

Diseño y construcción de un paraguas plegable para espacios arquitectónicos

Design and construction of a folding umbrella for architectural spaces

Desenho e construção de um guarda-chuva dobrável para espaços arquitetônicos

Carlos César Morales-Guzmán

Universidad Veracruzana, Poza Rica, Veracruz (México)
Facultad de Arquitectura

Morales-Guzmán, C. C. (2019). Diseño y construcción de un paraguas plegable para espacios arquitectónicos. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 2(1), 76-89. doi: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.1623>



<http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.1623>

Arquitecto, Universidad Veracruzana (México).

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

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

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

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

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

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

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

dr.arqmorales@gmail.com / carlmorales@uv.mx

Resumen

El desarrollo de esta investigación culmina en un prototipo experimental realizado por la síntesis metodológica del diseño experimental, para lo cual se consideraron como referencia los sistemas plegables. Este concepto se llevó a cabo en el proceso del prototipo de paraguas plegable. Dicha modelación tuvo como referentes históricos el teatro ambulante del arquitecto Emilio Pérez Piñero, el cual se fundamenta en el principio de una estructura plegable, y Leonardo Da Vinci, quien creó un sistema de estructuras recíprocas que desarrolló por medio de esquemas constructivos y manifiestos. Siguiendo estos conceptos se creó el prototipo, con el manejo del software WinTess, donde se calculó la estructura portante y la membrana de dicho modelo propuesto. Lo más destacado fue el proceso de construcción de este prototipo, con lo cual se generó nuevo conocimiento técnico en cuanto a la simulación y fabricación de sistemas plegables y transformables, que tienen la capacidad de plegarse, moverse y erigirse en otro lugar.

Palabras clave: arquitectura plegable; arquitectura transformable; detalles constructivos; modelo experimental; simulación estructural en 3D; tensoestructuras.

Abstract

This research culminates in an experimental prototype, carried out through the methodological synthesis of the experimental design, for which folding systems were considered as a reference point. This concept was developed through a folding umbrella prototype. Said modeling had two historical referents: the itinerant theater of architect Emilio Pérez Piñero, based on the principle of a folding structure, and Leonardo Da Vinci, who created a system of reciprocal structures using constructive and manifest schemes. Following these concepts, the prototype was developed using the Witness software, where the supporting structure and the membrane were calculated. The highlight of the construction of this prototype was the assembly process, carried out with the help of undergraduate and graduate students, which generated new technical knowledge on the simulation and manufacturing of folding and transformable systems.

Keywords: folding architecture; transformable architecture; experimental model; 3D structural simulation; constructive details; tense structures.

Resumo

O desenvolvimento desta pesquisa culmina num protótipo experimental realizado pela síntese metodológica do desenho experimental, para o qual foram considerados como referência os sistemas dobráveis. Esse conceito foi realizado no processo do protótipo de guarda-chuva dobrável. Essa modelação teve como referentes históricos o teatro ambulante do arquiteto Emilio Pérez Piñero, o qual está fundamentado no princípio de uma estrutura dobrável, e Leonardo Da Vinci, que criou um sistema de estruturas recíprocas desenvolvido por meio de esquemas construtivos e manifiestos. A partir desses conceitos, o protótipo foi criado com o auxílio do software Witness, com o qual foi calculada a estrutura portadora e a membrana do modelo proposto. Destacou-se o processo de construção desse protótipo, com o qual foi gerado novo conhecimento técnico quanto à simulação e fabricação de sistemas dobráveis e transformáveis, que têm a capacidade de dobrar-se, mover-se e levantar-se em outro lugar.

Palavras-chave: arquitetura dobrável; arquitetura transformável; detalhes construtivos; modelo experimental; simulação estrutural em 3D; tensoestructuras.

Introducción

El resultado de investigación que se presenta en este artículo es la fase final de un modelado experimental de un sistema plegable que se publicó en esta misma revista (Morales-Guzmán, 2016, pp. 98-110). En dicho artículo se explicó la metodología experimental, la cual partió de una fase conceptual y concluyó con un prototipo a escala 1:1. Asimismo, se explicaron las bases de cómo desarrollar una estructura plegable en el diseño arquitectónico, y qué procesos conceptuales se deberían seguir para desarrollar sistemas plegables (el diseño por modelación es una de las principales guías para desarrollar estos sistemas, ya que se verifican los movimientos y la sistematización de las piezas que posteriormente se tienen que construir, y ayuda a que posteriormente la geometría se adecue a los errores encontrados en los modelos). En esta fase se demostró cómo el procedimiento metodológico anterior mejora la estructura funcionalmente, y se comprobó que puede tener utilidad para los espacios arquitectónicos abiertos como los lugares públicos (parques, plazas, escenarios, etc.). Esta inquietud se produce por la aparición de materiales eficientes, ligeros y de alta resistencia que se utilizan en la actualidad, que brindan la posibilidad de reducir los espesores de la estructura de esta construcción hasta llegar al prototipo final (p. 98).

Un ejemplo del continuo avance de la tecnología en las estructuras se observa cuando se utilizan materiales cuyo peso propio y rigidez son casi nulos en la estructura, pero su trabajo actúa bajo una lógica estructural que los hace poco deformables, aun estando expuestos a cargas externas. Dicha teoría era sustentada por el arquitecto Frei Otto en sus investigaciones de superficies mínimas, la cual aplicó en el pabellón alemán

de la Feria Mundial de 1967. Esta resistencia se logra bajo la optimización de la forma en las estructuras, encontrando aquellas que favorezcan el equilibrio estructural en la geométrica, a fin de mejorar la distribución de los esfuerzos. En el caso de la presente investigación, se evocan sistemas transformables, con capacidad de plegarse, moverse y erigirse en otro lugar.

En consecuencia, se presenta en breve una línea de tiempo que servirá de antecedente, en donde se señalan ciertos momentos históricos importantes en la arquitectura transformable. Se inicia con la invención del sistema de unión tipo tijera, el cual permitió la movilidad dentro de la estructura; este factor justifica esta exploración, la cual pretende desarrollar nuevo conocimiento para la enseñanza y, en especial, para el desarrollo geométrico de las estructuras plegables, ya que esta es una de las medidas fundamentales para las aproximaciones metodológicas del diseño del paraguas plegable.

