

DISEÑO DE *Cubiertas ligeras* CON **SISTEMAS DE** **TENSEGRIDAD** *PARA ESPACIOS ITINERANTES*

*Design of lightweight roofing with tensegrity systems
for roving spaces*

CARLOS CÉSAR MORALES-GUZMÁN*

Fecha de recibido:
30 Noviembre 2023
Fecha de aceptado:
23 Abril 2024

*Universidad
Veracruzana, México
dr.arqmorales@gmail.com

RESUMEN. Esta investigación se desarrolló para generar una propuesta de cubierta ligera itinerante, orientada en el área de la tensegridad, ya que este tipo de estructuras pueden llegar a cubrir claros importantes, se construye una metodología de diseño con base en las teorías del Arq. Kenneth Snelson, por lo que se realiza un prototipo experimental, el cual podrá determinar los diferentes tipos de configuración que puede tener un modelado itinerante basándonos en una cubierta tensada, el resultado será la simulación estructural del modelo final con el software WinTess, ya que este programa puede calcular estructuras dinámicas por densidad de fuerza, por ello esta disertación se centró en el estudio de una tensegridad de sistema abierto, el cual genera un catálogo de posibles modelados de cubiertas, esto adecuados con un prisma formado por tensegridad, con ello generamos ejemplos de aplicación, 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 en un prototipo final.

Palabras clave: estructuras de tensegridad, manufactura de cubiertas ligeras, metodología de diseño.

ABSTRACT. The present research was developed to generate a proposal for a traveling light roof, oriented in the area of tensegrity, since this type of structures can cover important spans, a design methodology is built based on the theories of Architect Kenneth Snelson, to make an experimental prototype, which will be able to determine the different types of configuration that a traveling modeling can have based on a tensioned roof, the result will be the structural simulation of the final model with the WinTess software, since this program can calculate dynamic structures by force density, so this dissertation focused on the study of an open system tensegrity, to generate a catalog of possible roof modeling, this suitable with a prism formed by tensegrity, with this we generate application examples, therefore Some academic cases are presented that were developed in the design workshops of the Architecture degree and the type of modeled roofs that can be generated in a final prototype.

Key words: tensegrity structures, manufacturing of light roofs, design methodology.

En la presente investigación se desarrolla un modelo de cubierta ligera generada por una estructura a base de tensegridad y una membrana estructural. Este proyecto se basa en las teorías del Arq. Snelson, quien tiene fundada una sucesión de premisas que permite realizar diferente tipos de modelos de los cuales se dimensiona una red comprimida a base de tracciones, a partir de esta apertura de postes y redes de cables atirantados se verifica si su ligereza y el peso propio de la construcción puede disminuir el tiempo de edificación en las cubiertas ligeras, esto para cubrir grandes claros, por ello la propuesta presentada aquí se construirá con materiales reciclados y sostenibles para mejorar la transportabilidad de dichas estructuras, en consecuencia esta implementación de cambio de material hace menos agresiva al medio ambiente en comparación de otros, mejorando así el ciclo de uso de reutilización de los materiales.

El propósito de la disertación es el estudio de la forma y su aplicación en el diseño, también se verifican sus propiedades constructivas en la arquitectura, concluyendo en una propuesta tecnológica constructiva más sencilla de desarrollar, y verificar las ventajas que conlleva realizar una serie de pasos para entender un sistemas de tensegridad, primero entender qué es una tensegridad, ya que existe una variedad de formas de realizar una sistema tensado, pero para esta disertación se realiza a partir del modelo de tensegridad simple, que se conforma solamente de elementos donde su figura se realiza a base de prismas, que pueden ser triangulares, cuadrangulares, pentagonales, hexagonales, etc., esto nos condiciona a realizar los modelos de diseño en formas más exactas y que el modelo puede ser un sistema abierto, es decir, 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 cerrados que necesitan de un apoyo para poder anclarse y de ahí obtener el pretensado en el sistema.

Se emplea una metodología de diseño para construir un sistema de tensegridad que se pueda desarrollar con sencillez y facilidad para generar sistemas de tensegridad abiertos, el cual puede ser cualquiera de sus puntos un apoyo de anclaje, esto con lleva a generar experimentaciones en la forma, desarrollando geometrías a base de prismas de tensegridad simple, por lo que la construcción experimental desarrolla un papel especial en la presente investigación, en consecuencia se generará un módulo experimental a escala 1:1 para demostrar capacidad de manufactura y estabilidad constructiva, dando a una propuesta de cubierta de grandes claros o de implementación urbana para áreas sociales o recreativas.

METODOLOGÍA DE DISEÑO

Hipótesis: Definición y Teoría

Antes de presentar una metodología se definen las características que deben cumplir en este tipo de sistemas estructurales para que se les pueda considerar tensegridad, la teoría es “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, 1975).

La primera característica es el equilibrio y su estabilidad, la cual 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, 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 se constituyen en componentes y no en 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, reparte mejor ese esfuerzo que ejerce en la masa, generando una unidad estable de módulos por el pretensado inicial (Motro, 1996).

Una característica añadida al sistema es la utilización de barras de bambú como un elemento sostenible que 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 así la transportabilidad de la propuesta final, con ello se obtiene una mejora en la estética de la estructura, que mejorará la arquitectura de la construcción.

Estas descripciones y características dan el componente de diseño para desarrollar el tipo

de tensegridad que se va a diseñar, por ellos se describen los paso de configuración (figura1), las barras podrán estar configuradas con un sistema cerrado o abierto y con la posibilidad de tener una disposición primático o geodésico (figura 2, 3), en cuanto a los tendones pueden estar conectados a las barras en posición de diamante o en zigzag dándonos el componente geométrico final, en este caso se desarrollará volúmenes prismáticos de base poliédrico para poder desarrollar una matemática simple en la geometría final, esto permitirá construir un sistema de tensegridad cerrado (que cualquier componente puede ser un apoyo de anclaje) y no un tensegridad abierto (que necesita de un anclaje para cerrar el sistema), por ello nos evocaremos a los sistemas de tensegridad cerrado (Broto, 2006) (Bustelo, 2005).

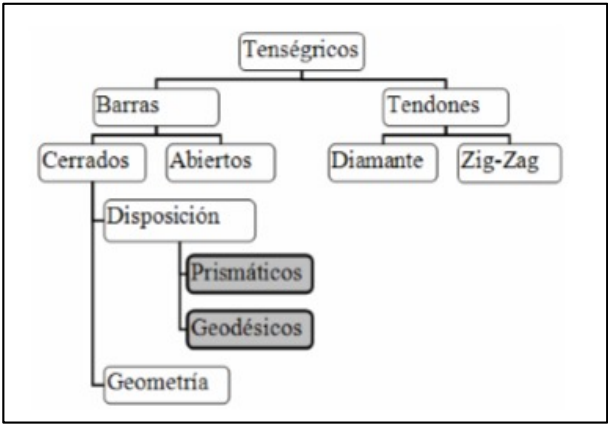


FIGURA 1. ESQUEMA BÁSICO DE DISEÑO DE UNA TENSEGRIDAD.

