorar, como en el caso de los materiales, en el cual no se profundizó mucho, ya que, el bambú es un material amigable y resistente, y si es bien ejecutado puede ser una alternativa tecnológica viable, otro punto es la ejecución en el montaje en un terreno y sus anclajes a suelo, circunstancias que pueden retomarse, para crear diferentes posibilidades de montaje.

REFERENCIAS

- [Autodesk. \(2022\)](#). Robot Structural Analysis [Software]. Autodesk. <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis>
- [Blanco, P. \(2011\)](#). Pretensado de Columnas Tensegrity para el incremento de Rigidez Axial [Tesis Máster, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona]. Upcommons. <http://hdl.handle.net/2099.1/21640>
- [Broto, C. \(2006\)](#). *Cubiertas, Innovación y Diseño*. Ócéano/Links/Structure.
- [Burkhardt, R. \(1994\)](#). *A Practical Guide to Tensegrity Design*. Software Services.
- [Bustelo, J. \(2005\)](#). *Equilibrio de Tensiones*. La Voz de Galicia.
- [Chilton, J. \(2000\)](#). *Space Grid Structures*. Architectural Press.
- [Correa, J. \(2001\)](#). Static Analysis of Tensegrity Structures [M.S. thesis, University of Florida]. Cimar. https://cimar.mae.ufl.edu/cimar/pages/thesis/julio_correa.pdf

- Díaz, N. (2013). Sistemas Tensegrity: Diseño de un prototipo de un panel interior divisorio [*Tesis Máster*. Universidad Politécnica de Catalunya]. UPCommons. <http://hdl.handle.net/2099.1/21462>
- Fuller, M. (2000). *Compresión de las Estructuras en la Arquitectura*. McGraw Hill.
- Fuller, R. & Applewhite, E. (1975). *Synergetics. Explorations in the Geometry of Thinking*. MacMillan.
- García-Diego, C, Llorens, J. y Poppinghaus, H. (2000). El Pabellón de Venezuela en Expo 2000 Hannover. *Informes de la Construcción*, 53(473), 11–26. . <https://doi.org/10.3989/ic.2001.v53.i473.668>
- Gobierno de la CDMX. SIOP. (2020). *Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, del 9 de julio 2020. http://legismex.mty.itesm.mx/estados/ley-df/DF-N-ActualizaNormasTec2020_06.pdf
- Gómez, V. (2013). *Tensegridad. Estructuras tensegríticas en ciencia y arte*. Universidad de Cantabria.
- Khabazi, Z. (2011). *Generative Algorithms: Concepts and Experiments: Strip Morphologies*. Morphogenesisism.
- Kenner, H. (1976). *Geodesic Math and How to Use It*. University of California Press.
- Liapi, K. & Jinman K. (2003). A Parametric Approach of the Design of a Tensegrity Vaulted Dome for an Ephemeral Structure for the 2004 Olympic. *Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture*, 301–309. <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2003.301>
- Liapi, K., Jinman, K. & Liu, R. (2009). Design and Fabrication of Tensegrity Structures: a Computer Based Sistem. *Acadia Structures*, 100–109.
- Llorens, J., García Ch. & Pöppinghaus H. (2003). Tensegrity Structures for Textile Roofs. In E. Oñate & B. Kröplin (Eds.), *Textile Composites and Inflatable structures*. Cimne.
- McCormac, J. (2000). *Diseño de Estructuras de Acero, Método LRFD* [2 ed.]. Alfaomega.
- Mercado, J. y Morales, C. (2019). Proceso de diseño de una cubierta con el principio de tensegridad para espacios de esparcimiento. *Procesos Urbanos*, 6, 92–100. <https://doi.org/10.21892/2422085X.460>
- Morales, C. (2022). *Cubiertas Plegables para la Arquitectura*. Anáhuac. <http://pegaso.anahuac.mx/accesoabierto/publicaciones.php?Accion=Informacion&Pub=158>
- Morales, C. (2019a). *Taller de Diseño Arquitectónico*. Universidad Veracruzana.
- Motro, R. (2013). *Tensegrity: structural systems for the future*. Butterworth-Heinemann.
- Ricaño, R. (2017). Propuesta de un Cubiertas de Tensegridad para Vicerrectoria [*Tesis Licenciatura*]. Universidad Veracruzana.
- Peña, D. (2012). Aplicación de los principios del tensegrity a las constucciones textiles atirantadas. [*Tesis Doctorado en Arquitectura*, Universidad Politécnica de Catalunya]. TDX. <https://www.tdx.cat/handle/10803/96774#page=1>

SolidWorks Corporation. (2022). Solid Work (version 28). [*Software*]. Dassault Systèmes. <https://www.solidworks.com/es/domain/simulation>

Tang, R. (2018). Tensegridad y Arquitectura [*Tesis de fin de grado*, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. <https://oa.upm.es/51843/>

Tibert, G. (2002). Deployable Tensegrity Structures for Space Applications [*Doctoral Thesis*. Royal Institute of Technology]. CAM. <http://www-civ.eng.cam.ac.uk/dsl/publications/TibertDocThesis.pdf>

Carlos Cesar Morales Guzmán es Doctor en Arquitectura y Doctor en Estructuras para la Edificación, Facultad de Arquitectura por la Universidad Veracruzana (México). <https://orcid.org/0000-0002-4499-6968>