Por lo tanto, en esta investigación se plantea desarrollar el prototipo para reactivar espacios públicos urbanos en zonas cálidas en el estado de Veracruz (México), ya que dicha región tiene una extensión territorial costera con alta temperatura, por lo que un sistema plegable fácil de montar en el sitio hace necesario que se utilicen cubiertas ligeras de rápido montaje; por esta razón, el desarrollo de la estructura se orienta a generar una tecnología de construcción de rápido montaje; por la naturaleza del proyecto se realizan varios pasos que se publicaron anteriormente (Morales, 2016, pp. 99-101), y para esta última fase solo se mencionarán los más relevantes, estos son: la modelación, el prototipo, la aproximación del modelo a escala real, y la construcción final del producto.

Antecedentes¹

Para justificar la ruta de investigación se resume una línea de tiempo en la que se señalan tres periodos dentro la historia que son importantes para el proceso de este proyecto como referencia conceptual, esto sustenta y aclara qué tipo de virtudes debe tener un sistema plegable.

Flexibilidad. En el primer periodo se encuentra que los beduinos fueron de los primeros en utilizar materiales textiles para autoconstruir sus espacios provisionales, dicho sistema era fácil de transportar (Figura 1) y tenía aplicaciones funcionales y prácticas, ya que se podía montar fácil-



Figura 1. Espacios provisionales, tribu beduina, península Arábiga
Fuente: Morales (2016, p. 99).

mente en cualquier lugar y tener así un espacio para habitar. Esto indica la importancia de que la estructura sea flexible para integrarse a otros requerimientos arquitectónicos.

Prefabricación. En el segundo periodo se encuentra el uso de la forma como estructura. Con la aparición de los materiales más resistentes y ligeros surgieron inmensidad de prototipos industrializados que facilitaron construir espacios en muy poco tiempo. Más tarde aparecieron el arquitecto Emilio Pérez Piñero, con su teatro ambulante plegable en el Concurso Internacional de la Unión Internacional de Arquitectos en 1961, y el ingeniero Fuller, con su geodésica desmontable en 1963 en la Feria Mundial de Montreal; cada uno de ellos son sistemas óptimos para construir espacios de grandes dimensiones (Figura 2). Estas aplicaciones demuestran que un sistema industrializado bien diseñado sirve para varias funciones.

Transformación. En el último periodo se encuentra que las estructuras transformables toman la habilidad de transmutar su entorno espacial, esto lo demanda la sociedad actual, ya que necesitan espacios multifuncionales. En la actualidad se desarrollan muy pocos modelos transformables debido a su complicada manufacturación y análisis estructural, por lo cual casi no se confeccionan este tipo de estructuras. En esta área de investigación y desarrollo surge el doctor Félix Escrig, quien realiza estructuras plegables de forma eficiente y aplicada. Un ejemplo de estas es la cubierta del Polideportivo de Sevilla construida en 1994 (Figura 3).

Esta investigación se beneficia de la línea de tiempo analizada a profundidad para desarrollar las siguientes experimentaciones y formalizar una serie de pasos que ayudarán al proyecto final, y a justificar el desarrollo de diseño en el que se obtendrá su forma y la aplicación constructiva de sus detalles estructurales (Morales, 2013a, 2014a, 2015, 2016).

¹ Estos antecedentes se encuentran en Morales-Guzmán (2016, pp. 99-100), y se consideran relevantes para comprender el origen de la propuesta.



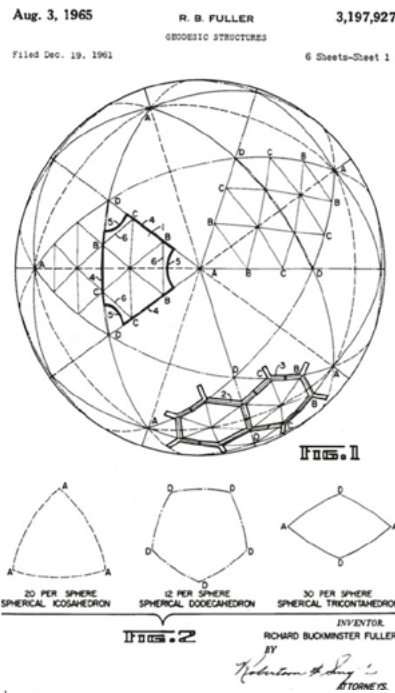
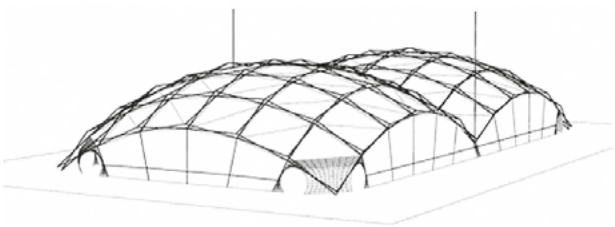


Figura 2. Esquema de la geodésica. Ingeniero Buckminster Fuller, EE.UU., 1950

Fuente: Buckminster (1963).

Figura 3. Polideportivo de Sevilla, Félix Escrig Pallarés, España, 1994

Fuente: Escrig y Valcarel (2012).



Sistema de tijera (barra rígida central)

Condición geométrica básica



Este sistema plegable tipo paraguas se basa en un nodo central que sube de manera ascendente y descendente en la barra rígida, por lo cual los demás nudos pivotantes de sus brazos tienen total grado de libertad entre las barras en el eje perpendicular del plano que ayuda a plegarlo hacia el interior y el exterior de la estructura.

Tabla 1. Forma básica para generar una estructura plegable

Fuente: Rodríguez (2005) y Morales (2016, p. 101).