FUENTE: RICAÑO, 2017.

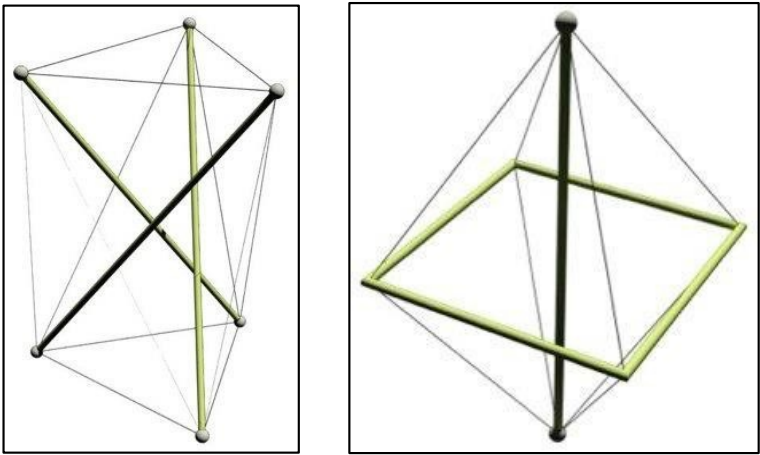


FIGURA 2, 3. CONFIGURACIONES BÁSICAS DE LA TENSEGRIDAD.

FUENTE: RICAÑO, 2017.

Clasificación de las estructuras tensegridad por disposición

Para comprender este tipo de estructuras se simplifica en dos tipos: prismático y geodésicos, los cuales pueden obtenerse gracias al manejo de una geometría sinérgica; que se define como una rama de las matemáticas, que habilita el estudio de las propiedades de los cuerpos en el espacio, por lo cual estas geometrías parten de una geometría base prismática y geodésicas (Ricaño, 2017).

Estos dos tipos de geometrías base son espaciales; esta característica nos auxilia a comprender de mejor manera el por qué no se puede simplificar el análisis a un plano, ya que para modelar una tensegridad de cualquiera de estos dos tipos necesitamos de un mínimo de tres puntos para tensar el poste a compresión,

ya que sus direcciones en la tensegridad son en varios planos (Reyes, 2005).

Modelos generados a partir de prismáticos

El siguiente modelado lo maneja con frecuencia el Arq. Snelson, dicha geometría se desarrolla dentro de un prisma circular, en el cual se coloca una figura geométrica que puede ser triangular, cuadrada, etc., en la base y la rota en un ángulo α en la cara superior, esto dentro de dicho prisma. El cilindro prismático se determina por tener dos caras planas como bases y una cara curva lateral, porque lo que al unir las rotaciones de la figura geométrica en las caras planas determina el prisma final (figura 4, 5).

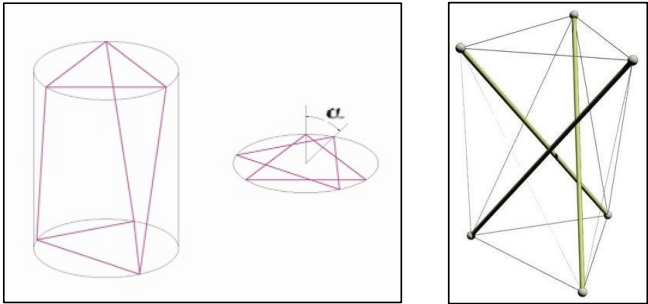


FIGURA 4, 5. ARMADURA TENSEGRITY GENERADA A PARTIR DE UN PRISMA CIRCULAR.
FUENTE: RICAÑO, 2017.

Este tipo de modelos se caracterizan por resistir cargas sobre las caras planas de la estructura y muestran la facilidad de poder conectarse con otros modelos del mismo tipo, llegando a formar largas cadenas modulares, para nuestra investigación aplicada en esta disertación se desarrollará este tipo de modelado (Motro, 1996).

Modelos generados a partir de una esfera

Los modelos con orígenes esféricos o geodésicos se caracterizan por resistir cargas en todas las direcciones a diferencia de las de prisma circular, su geometría presenta dificultad para conectarse con otros módulos, este modelado lo trabajaba con frecuencia el Ing. Fuller, ya que presentan la facilidad de ser aplicadas en domos geodésicos (figura 6, 7).

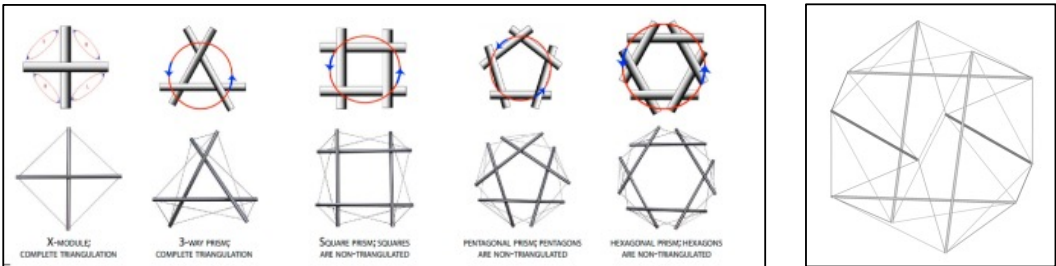


FIGURA 6, 7. ARMADURA TENSEGRITY GENERADA A PARTIR DE UNA ESFERA.
FUENTE: RICAÑO, 2017.

Búsqueda de la forma

Para entender cómo desarrollar la forma de un sistema de tensegridad se elaboran modelos geométricos prismáticos experimentales, se construye el modelo a partir del método prismático por la sencillez de geometrizar sus trazos, lo que deriva un método más simple para encontrar su forma, 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 8), por lo que su configuración experimentales se basarán de una cara triangular, ya que es bastante sencilla de ejecutar para realizar las primeras aproximaciones de diseño de este sistema geométrico.

Posteriormente se construye una tensegridad de escala 1:20 de cara triangular en la parte superior e inferior del prisma, se configuran los tendones en zigzag para generar la tensión en las barras y comprimirlas al grado de que tracciona todo el componente en varias direcciones, dando así la estabilidad y auto equilibrio en su propio sistema, por lo que en el siguiente paso se desarrolla una serie de configuraciones de este prisma (figura 9-11), primero se sobre posicionan los componentes en forma de dovelas que forman un arco tensado 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 triangulares, por lo cual notamos que una figura simple y modular puede volverse compleja, pero mejor equilibrada si se combina adecuadamente a la forma todos sus componentes.

Se realizó también dentro del modelo los tendones o cables con una membrana y la configuración del componente generaba aún más estabilidad y equilibrio al sistema, el cual le da 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 dentro de una tensegridad. Cabe señal que el modelado de estas geometrías sólo determina la forma y no el nivel de estrés real que tendrán en escalas 1:1, esto se verificará en la simulación y ejecución constructiva de nuestra propuesta final, por lo que esta experimentación sólo nos hace constatar que el método geométrico prismático es una buena opción para diseñar propuestas estructurales (Llorens, 2000) (Morales, 2019a).

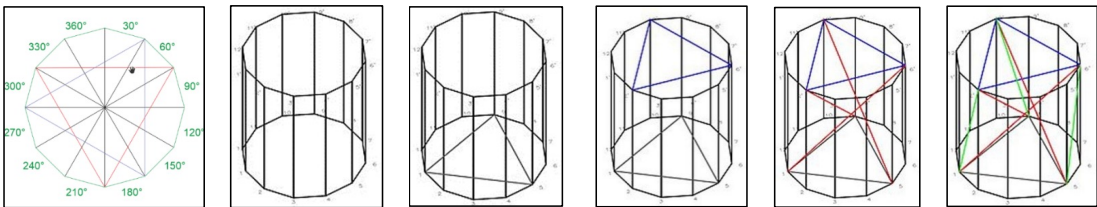


FIGURA 8. ARMADURA TENSEGRITY GENERADA A PARTIR DE UNA ESFERA.

FUENTE: RICAÑO, 2017.

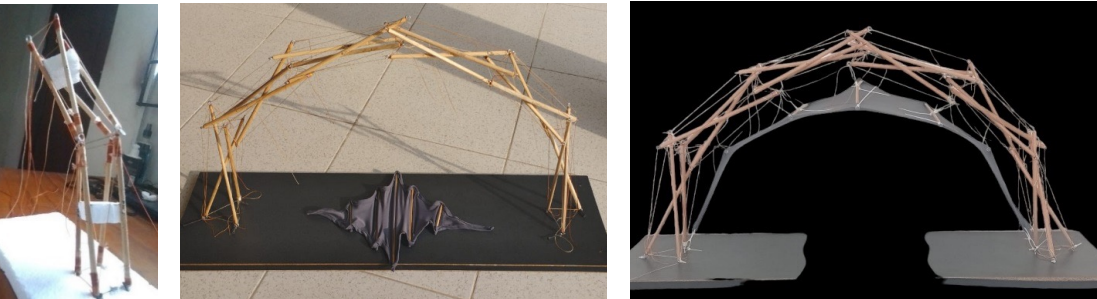


FIGURA 9-11. MODELACIÓN DE UN MÓDULO PRISMÁTICO TENSADO.

FUENTE: RICAÑO, 2017.

Desarrollo geométrico analítico

Para determinar la construcción de la forma dentro de la tensegridad se 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. Según el Dr. Motro (1996), “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”.

Para 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 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 software básico como AutoCAD o Sketchup. Para ello se aplican las siguientes fórmulas:

Para obtener la longitud de los elementos a compresión:

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

Para obtener la longitud de los elementos a tracción:

$$t = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

Para obtener el ángulo de torsión:

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

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 determinar la elaboración del modelo y poder averiguar las longitudes del módulos a utilizar, se realiza mediante una figura geométrica triangular para este ejemplo, arrancamos con un radio de 1.5 m como base y un radio de la tapa superior de 1 m, la altura será de 2.7 m; por lo que aplicamos las 3 fórmulas matemáticas de la ecuación anterior permitiendo obtener la longitud de los elementos de tensión y de compresión que interactúan entre sí en del sistema de tensegridad, integramos las ecuaciones de módulos de tensegridad en una tabla elaborada en Microsoft Excel para obtener de manera más rápida y sencilla los elementos mencionados (tabla 1).

En consecuencia, se diseña un módulo de tensegridad simple que se timará como soporte estructural para diseñar módulos de cubierta complejas a partir de un módulo estándar, esta puede variar en su forma final (figura 12-14), va a depender de la forma que parametricemos el modelo y del tipo de utilidad que se quiera dar a la propuesta arquitectónica (Fuller, 2000) (Peña, 2012) (Tang, 2018: 13).

TABLA 1. CÁLCULO DEL MÓDULO DE TENSEGRIDAD EN EXCEL. LOS VANOS DE COLOR VERDE SON LAS VARIABLES MODIFICABLES
Y LOS VANOS COLOR ROJO SON LOS RESULTADOS ABSOLUTOS

num.de lados= n	Altura=h	angulo torsión= a	Radio superior=r1	Radio inferior=r2	diametro superior=d1	diametro inferior=d2
3	20	30	6	12	12	24
			long. Puntales=p	long. Tensores externos =t	long. Tensores=e1	long. Tensores_base=e2
			26.5463	21.3376	10.3923	20.7846
modulos						
1				Total de puntales	Total de tensores	
				3	9	

FUENTE: MORALES, 2019A.

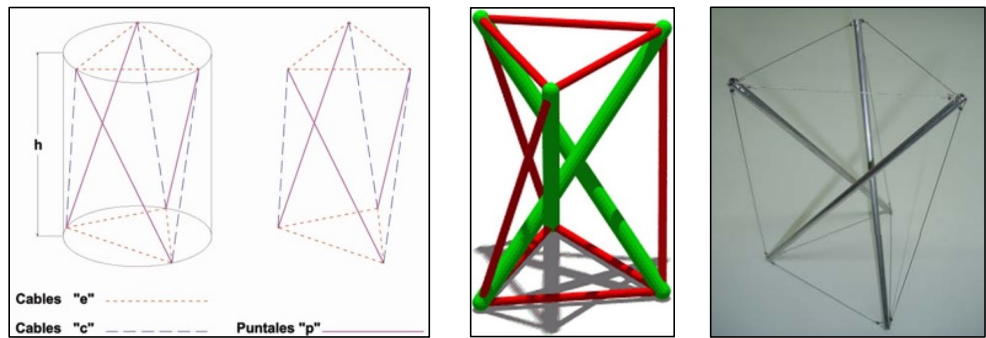


FIGURA 12-14. CONFIGURACIÓN MATEMÁTICA DEL MÓDULO.

FUENTE: MORALES, 2019A.