Metodología

El desarrollo de este proyecto comienza por la experimentación de la forma del paraguas, esto facilita la generación de un sistema de diseño que pueda transformar el espacio en la arquitectura. La morfología del modelo se justifica en generar una estructura plegable tipo paraguas, con una tenso-estructura hiperbólica con la propiedad de plegarse; con esta característica se desarrolla el diseño, por medio de iteraciones de movimiento en su estructura. Este modelo servirá para la recuperación de espacios urbanos y de protección para las inclemencias del clima en la región y el estado de Veracruz (México). A fin de entender lo que se hará, se recordará una de las primeras fases del proyecto: la modelación. Al comienzo se experimentó con tres modelos tipo tijeras, cada experimento tuvo un principio conceptual matemático el cual se geometrizó, pero para este caso solo se estudiará el modelo que generó mayor optimiza-

ción en el plegado y facilidad de fabricación en sus partes; la metodología extendida se puede apreciar en el artículo anterior publicado bajo el nombre: "Construcción experimental de un sistema transformable tenso plegable" (Morales, 2016, pp. 98-110), en donde se desarrolla toda la serie de modelos de movimiento de las estructuras plegables tipo paraguas.

La forma de este tipo de estructura se generó bajo el esquema que se muestra en la Tabla 1, con los bocetos básicos que debería tener una estructura plegable; si no se contempla este principio, la flexibilidad dentro de la estructura no se dará; una vez comprendido esto, se podrá reproducir un anteproyecto de sistema plegable, que producirá la propuesta final.

La pauta para crear elementos de forma simple y con más funcionalidad se enfatizó en el modelo experimental que se explicó en el mencionado artículo (Morales, 2016), en el cual se desarrolló una serie de pasos y modelos experimentales que sirvieron para obtener la forma final del proyecto y su resolución constructiva en esta investigación; esto implicó buscar soluciones óptimas que brindarían la simplicidad del modelo, con la finalidad de determinar las características que se establecen en el proceso de este trabajo, por ello la experimentación en la investigación tuvo un papel muy importante para desarrollar la metodología por medio de la modelación, la cual generó un modelo a escala 1:5 para ver los detalles de conexión constructiva del paraguas plegable (explicada con detenimiento en Morales, 2016). Debido a que era importante para el proyecto la manera como se desarrollarían las articulaciones y conexiones del sistema se enfatizó el modelado en la plegabilidad de la estructura, por ello era conveniente crear el modelo con materiales que tuvieran la resistencia adecuada a la tracción, ya que la tenso-estructura (velaría) hace que se rigidicen los miembros estructurales de la estructura (Figuras 4 a 7), por ello se realizó un nodo móvil ascendente que alberga los ocho miembros articulados, estos a su vez se articulan nuevamente a un tercio de su claro para conectar otros miembros tubulares que se conectan en el nodo superior fijo que ayuda a sostener la plegabilidad del sistema retráctil. Posteriormente se coloca un accesorio de refuerzo para conectar las articulaciones de la linternilla de la velaría, que a su vez también se fija con cables para que la articulación colocada en la unión metálica del paraguas tenga un tope; en consecuencia, se coloca un sistema de poleas que actúa como palanca para subir el nodo ascendente a fin de plegar la estructura de la vela y así mantener rígido el sistema estructural.

Ya colocada la velaría en la parte superior de la estructura, se ponen tensores reguladores en las uniones metálicas de los bordes tubulares para tensar las relingas en los apoyos extremos de los miembros, con ello se equilibra el sistema estructural de la estructura transformable. En seguida se prueba la velaría de la estructura con el sistema de poleas (Figuras 8 y 9) y se observa cómo el desarrollo de la tenso-estructura es estable y



conserva una figura estructural adecuada para mantener el equilibrio de las tensiones dentro de su superficie. Una parte importante de esa reagudización de la velaría es el regulador de los bordes, por ello se puede plegar el manto del paraguas; es importante mencionar que este paso proporcionó los detalles constructivos que se realizarán más adelante y la manera como se comportarían en principio dichas conexiones. Aunque el material era muy diferente, al igual que su resistencia, este modelado escalado ayudó a entender y determinar las conexiones finales del proyecto (Morales, 2013b, 2014b y 2016).

Resultados

Desarrollo del prototipo experimental

En este apartado se abordará el proceso de manufactura del prototipo de los miembros de la estructura, ya que esta construcción tuvo un papel importante en la fase final del proyecto, por ello se determinó que el prototipo tendría un poste central de A36 de OCE 89 mm, que soportaría la tensión de las cargas de los brazos a fin de atender las cargas solicitadas. También se fabricó el armado de piezas, las uniones de cumbrera y nodo deslizante, y se situó en los miembros secundarios plegables un OCE 60 mm, así como los de la cumbrera que auxilian la transformación del paraguas; las placas de cumbrera y nodo deslizante se soldaron a las uniones; este

mismo método se aplicó a la manufactura de la base del poste central. Previamente, se construyó un pedestal que soportara el nodo deslizante, en este se instalaron las medidas justas de este nodo articulado, para lo cual se efectuaron varias soldaduras de placa en donde se colocarían los mecanismos que articularían la estructura y, posteriormente, le darían la facilidad de plegarse.

Después de fabricar varias piezas compuestas (Figuras 10 a 13) que ayudaron principalmente al sistema plegable, se realizó un primer montaje para verificar el plegado de la estructura; en paralelo, se desarrolló una cimentación de 0,80 m x 0,80 m, con un dado de 0,40 m y una altura de 1,20 m. Se le instaló una placa de acero de 1/2", incrustada al dado, que recibiría el poste central. Durante el proceso se colocó la membrana textil (Figuras 14 a 17), en la instalación se presentaron inconvenientes en el tensado y se tuvieron que seccionar los miembros secundarios de la estructura y la membrana tensada, lo que redujo la estructura a un diámetro de 5 m; dichos inconvenientes servirían de experiencia para realizar la fase final del prototipo (Morales, 2013b, 2014b, 2016, 2017).