Modelación aplicada

Para nuestra investigación aplicada se propone un modelo final aproximado a escala 1.20 para desarrollar las posibles configuraciones geométricas de los componentes prismáticos del sistema de tensegridad, y cuáles serían las aproximaciones adecuadas para desarrollar en un prototipo a escala 1:1, por lo que se desarrolla un proceso de búsqueda de formas con los mismos principios mencionados, el cual se deriva de una prisma circular con caras triangulares, para alcanzar los estados de equilibrio en el pretensado, por ello se cambian las distancias de los componentes de la tensegridad de la parte superior e inferior y se desarrolla el prisma, esta forma prismática se le colocar un puntal o poste flotante que servirá para generar la curvatura final de la cubierta, la interacción entre los módulos que se producen entre cada poste prismático varían por las uniones de las cubiertas, por lo que el producto final se escogerá el modelo más sencillo para poder manufacturar (Chilton, 2000) (Gómez, 2013).

La propuesta elaborada se basa en un módulo prismático triangular donde cada barra está sometida a la tensión que generan sobre ella y los tirantes atados a sus extremos

funcionaran como una celosía tridimensional, en cada unión debe haber al menos tres cables que garanticen su estabilidad de tensión que va a tener sobre la barra, con ello es posible tener el pretensado que auto estabiliza el componente, el Arq. Snelson dice: “Sé que necesito un mínimo de tres cables en cualquier extremo de cada barra” (Peña, 2012).

Cumpliendo con la regla anterior, la resultante debe de estar alineado con el eje longitudinal de cada barra, porque de otro modo estas estarían sometidas a una fuerza oblicua, que generaría un momento flector en las mismas, y provocaría que el sistema sea inestable, aunque intentase acomodarse dicha geometría las tensiones internas no podrían equilibrarse (figura 15). El mismo razonamiento 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 se encuentra en equilibrio si está sometido a una determinada tensión que suele estar ocasionada por un esfuerzo de pretensado (figura 16, 17) (Morales, 2019b).

Posteriormente, se desarrollan configuraciones experimentales de modulación con este modelo prismático para crear varios conjuntos de cubiertas que pueden modelizarse en un conjunto de espacios itinerantes, esto se determina con base en el acomodo de la columna prismáticas hechas con el primas triangular tensado (figura 18, 19), el sembrado de estos prismas se colocan en el centro de cada segmentación de la cubierta para hacer una subdivisión espa-

cial y crear una serie de mitosis celulares, que generan formas orgánicas en el espacio (figura 20-23), esto ayuda a determinar que el modelo se puede manufacturar de forma sencilla en nuestro modelo final, por lo que se establece que el proyecto final será una sola cubierta, esto para poder construirse con mayor prontitud y tenga la versatilidad de poder transportarse de un lugar a otro (Morales, 2023).



FIGURA 15-17. MODELO A ESCALA 1:20.
FUENTE: MORALES, 2019A.



FIGURA 18-21. CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO DE TENSEGRIDAD CON VARIAS ADAPTACIONES DE CUBIERTAS TENSADAS.
FUENTE: MORALES, 2019A.

Fundamentos estructurales de equilibrio

Para estos sistemas estructurales, el equilibrio se desarrolla por la misma forma prismática. Por lo tanto, como se puede observar en la figura 22, cada punto debe estar en equilibrio con las fuerzas se encuentran en la unión, por lo que el equilibrio de sus fuerzas que actúan sobre un punto debe estar sometida por miembros a tracción para poder tener el efecto a compresión, y este debe estar en equilibrio, la siguiente ecuación genera dicho diálogo:

$$F \rightarrow ij_1 + F \rightarrow ij_2 + F \rightarrow ij_3 = \rightarrow 0$$

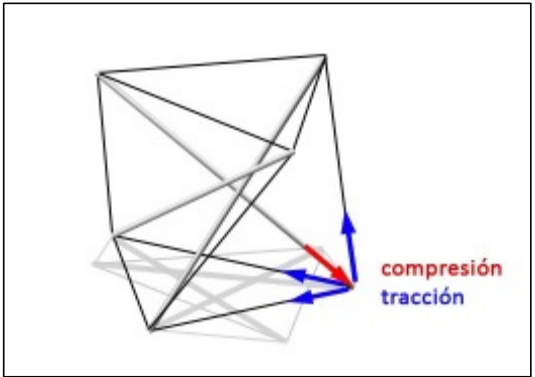


FIGURA 22. ESQUEMA DE RELACIÓN DE FUERZAS.
FUENTE: MORALES, 2023.

Por ello este sistema será capaz de recuperar su posición original de equilibrio pese a la aparición de perturbaciones externas, el cual le otorga a este tipo de estructuras una alta capacidad de soportar situaciones de vibraciones y cargas dinámicas. Teniendo la capacidad de soportar acciones susceptibles como el sismo o cualquier movimiento del terreno (Correa, 2001) (Blanco, 2011) (Morales, 2019b).

Simulación estructural

Para esta disertación se simulara la propuesta de una cubierta con soporte de columna tensegrity, que se modeló en la de la figura 17, a esta propuesta se le desarrollará sólo el análisis estático no lineal en WinTess 3.12, es un software que calcula estructuras de efecto dinámico en las cubiertas ligeras, de la cual se obtienen los valores de los esfuerzos y deformaciones de nuestra propuesta, por lo que se tendrá valores de perfil de la barra y número de cables a utilizar en el modelo final, en consecuencia se manufactura el prototipo, el material que se utilizará en nuestro proyecto será el bambú (angustifolia) y para las uniones acero reciclado de las empresas petroleras de la zonas aledañas de la ciudad, concluyendo con la colocación de una malla sombra (membrana de invernadero).¹

Previamente, para realizar el análisis estático no lineal elegimos el material de las barras, esta será de bambú angustifolia que 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 a la cortante a la fibra, dichos datos encontrados en el reglamento de construcción en las normas técnicas complementarias para el diseño en estructuras de madera en el capítulo 6, donde se especifica las propiedades mínimas que debe tener este material (Normas TC de la CDM, 2020) (McCormac, 2000).

Se propuso un cable de acero 5/16” con una carga de ruptura 4120 kg, para los cables de la tensegridad, en cuanto a la cubierta que se colocó una malla sombra (malla de invernadero) con una resistencia (300/180) N/5cm, y un módulo de elasticidad de 14 t/m, se consideró esta malla por el costo bajo del material, por lo que fue lo más óptimo para nuestro proyecto itinerante, en consecuencia teniendo en cuenta estas premisas pasamos a elegir el tipo de combinación de cargas, las cuales se encuentran dentro de la norma ya comentada, y para ello escogemos tres combinaciones de cargas por ser estructuras denominadas no transitables, la cual tendrá una carga permanente de 40 kg/cm², una carga accidental de 60 kg/cm² y la carga de viento nominal de diseño 95 km/h, para este caso no se toma en cuenta el sismo, ya que este tipo de estructuras son auto equilibrantes ante el movimiento sísmico y por qué su ocupación es itinerante y no es fija, por lo que propuesta para desarrollar dicho cálculo y sus datos iniciales son las siguientes (tabla 2):

TABLA 2. CONSIDERACIONES DE CARGA DEL MATERIAL Y CARGAS POR NORMAS

Datos Iniciales			
Viento X = 95 km/h Viento Y = 45 km/h Viento total = 100.6 km/h (Velocidad real);			
Tipo de edificio = Abierto (libre);			
Cargas Accidental = 60 kg/cm² Superficie cubierta = 46.07 m² aprox.; Carga Normal = 40 kg/cm²;			
Presión interna = 0 kg/m²;			
Pretensado de la membrana = 0/0 %;			
Peso de los cables = 25.6 kg;			
Peso de los tubos = 100.4 kg;			
Peso de la membrana = 51.8 kg (49.43 m²);			

FUENTE: MORALES, 2019A.

1 Véase www.WinTess.com.

Se elabora el análisis estático no lineal y se obtienen los resultados de la deformación ELU global, el cual da un rango de 45 mm de desplazamiento en dirección X, según la normas técnicas complementarias el rango máximo de una estructura es de 55 mm de desplazamiento global en las estructuras no transitadas, en esta primera etapa el sistema estructural está en equilibrio sin ninguna formación global (figura 27), lo siguiente es verificar los resultados de resistencia por el programa de todas las barras y cables, las cuales no deben exceder el ratio de seguridad 1.05, dicha propuesta se dio porque tenemos elementos de acero al igual que el

bambú que tiene cierto comportamiento de resistencia que dicho material mencionado (tabla 3), por lo que las barras de bambú se diseñarán a 90 mm de perfil, se colocó un módulo de elasticidad de 310,000 kg/cm², según las pruebas de referencia del laboratorio de Estructuras de la Universidad la Gran Colombia para bambú angustifolia, para los cable debemos coloca un medida de 8 mm de espesor, por lo que el sistema estructura está en equilibrio y sin fallas estructurales hipotéticamente (figura 23) (Gutiérrez, 2016) (Díaz, 2013) (De Llorens, 2019).

TABLA 3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE TENSEGRIDAD Y DE LA MALLA

Datos Barras Rígidas								
Barra	Axial	Torsor	Mo.max	Co.max	Tensión	Ratio	Código	Pandeo;
	t	tm	tm	t	kg/cm²			
603	-0.007	0.0000	0.0063	0.0045	-38.9	0.03	Ø90-4_S235	0.67;
604	-0.039	0.0000	0.0017	0.0005	-25.0	0.02	Ø90-4_S235	0.68;
605	-0.034	0.0000	0.0309	0.0216	-126.3	0.09	Ø90-4_S235	0.66;
634	0.051	0.0000	0.0000	0.0000	4.7	0.00	Ø90-4_S235	1.00;
Tracción máxima en la Membrana								
Barra	Nudos	t/metro	kg/5cm					
Ratio;								
246	74-87	1.546	77.3	0.92;				
Tracción en los Poli-Cables								
Cable	t	Ratio	Barras	Longitud (m)				
Código;								
1	0.001	0.00	609-612	0.057			6x19-(8mm) Galv;	
2	0.000	0.00	613-616	0.011			6x19-(8mm) Galv;	
3	0.000	0.00	617-620	0.011			6x19-(8mm) Galv;	
5	0.052	0.01	602,606	4.125			6x19-(16mm) Galv;	
12	0.033	0.03	638,639	4.278			6x19-(8mm) Galv;	
Tracción en los Cables Simples								
Bar	t	Ratio		Código;				

FUENTE: MORALES, 2019A.

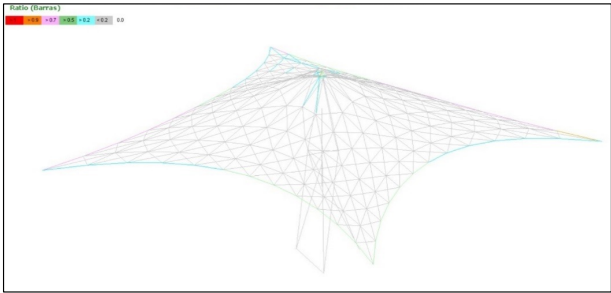


FIGURA 23. ESQUEMA DE RELACIÓN DE FUERZAS Y RESISTENCIA CON RESPECTO AL RATIO DE SEGURIDAD EN LAS BARRAS.

FUENTE: MORALES, 2019A.

RESULTADOS

Construcción de prisma triangular

Para la construcción de este prototipo se ocupó un material alternativo, en este caso es una especie de bambú estructural llamada angustifolia, el uso de este material deja un menor impacto en la huella de carbono en la construcción de nuestro modelo, como se puede observar, en los últimos años, en la región ha tenido un buen uso en la comunidad, aunque no es un material certificado y estandarizado como en Colombia, por lo que manejamos con cierto cuidado para obtener una resistencia adecuada al uso que se vaya a dar y proteger la seguridad del usuario final, en la zona se encuentra varias empresas dedicadas a los cultivo de dicho material, y que también hacen el tratado de conservación del material para su vida útil, dicho esto y ya realizado el diseño estructural de la propuesta se conforma el proceso de manufactura de la propuesta final, este se construye con barras de bambú angustifolia de 100 cm perfil, que es el más comúnmente vendido, las conexiones de las barras son de acero de cédula 40 con varillas soldadas con pestanas de barras lisa de 3/8", estas ahogadas con cemento grout, ya que nos da una resistencia de 300 kg/cm² en tan sólo tres días de secado rápido, dándonos una mayor resistencia a la compresión a nuestra

barra de bambú, los tendones o cables son de acero de 3/16" con un carga de ruptura 3,700 libras, sujetas con tres accesorios de grapa de acero al carbón de 1/8", esto para darle mayor resistencia al pretensado del módulo prismático (Guinnar, 2002).

El primer paso fue corta los miembros del bambú a un 1.70 m y manufactura el nodo de conexión que va a ir ahogado dentro del poste este nivelado y llenado con cemento grout para darle mayor resistencia a la comprensión por la tracción que va a ejercer los cables en las conexiones. Posteriormente ya secado los postes del sistema constructivo, se conectan los cables a las barras, en una disposición en planta para ver cómo 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 (figura 24-27), esto se realizar para observar que la forma de la tensegredidad vaya de acuerdo a las medidas propuestas, en consecuencia se unen los cables diagonales con los nudos para generar el pretensado del componente (figura 28-31), el método para pretensar de este primer módulo fue hecho con una matraca o tensor de 2" de espesor con una resistencia a tracción de 3750 kg/m² (figura 32-34) (Morales, C.C, 2023).