Figuras 4 a 7. El modelado del paraguas retráctil ayudó a generar detalles constructivos más exactos para su funcionamiento al desplegado

Fuente: Morales (2012; 2016, fig. 16).



Figuras 8 y 9.
El desplegado del modelo ayudó a formar conceptos constructivos del movimiento del sistema plegable del paraguas
Fuente: Morales (2013b; 2016, fig. 17).

Alcances y mejoras

Mejoramiento final del proyecto

A partir de los desarrollos alcanzados, se da inicio a la fase de mejoramiento y alcances reales del prototipo final. Como se señaló, el modelo anterior ayudó a verificar el método de ensamble y construcción de un paraguas transformable, en este periodo se mejorarán los percances anteriores, como el error de la membrana –quedó más corta y no alcanzó a desplegar todo el diámetro propuesto–. Como primera medida, se recalculó el análisis estructural del paraguas plegable con un diámetro de 15,5 m; posteriormente a este análisis se realizó la selección del material para construir dicho proyecto (tabla 2), se comprobó con el análisis matricial del programa WinTess, y este se comparó con el cálculo para el modelo experimental anterior. Se anotaron las diferencias

de análisis de la estructura anterior y se reconfiguraron los miembros estructurales del paraguas plegable; los miembros se calcularon por el método del *Bridge Design Manual*, del Load and Resistance Factor Design (LRFD), el cual arrojó un perfil de acero A36, con un tubo principal de 152 cm de perfil; los miembros secundarios fueron de 75 cm de perfil, las uniones se hicieron de placas metálicas de $\frac{1}{4}$ ", con una soldadura de arco eléctrico con isótopo EXX60 estructural; en consecuencia, se calcula la superficie de la membrana del paraguas plegable (Tabla 3), donde se verifica una membrana Serge Ferrari T1002, el factor de seguridad ofrece un óptimo resultado; en dicho análisis también se da un resultado de medidas para las religas que en este caso es un cable de 18 mm, con acostillamientos de la misma medida.

Posteriormente se realizaron los detalles estructurales del paraguas plegable, una de las mejoras es la unión articulada ascendente que ayuda a que la estructura se transforme, en ella se colocan poleas de carga de 3 t, con un cable de 12 mm de espesor para cargar los miembros secundarios del paraguas (Figuras 18 a 24); estas se regulan con un malacate de 3 t en la parte inferior, manejada con una manivela que cada vez que se le dan vueltas pliega y despliega la estructura. En los brazos principales de despliegue se propusieron postes metálicos en posición vertical, para generar una figura triangular, con dicho diseño se crea una viga y un poste cable (Figuras 25 a 27), esto proporciona mayor inercia en el material y relaja la tensión de los esfuerzos que se generan en los brazos cuando se despliegan. En consecuencia, en los brazos principales se colocaron articulaciones para que los miembros de la cabecera interior del paraguas tuvieran la propiedad de plegar (Figuras 28 a 33), también se realizaron los detalles de las uniones con la membrana cerca de la frontera del poste cable, y en el poste central; este detalle en especial ayudará a que la membrana esté rígida pero a la vez flexible para no generar momentos en superficie (Reglamento de construcción del Distrito Federal - RCDF) (Morales, 2012, 2013, 2014, 2017).

Proceso constructivo del paraguas plegable

A fin de entender la construcción final de ese proyecto se realizará una recapitulación de todo lo generado anteriormente, por lo cual se puede observar que la aplicación de paraguas plegable invertido es viable para una aplicación real, en este caso de estudio se selecciona la cafetería de la Facultad de Arquitectura para izar este modelo. El primer paso fue la manufactura del poste principal con un acero A36 de 152 cm de perfil y 6 mm de cara interior; a este se le fabricó un pedestal de un tubo de acero de $6\frac{1}{2}$ " con placas de $\frac{1}{4}$ " a fin de armar el nodo deslizante del paraguas;



Figuras 10 a 13. El proceso de manufactura del prototipo se facilitó por la utilización del acero

Fuente: Morales (2012; 2016, fig. 21).



Figuras 14 a 17. Proceso constructivo del prototipo de paraguas plegable, este se desarrolló en la Facultad de Arquitectura de la UV.

Fuente: Morales (2012; 2016, fig. 22).

para hacer esto se efectuaron varias soldaduras en el detalle del poste en donde se colocaron los componentes que se articularon a los brazos, que posteriormente dieron la facilidad de plegarse a dichos miembros de la sombrilla. Después se fabricó la cumbre, compuesta de varias piezas de placas de 1/4", con conexiones múltiples que ayudaron a rigidizar el sistema principal. Siguiendo con dicha construcción, se realiza un primer montaje para verificar la rigidez del poste en el dado de concreto; este dado se recuperó de la cimentación de 1,20m de altura por 0,40m de ancho del proyecto anterior, el cual está sujeto a una placa metálica de 1/2" de espesor que sirve de base para el poste; la cimentación es de 0,80 x 0,80m, con un peralte de penetración de 15cm para evitar el efecto del volteo por cargas horizontales. Se colocaron refuerzos de cartón a los lados del poste para el efecto de pandeo por la presión del viento; asimismo, en la parte inferior se colocó un malacate al igual que en la cumbre del poste (Figuras 34 a 41).

Barras				
	Modelo experimental: 8,5 metros	Proyecto final: 15,5 metros	Ratio 1: modelo	Ratio 2: proyecto
2	Ø110-5_A36	Ø152-5_A36	1,27	1,05
6	Ø90-4_A36	Ø75-4_A36	1,04	,95
8	Ø90-4_A36	Ø75-4_A36	1,03	,97
10	Ø90-4_A36	Ø75-4_A36	0,59	0,39
11	Ø90-4_A36	Ø75-4_A36	0,65	0,58
12	Ø90-4_A36	Ø75-4_A36	1,01	,93
15	Ø90-4_A36	Ø75-4_A36	0,59	0,45
16	Ø90-4_A36	Ø75-4_A36	1,05	,99
22	Ø90-4_A36	Ø75-4_A36	0,68	0,52
23	Ø90-4_A36	Ø75-4_A36	0,5	0,47
25	Ø90-4_A36	Ø75-4_A36	0,62	0,39

Tabla 2. Resultado de resistencia de los miembros rígidos del sistema plegable de los dos proyectos

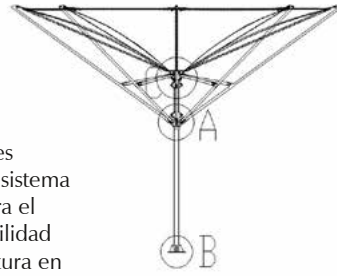
Fuente: Morales (2013).