FIGURA 24-27. CONSTRUCCIÓN DE LAS BARRAS DE BAMBÚ.

FUENTE: MORALES, 2019A.



FIGURA 28-31. MEDICIÓN DE LAS CONEXIONES PARA EL PRISMA.

FUENTE: MORALES, 2019A.



FIGURA 32-34. ARMADO DEL MÓDULO PRIMÁTICO.
FUENTE: MORALES, 2019A.

Dentro de los módulos prismáticos de apoyos se fabricaron puntales que sostendrán las cubiertas modular de la membrana y está compuesta con un poste levitando en su centro, se ejecutó el mismo procedimiento de pretensado que el

módulo prismático, pero con una variación que primeramente se pretensó con las matracas y se fueron sustituyendo por cables en sus conexiones (figura 35, 36) (Llorens, 2003, 2011).



FIGURA 35, 36. ARMADO DEL PRISMA TRIANGULAR TERMINADO.
FUENTE: MORALES, 2019A.

Manufactura de la malla

Para concluir el modelo final se fabrica una cubierta hecha de una membrana de PVC, se escoge una malla de invernadero del 50% de traslucidez, ya que las mallas de 60, 70 y 95% excederían el costo de manufactura del módulo, por lo que se optó por una malla más barata, también para reducir los gastos se manufacturó la costura de dicha membrana in situ, previamente, se realizó una simulación de patronaje para calcular las curvas geodésicas que contaría

la cubierta, en dicho análisis se observa que los gajos tienen un ratio de tolerancia menor a 2.5 cm, es decir, el diseño de patrón está dentro del umbral de tolerancia (figura 37-39), posteriormente se exportaron con una extensión dxf. para poder manipular el gajo en AutoCAD, esto conllevó a imprimir los gajos para ver la compatibilidad de conexión de los patrones en papel y esta dio la forma de la cubierta final (figura 40, 41).

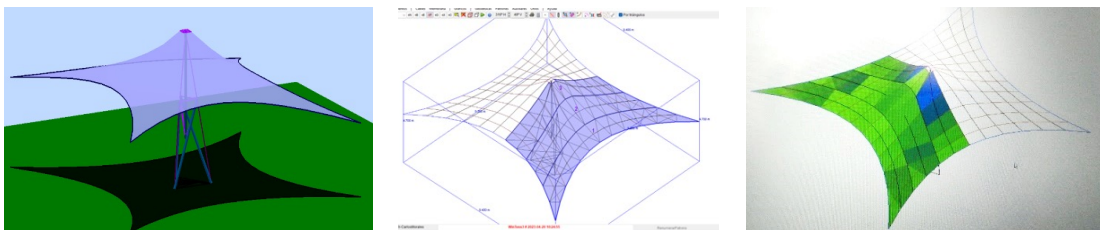


FIGURA 37-39. DESARROLLO Y DISEÑO DE PATRONAJE DE LA MEMBRANA.
FUENTE: MORALES, 2019A.

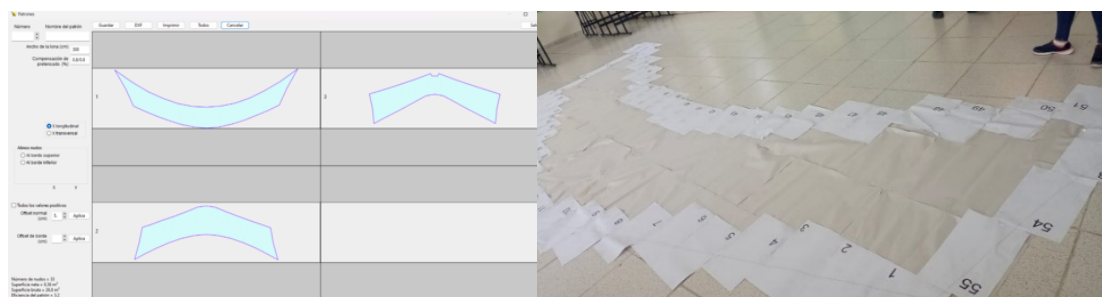


FIGURA 40, 41. EXPORTACIÓN E IMPRESIÓN DEL PATRONAJE DE LA MEMBRANA.

FUENTE: MORALES, 2019A.

Siguiendo con la construcción de la cubierta, se corta la malla en gajos respetando la forma del patronaje, a esta se le deja una pestaña de tolerancia de 5 cm, el cual unirá a los patrones de la cubierta, por consiguientemente ya terminado de unir todas la costuras (figura 42-44), se realiza los accesorios de detalles de conexiones con varillas corrugadas de 3/8" de espesor, se escoge este material, ya que es fácil de adquirir y el modelo no necesita mucha resistencia al tirón por tensión, pues sólo tiene un arrastre de tensión de 250 kilogramos en los puntos más bajos y en la linternilla de 575 kilogramos de compresión distribuidos en cuatro direcciones (figura 45-48), por ello es suficiente este diseño de uniones para una

estructura itinerante, la utilidad de la linternilla central, servirá para dos cosas, la primer para darle forma y equilibrio a la cubierta, y la otra para la succión de viento caliente dentro del espacio, obteniendo ya las dos parte principales de este prototipo, se procede a armar el modelo final con cuatro anclajes de postes reciclados de acero, los cuales se entierra a 60 cm y se compacta al 95% para que se tenga mayor adherencia al suelo, de ahí se coloca un cable de 5/16" con un tensor de la misma medida para hacer tensión en los extremos y la cubierta pueda mantener la forma final que se puede observar en las figuras 49-52, con estos simples pasos se termina la manufactura de la cubierta itinerante.



FIGURA 42-44. MANUFACTURA DEL PATRONAJE DE LA MALLA SOMBRA DE INVERNADERO.

FUENTE: MORALES, 2019A.



FIGURA 45-48. MANUFACTURA DE LOS DETALLES DE UNIÓN DE LA CUBIERTA.

FUENTE: MORALES, 2019A.



FIGURA 49-52. ARMADO DE LA CUBIERTA CON EL MÓDULO PRISMÁTICO TRIANGULAR.
FUENTE: MORALES, 2019A.

Esta estructura es itinerante y su función principal es la transportabilidad, por lo que puede ser trasladada fácilmente, para poder instalar en todo tipo de terrenos, el modelo tiene algunas condicionantes que se deben de respetar, esta dependerá donde se plante izar, si es para lugares no urbanizados dependerá del anclaje esta puede ser con mástiles enterrados para poder sujetar las cuatro direcciones de la cubierta y esta evite las volcaduras por el viento, el costo general de esta construcción fue de una inversión de 12 mil pesos sin ningún anclaje de

concreto (zapatas), con la cimentación agregada, los pozos de anclajes para la cubiertas y una membrana arquitectónica de 95%, nos da un total de 21 mil pesos, por lo que el modelo es de muy bajo costo (figura 53, 54).