Tracción máxima en la membrana				
Barra	Nudos	T/metro	kg/5cm	Ratio
56	120-135	1,07	73,5	0,90

Tracción en los cables de relinga			
Cable	T	Ratio	Barra
1	1.250	0,10	2,3 (18 mm) Galv
2	1.357	0,095	1,4 (18 mm) Galv
3	1.193	0,15	5,6,7,8 (18 mm) Galv

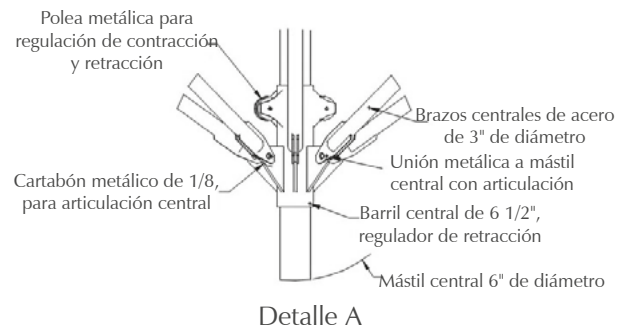
Tabla 3. Resultado de resistencia de la membrana, relingas y acostillamientos

Fuente: Morales (2013).



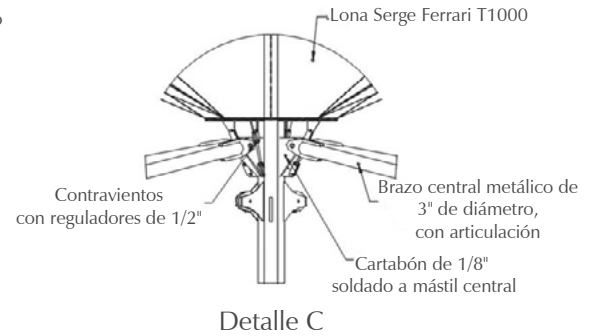
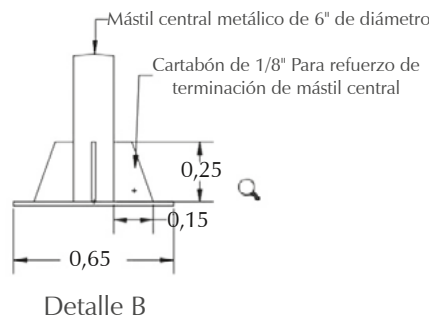
Figuras 18 y 19. Se desarrollaron los detalles constructivos de unión móvil del desplegado del sistema flexible, esta pieza es sumamente importante para el movimiento del paraguas, así como para la estabilidad de sus miembros, esta ayuda estabilizar la estructura en general

Fuente: Morales (2013).



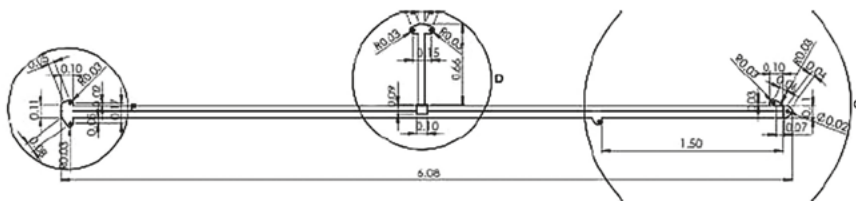
Figuras 20 y 21. Las uniones articuladas dentro de los miembros secundarios de la estructura contienen la forma final del paraguas, el detalle del soporte proporciona la rigidez adecuada del sistema

Fuente: Morales (2013).



Figuras 22 a 24. Las uniones articuladas que dan movimiento al sistema plegable del paraguas son las que detonan la forma final del sistema transformable y manifiestan la funcionalidad de la estructura en una etapa teórica del proyecto que permite que su construcción sea viable

Fuente: Morales (2013).



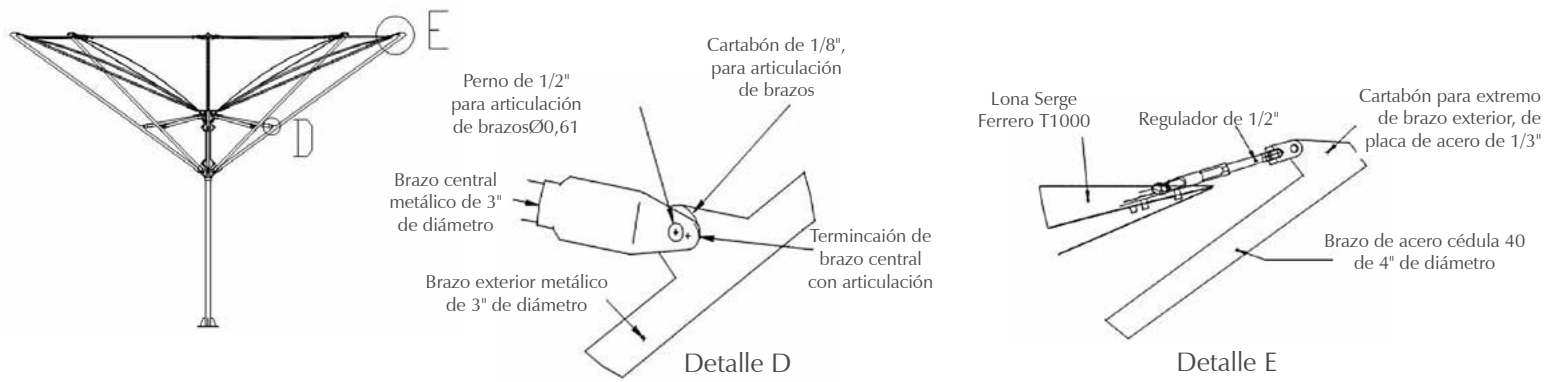
Figuras 25 a 27. El brazo de despliegue del paraguas constituyó una corrección muy importante para el proyecto final, ya que con esta configuración de poste cable que desarrollamos podíamos alcanzar dimensiones mayores a las obtenidas, en este caso solo 15,5 metros, pero en el análisis estructural hasta 50 metros de diámetro

Fuente: Morales (2013).