Por la misma forma de la cubierta y cómo está dispuesta su linternilla en la parte central del prisma tensado, se crea un efecto de succión de aire caliente dentro de la estructura (figura 55), el cual permite una regulación térmica del espacio debajo de la cubierta, manteniendo fresco la zona donde va a estar el usuario final.



FIGURA 53, 54. PROTOTIPO FINAL TERMINADO.
FUENTE: MORALES, 2019A.

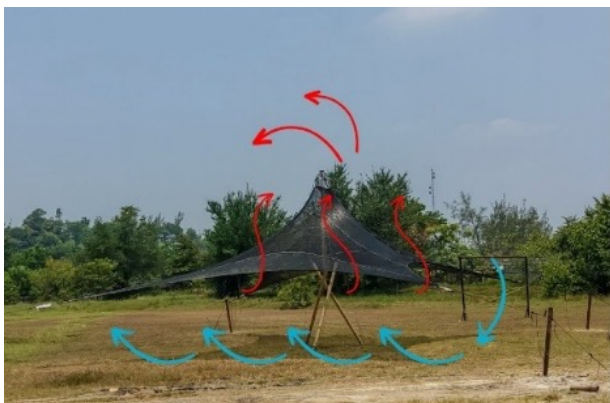


FIGURA 55. LA FORMA DE MODELO GENERA UNA SUCCIÓN DE VIENTO CALIENTE.
FUENTE: MORALES, 2019A.

DISCUSIÓN

Dentro de la promoción del conocimiento en la arquitectura, la falta de difusión y redacción del conocimiento adquirido de este tipo de sistemas de tensegridad, hacen que carezca de aplicaciones arquitectónicas formales, aun paradójicamente hay muchas propuestas de diseño experimental y de aplicaciones de estructuras temporales con este tipo de estructuras, pero se ve mermada por la falta de una difusión metodología de diseño aplicado en la arquitectura, el cual pueda desarrollarse con facilidad en los proyectos de arquitectura, esto 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.

A nivel global existe el desarrollo científico de procesos geométricos y constructivos de este tipo de estructuras singulares como el puente Kurilpa diseñado por Cox Rayner Architects e ingenieros de Arup, el puente está construido con un sistema de tensegridad híbrido y es el más grande del mundo. Ubicado en Brisbane, Australia, tiene aproximadamente 455 m de largo y se balancea entre grandes mástiles de aluminio y cables de acero ligero para dar vida a una estructura basada en la tensión, tal como está, una forma y geometría completamente nuevas en la taxonomía de las tensegridades, cuando casi todas las demás estructuras de tensegridad construidas físicamente usan formas preestablecidas, porque este tipo de aplicaciones se pueden realizar para diferentes tipos de funciones arquitectónicas (Burkhardt, 1994).

En cuanto en Latinoamérica e Iberoamérica, hay pocas Facultades de Arquitectura que hacen la labor de crear una desarrollo constructivo de estos componentes auto equilibrantes, sólo para mencionar algunos de ellos; la Universidad Politécnica de Catalunya y de Madrid, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y la Universidad Nacional Autónoma de México, son algunas instituciones que realizan modelos geométricos prismáticos con sistemas de tensegridad y son construidos con materiales alternativos para desarrollarse en la arquitectura, por lo que es importante el desarrollo de una metodología que adapte a las condiciones de mejora del conocimiento, lo que vale la pena determinar un proceso metodológico más eficiente y rápida para diseñar los sistemas de tensegridad.

Determinado una metodología de diseño para este tipo de sistemas estructurales podremos proponer diferentes utilidades de dicho tipo de estructuras a base de tensegridad, ya que sabremos cómo es su comportamiento geométrico, y cuáles podría ser sus conexiones en dichos componentes de una estructura pretensada, nuestra disertación puede llegar a tener diferente tipos de configuraciones y propuesta de diseño aproximados para posibles aplicaciones dentro de la arquitectura (figura 56-58), para este caso el requerimiento de diseño nos permite salvar un claro grande con este tipo de configuraciones simples como un prisma triangular, que al modularse y repetirse se vuelve una sistema más complejo, pero fácil de incluir en los proyectos de diseño.



FIGURA 56-58. CONFIGURACIONES MÁS COMPLEJAS PARTIENDO DEL MÓDULO BÁSICO PRISMÁTICO ESCALA 1:1.
FUENTE: RICAÑO, 2017.



FIGURA 59, 60. CUBIERTA PRISMÁTICA MODULADA TERMINADA.

FUENTE: RICAÑO, 2017.



CONCLUSIONES

La disertación se desarrolló en el principio metodológico del Arq. Snelson, ya que es un punto de referencia para configurar las estructuras de tensegridad simplex de forma prismática, ya que la idea conceptual, expuesta en esta investigación, fue ejecutar un diseño experimental que ayudara a crear modelos físicos y geométricos de las estructuras de tensegridad, por lo que se tendría que implementar una metodología de diseño para manufacturar dicho prototipo, esto partiría de una premisa teórica constructiva para desarrollar este tipo de sistemas estructurales, ya para el modelo final de nuestra cubierta se realizó con el desarrollo de una geometría analítica – matemática, que nos ayudó a conformar el sistema primático adecuado.

Con la premisa analítica expuesta se crearon propuestas a escalas 1:20 para verificar su geometría, el cual se observó que tenía una estabilidad constante en sus componentes, por lo que el siguiente paso fue realizar las simulación estructural con WinTess, bajo la norma NOGDMX (Normas Técnicas Complementarias de Construcción del Reglamento de la Ciudad de México) y los coeficientes del Eurocódigo (resistencia del Acero, Madera y polímeros de alta resistencia en las membranas), estas normas se aplican dependiendo del uso de la estructura, para nuestro caso la utilidad de nuestra estructura, es de una estructura itinerante o pabellón móvil, por lo que entra en la categoría de cubiertas no transitables.