Después se manufacturaron los brazos de la sombrilla, los cuales serían postes cables que ayudarían a tener mayor inercia a los brazos para evitar un esfuerzo mayor a los postes; los brazos del paraguas se forman con los postes viga hechos con un tubo de 3" de diámetro y 5 mm de espesor; se realizó un refuerzo de PTR de 2 x 2" en la parte inferior del poste para evitar algún pandeo y plastificación del material por el esfuerzo que se genera a la hora de plegarse o desplegarse la estructura (Figuras 42 y 43). En esta fase se colocaron los cables de 12 mm de espesor en las uniones de sujeción de los postes para conformar la figura final del poste cable; en las uniones se instalaron reguladores de 1/2" para tensar el cable, y grilles de 3/8" para sujetar dichos reguladores.

En la fabricación de la membrana se realizaron uniones metálicas con placas de 1/4" de espesor y con tornillos de 12 mm de diámetro, dichas uniones fueron colocadas en las puntas de la membrana, estas se reforzaron con una lona de plástico para evitar el desgarramiento de la membrana que en este caso fue malla sombra; dentro de las fronteras de la membrana se colocaron cables de 14 mm de diámetro que sirvieron como relingas y se sujetaron a reguladores de 3/8" soldados en las



Figuras 28 a 30. Los detalles de las uniones del paraguas plegable ayudarán posteriormente al proceso de manufacturación; en este caso, los detalles de articulación del paraguas que sostendrá los postes vigas y los detalles de uniones de la membrana a dichos postes que ayudarán a tensar la membrana

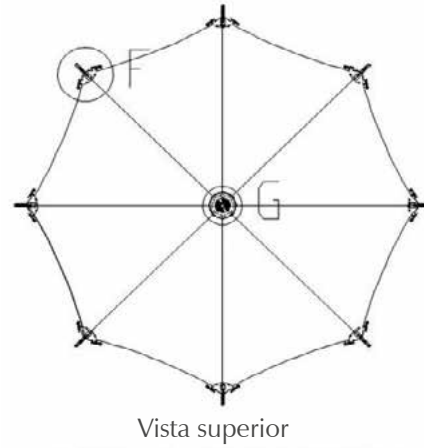
Fuente: Morales (2013).

uniones de las conexiones; se colocó una conexión octagonal con tornillos de 10mm con uniones articuladas que se sujetaron al poste central para articular la membrana para darle flexibilidad a la superficie (Figuras 44 a 48).

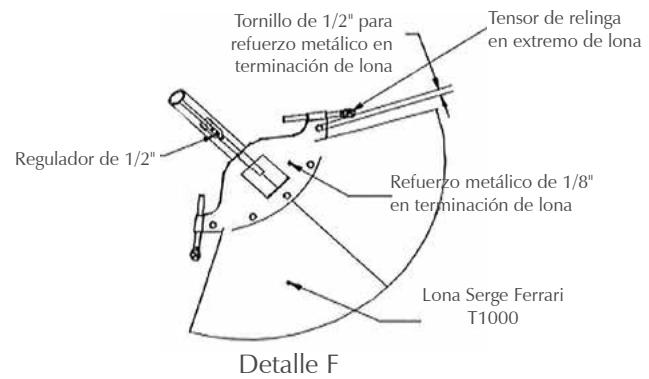
Posteriormente se preparó la estructura para el montaje de los miembros de esta al poste principal; se empezó con los brazos de anclaje del desplegado de la sombrilla, unidos a la cumbrera metálica del poste principal (Figuras 49 a la 52), ya colocados los ocho brazos se conectaron los postes viga, sujetos por medio de un tornillo y una tuerca de 1" de espesor, con ello se articula el poste para plegarse y llegar a una posición abierta a fin de tensar la membrana del paraguas. Una de las dificultades del proyecto fue este primer ensamble ya que la colocación de los postes cables era crítica y debían tener una exactitud de milímetros en cada brazo articulado; cada colocación se llevó aproximadamente de 15 a 20 minutos, por lo cual su supervisión fue esencial para que el armado de este paraguas fuese unido con éxito (Figuras 53 a 63), se utilizó la ayuda de dos andamios de 3 m de alto para colocar cada miembro y así obtener la estructura ya ensamblada.

Luego se ejecutó una prueba de movilidad sin la membrana, esto para probar que los malacates se hubieran puesto en la cumbrera y en el pedestal del nodo plegable; la demostración ayudó a probar que los brazos resistirían el esfuerzo del movimiento y verificar la movilidad del desplegado, esta primera prueba también sirvió para examinar si el movimiento no producía una sobretensión en los miembros estructurales (Figuras 64 a 66); la prueba fue un éxito y no hubo ninguna deformación en la estructura, esta se mantuvo en buen estado en todo el sistema estructural y no causó ninguna plastificación en las placas de unión de las conexiones articuladas.

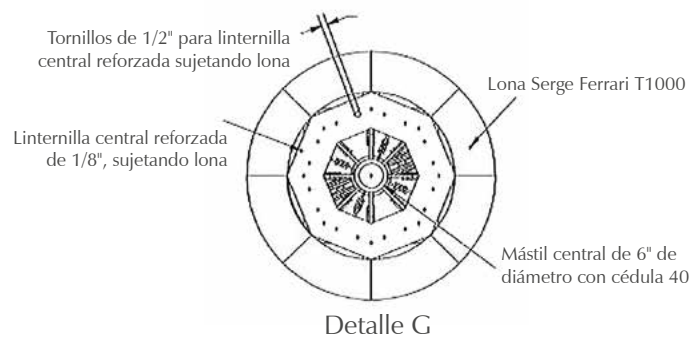
En consecuencia se pasó a poner la membrana en los ocho puntos de los brazos del paraguas, para lo cual se ubicaron dos andamios a una altura de 9 metros cada uno, estos ayudaron a que el personal de trabajo hiciera el montaje de los ocho grilletes y ocho reguladores de 1/2"; en cada conexión de la frontera del brazo del paraguas se colocaron las uniones metáli-



Vista superior



Detalle F



Detalle G

Figuras 31 a 33. Los detalles constructivos de las uniones de la membrana a la estructura facilitan la fabricación y el estandarizado de las conexiones para su armado en el sitio, lo que aumenta la velocidad de construcción de la sombrilla plegable
Fuente: Morales (2013).

cas reguladas con la membrana; las religas y los acostillamientos ya estaban pretensados, esto hizo que el desplegado fuese más fácil en un segundo momento; al mismo tiempo, se colocó la conexión central de la membrana a los cuatro reguladores del poste central (Figuras 67 a 72) (Morales, 2012, 2013, 2014).

Figuras 34 a 41. La fabricación del poste central, con su nodo deslizante y su cumbrera, facilitó que el proceso de armado posterior fuese más rápido; en esta fase su montaje fue relativamente veloz gracias a que se reutilizó la zapata anterior del proyecto experimental
Fuente: Morales (2013).



Figuras 42 y 43. La fabricación del poste-viga se realizó bajo la configuración del detalle constructivo y el análisis estructural previo, el cual ayudó a generar una crítica conceptual estructural de triangular el esfuerzo por medio de un cable y un poste central, alejando su centro de masa y ganando mayor inercia
Fuente: Morales (2013).



Proceso de despliegue del paraguas

A continuación se realizó la prueba de despliegado con la membrana en dos fases, con ello se pretendía comprobar si el poste principal soportaría la fatiga de desplazamiento de los brazos plegables; la primera prueba fue para verificar si las uniones de la membrana estaban conectadas correctamente a las uniones del paraguas (Figuras 73 a 78). En la primera fase se realizó el despliegado de los malacates con mucha lentitud para ver si los reguladores estaban correctamente fijados y abiertos, esto para que el despliegue funcionara adecuadamente y la membrana se tensara y así se generara la forma final; se observó que hubo errores en los reguladores y estos no se abrieron totalmente, por ende, no se pudo abrir toda la membrana, esto ocasionó que la membrana se abultara y no se generara la forma.

En la segunda fase del despliegue, que se realizó ya con la membrana, se abrieron completamente los reguladores para que esta pudiera abrirse de forma adecuada (Figuras 79 a 87), las uniones tensaron la malla sombra generada en el programa de simulación de WinTess, y se formó la curva que da rigidez a los acostillamientos interiores para estabilizar la estructura correctamente, los brazos del paraguas también quedaron tensados gracias a los cables que forman la figura triangular de los postes cables (Morales, 2012, 2013, 2014, 2015).

Discusión

En la actualidad, el estudio de sistemas transformables y su construcción en la arquitectura se basa principalmente en la experimentación. Esto se puede apreciar en el caso de la modelación para verificar la movilidad, la cual se basó en la modelación y verificación por medio de *software*, el cual fue una gran ayuda para realizar el proyecto final; esto da como resultado un sistema estructural



Figuras 44 a 48. La fabricación de las uniones del paraguas transformable ayudó a que se estandarizaran las conexiones de la membrana, esto gracias al previo detalle de los planos constructivos y a la experiencia de los modelos anteriores

Fuente: Morales (2013).



configurable a su entorno, con la capacidad de transformar su forma dentro del espacio arquitectónico. Su principio de diseño versó sobre cómo desarrollar un sistema plegable con conexiones articuladas, el cual lograra enlazar mecanismos móviles y resistentes.

Esta investigación se justificó en la línea de tiempo y las tecnologías actuales. Este estudio metodológico mejora el sistema que se empleó en el proyecto, pero con una tecnología más adecuada a la región; vale la pena mencionar que son pocas las instituciones que generan trabajos de praxis que lleguen a la materialización de un sistema transformable, para mencionar uno de ellos: el doctor Juan Gerardo Salinas, encargado del laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional Autónoma de México, y el doctor José Ignacio Llorens Durán, son de los pocos académicos que incluyen a los estudiantes en la rea-

lización de modelos de cubiertas ligeras; esta inclusión de alumnos al proyecto crea una gama nueva de estudiantes con mayor conocimiento en la construcción de este tipo de estructuras.

Luego de la investigación se generaron hipótesis que ayudaron a realizar un prototipo final de sistema transformable, esto fue un factor muy significativo para una aproximación conceptual, porque sus aportes teórico-prácticos sirvieron para realizar la transición geométrica del proyecto, esto ayudó a construir un sistema transformable, con el desarrollo de diferentes hipótesis de proceso modelístico, se compararon con modelos aproximados de construcción, lo cual sirvió para la estructura final.

Todo esto deja diferentes líneas de investigación paralelas para abordar y generar más conocimiento práctico-teórico, pero en esta investigación solo se desarrolla la simulación estructural para

Figuras 49 a 52. Primero se colocaron los postes centrales de la cumbrera superior, estos ayudan a sostener y plegar a los brazos principales que tensan la membrana del paraguas

Fuente: Morales (2013).



Figuras 53 a 63. Posteriormente se conectan los postes cables a los miembros centrales que articulan el movimiento del sistema transformable, cada conexión se hace en simetría para compensar el peso de la estructura
Fuente: Morales (2013).