Se ejecutó la simulación estructural por medio de matrices de rigidez en toda la estructura para verificar el ratio de seguridad en el

La disertación se desarrolló en el
PRINCIPIO METODOLÓGICO DEL ARQ. SNELSON,
ya que es un punto de referencia
PARA CONFIGURAR LAS ESTRUCTURAS DE TENSEGRIDAD SIMPLEX DE FORMA PRISMÁTICA,
ya que la idea conceptual,
EXPUESTA EN ESTA INVESTIGACIÓN,
fue ejecutar
UN DISEÑO EXPERIMENTAL
que ayudara a crear
MODELOS FÍSICOS Y GEOMÉTRICOS de las ESTRUCTURAS DE TENSEGRIDAD...

sistema, el cual pasó ampliamente, también realizamos una serie de componentes de conexión, que ayudaron a mejorar la unión de la cubierta con el primas tensado, posteriormente las conexiones se manufacturaron e integraron al modelo con la forma que necesitábamos para la estructura, ya que este tipo de sistemas tiende a ser deformables en sus uniones, dado a que reciben mucho esfuerzo en la conexiones por ello se optó por realizar dichas uniones de forma más sencillas y rígidas, el cual ayuda a mejorar estos enlaces.

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

Finalmente, el tema deja varias líneas de investigación a desarrollar y mejorar como en el caso de materiales que 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, de igual manera la membrana, ya que hay varios tipo de mallas que se pueden colocar en este tipo de estructura y darle mayor durabilidad y resistencia al sistema estructural.

FINALMENTE,
el tema deja varias
LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN
A DESARROLLAR
Y MEJORAR *como*
en el caso
DE MATERIALES
que no se
PROFUNDIZÓ
MUCHO,
ya que
EL BAMBÚ
es un material
AMIGABLE Y RESISTENTE,
y si es bien ejecutado
PUEDE SER
UNA ALTERNATIVA
TECNOLÓGICAMENTE
VIABLE...

FUENTES DE CONSULTA

Blanco Blanch, P. (2011), Pretensado de Columnas Tensegrity para el incremento de Rigidez Axial, Tesis de Investigación para Máster de Arquitectura. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona.

Broto, C. (2006), *Cubiertas, Innovación y Diseño*, Editorial Links.

Burkhardt, R. W. (1994), *A Practical Guide to Tensegrity Design*, Software Services, Cambridge (USA).

Bustelo Lutzardo, J. A. (2005), *Equilibrio de Tensiones*, Ediciones La Voz de Galicia, A Coruña (España).

Correa, J. C. (2001), *Static Analysis of Tensegrity Structures*, M.S. thesis, Mech. Eng. University of Florida. Gainesville.

Chilton, J. (2000), *Space Grid Structures*, Editorial Architectural Press, Oxford, Boston, USA.

Díaz, N. J. (2013), Sistemas Tensegrity: Diseño de un prototipo de un panel interior divisorio. Tesis de Máster en Arquitectura, Universidad Politécnica de Catalunya.

De Llorens, J.I. (2019), “Eurocódigo GT 5: estructuras de membranas”, Comunicación 33. Disponible en https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/175230/Euroc%C3%B3digoGT_5_JIdelLlorens.pdf?sequence=1&isAllowed=y, consultado el 18 de octubre de 2023.

Fuller, M. (2000), *Compresión de las Estructuras en la Arquitectura*, Editorial McGrawHill, México.

Fuller, R. B. (1975), *Synergetics*, MacMillan, New York.

Gómez Jauregui, V. (2013), *Tensegridad. Estructuras tensegríticas en ciencia y arte*, Editorial Universidad de Cantabria, Santander.

Guinnar, T. (2002), Deployable Tensegrity Structures for Space Applications, Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology. Department of Mechanics, Stockholm.

Gutiérrez González, M. (2016), Resistencia a Compresión y Flexión de un Laminado de Guadua de Bajo Costo Producido en Colombia, Conference: 11th World Bamboo Congress, México.

Kenner, H. (1976), *Geodesic Math and How to Use It*, University of California Press, Berkeley.

Llorens Duran, J. I. (2000), “El Pabellón de Venezuela en Expo 2000 Hannover”, en II Jornadas latinoamericanas de Arquitectura y urbanismo 2001. Institut Catala de Cooperació Iberoamericana-ICCI, Col.lecció Amer&Cat, núm. 3. pp. 130-137. Barcelona, España.

Llorens, J., García Ch. y Pöppinghaus H. (2003), *Tensegrity Structures for Textile Roofs*, Textile Composites and Inflatable structures, Ed. Cimne, Barcelona.

Llorens Duran, J. I. (2011), Los detalles constructivos de las tenso estructuras. In IV Simposio Latinoamérica de Tenso Estructuras. Montevideo, Uruguay, 2011. Disponible en https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/15512/PONENCIA_LLORENSc, consultado el 18 de octubre de 2023.

McCormac, J. (2000), *Diseño de Estructuras de Acero, Método LRFD*, 2 edición, Editorial Alfaomega.

Morales Guzmán, C. C. (2019a), Taller de Diseño Arq.: Detalles, Licenciatura en Arquitectura, Universidad Veracruzana.

Morales Guzmán, C. C. (2019b), “Proceso de diseño de una cubierta con el principio de tensegridad para espacios de esparcimiento”, *Revista Procesos Urbanos*, vol. 6. Disponible en <https://revistas.cecar.edu.co/index.php/procesos-urbanos/article/view/460>, consultado el 18 de octubre de 2023.

Morales Guzmán, C. C. (2023), “Diseño y desarrollo de cubiertas ligeras formadas con sistemas de tensegridad”, *Revista Módulo Arquitectura*, vol. 31. Disponible en <https://revistascientificas.cuc.edu.co/moduloarquitecturacuc/article/view/4425>, consultado el 18 de octubre de 2023.

Motro, R. (1996), “Structural Morphology of Tensegrity Systems”, *International Journal of Space Structures*, vol.11, IASS.

Normas Técnicas Complementarias de Construcción de CDMX (2020), Disponible en <http://www3.contraloriadf.gob.mx/prontuario/recursos/normatividad/69247.pdf>, consultado el 17 de octubre de 2023.

Peña, D. M. (2012), Aplicación del Tensegrity a las Construcciones Textiles Atirantadas, Tesis de Doctorado en Arquitectura. Universidad Politécnica de Catalunya.

Reyes Nieto, E. (2005), Estructuras de Postes y Cables “Tensegrity”, Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México.

Ricaño, R. (2017), Propuesta de un Cubiertas de Tensegridad para Vicerrectoría, Tesis de Licenciatura, dirigido por Dr. Carlos Cesar Morales Guzmán, Universidad Veracruzana.

Snelson, K. (2012), Kenneth Snelson, New York (USA). Disponible en <http://www.kennethsnelson.net>, consultado el 17 de octubre de 2023.

Tang, R. (2018), Tensegridad y Arquitectura, Tesis de fin de grado de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid.

WinTess Software, Software de simulación de tenso estructuras. Disponible en <https://www.wintess.com/es/apoyo/manual/introduccion/wintess3/>, consultado el 20 de octubre de 2023.