Figuras 64 a 66. Se realizó una prueba de movilidad de los brazos principales sin membrana, esto para probar la resistencia de los malacates y la velocidad en la cual se debería tener la resistencia adecuada a la hora de desplegar el sistema transformable
Fuente: Morales (2013).



realizar una comparativa del anterior prototipo, ajustando el mejoramiento óptimo del diseño, ya que, dependiendo del tipo de uso que se le brinde al espacio arquitectónico se colocarán la solicitaciones de carga de servicio a la estructura que, en este caso, se maneja para uso institucional, aunque la estructura puede cumplir otras funciones.

En cuanto a las aplicaciones arquitectónicas de esta investigación, que se reflejaron en la realización de la estructura, se encontraron opciones constructivas debido la carencia de herramientas especiales y costo del material, pero el elaborar la estructura ayudó a desarrollar preparaciones desconocidas en la práctica, una de ellas fue el proceso de montaje manual, sin herramientas especializadas y con andamios, lo cual generó premisas y alternativas para construir las conexiones finales con mucha más sencillez y menos complejas; también se consideró la tenso-estructura desde un principio, para saber de antemano las tensiones reales que iban a interactuar en el diseño de esta estructura plegable, así como para verificar otras normas y materiales que pudieran mejorar el proceso de la construcción. Por último, este modelo deja claro que la aplicación de este tipo de sistemas plegables puede ser una alternativa constructiva para la región norte de Veracruz para espacios urbanos y arquitectónicos, ya que son relativamente fáciles de montar en sitio.



Figuras 67 a 72. Posteriormente se colocó la membrana pretensada al paraguas, con ayuda de dos andamios armados de 9 m, en cada conexión se colocó un regulador y un grillete de 1/2", que sirve de articulación flexible a la hora del despliegue
Fuente: Morales (2013).



Figuras 73 a 78. Se realizó el primer despliegue del paraguas plegable con membrana; este primer intento falló porque los reguladores estaban semiabiertos y esto impidió que la membrana se tensara completamente
Fuente: Morales (2013).



Figuras 79 a 87. Se realizó el segundo despliegue del paraguas plegable con membrana; en este segundo intento los reguladores estaban abiertos y esto ayudó a que la membrana se tensara completamente y el proyecto fuera un éxito
Fuente: Morales (2013).



Conclusiones

Este proyecto de investigación se basó desde el principio en la metodología de diseño del arquitecto Emilio Pérez Piñero y el doctor Felix Escrig, ya que ellos desarrollaron geometrías estandarizadas que ayudaron a generar sistemas transformables más fáciles de manufacturar para construir espacios arquitectónicos más eficientes y rápidos de montar en sitio.

A fin de desarrollar la geometrización de modelos transformables se utilizó la simulación de los *software* para realizar análisis de segundo orden, ya que este tipo de estructuras puede ubicarse dentro del campo de las estructuras transformables, dado que requieren de mecanismos en las uniones articuladas para materializar su movilidad y pueden retornar a su estado inicial. Finalmente, con los parámetros necesarios se tendrá un planteamiento para proponer y definir aproximaciones o resultados de los estudios previos bajo el análisis comparativo de prototipos, con el objetivo de demostrar la viabilidad de la propuesta y, a la vez, experimentar con diferentes materiales con modelos a escala, cuya finalidad es seleccionar el que se utilizará. Para ello, se realizó una comparación entre el prototipo a escala real construido con un método puramente artesanal, pero analizado con el rigor científico que sustenta su resistencia y equilibrio en

el espacio y, con ello, se cotejan aspectos tales como los constructivos y sus reacciones, una vez que la cubierta está completamente desplegada.

Los alcances de estas comparaciones ayudaron a adquirir experiencia y conocimiento en la manufactura de los miembros estructurales del modelo; de igual manera para la aplicación de sistemas como las vigas tensadas que se colocaron debajo del brazo del paraguas retráctil. Esta aplicación ayudó en gran medida a bajar el peso del sistema plegable, y a que se pudiera realizar el plegado de la estructura con un malacate, ya que dicho modelo se realiza en acero. También la práctica ayudó a resolver cómo incluir este tipo de proyectos en el espacio arquitectónico. Por último, el proyecto aportó a la generación de nuevo conocimiento para los estudiantes de licenciatura y posgrado que serán los profesionales que propondrán dichos sistemas en su vida profesional; asimismo, dicha investigación sirvió para generar una posterior vinculación con el ayuntamiento de la Ciudad de Poza Rica, el cual realizará un proyecto arquitectónico de tenso-estructuras y estructuras transformables en el parque Cuauhtémoc de dicha ciudad. Este proyecto construido servirá para incentivar a arquitectos y responsables de desarrollo urbano a fin de generar proyectos con este tipo de sistemas (Morales, 2009, 2012, 2016).

Referencias

- Buckminster Fuller, R. (1963). *Nine Chains to the Moon*. Carbondale: Southern Illinois University Press.
- Escrig Pallares, F. E. y Valcarel, J. P. (2012). *Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Morales-Guzmán, C. C. (2009). *Diseño de sistemas estructurales flexibles en el espacio arquitectónico*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.
- Morales-Guzmán, C. C. (2012a). *Diseño de sistemas flexibles en el espacio Arquitectónico*. Madrid: Editorial Academia Española.
- Morales-Guzmán, C. C. (2012b). Diseño de una cubierta retráctil tensada. Actividad Posdoctoral. Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Morales-Guzmán, C. C. (2013). *Informe técnico: sistemas estructurales retráctiles*. Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Morales-Guzmán, C. C. (2013a). Mejoramiento del diseño de una cubierta plegable tensada. Actividad Posdoctoral. Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Morales-Guzmán, C. C. (2013b). *Prototipo: diseño de una cubierta retráctil tensada*. Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Morales-Guzmán, C. C. (2013c). Prototipo de diseño de una cubierta retráctil tensada. *Revista de Arquitectura*, 15(1), 102-110. doi: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2013.15.1.11>
- Morales-Guzmán, C. C. (2014a). *E.E. Diseño Arquitectónico: Detalles*. Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Morales-Guzmán, C. C. (2014b). Construcción de un paraguas transformable tensado. Ponencia en el II Congreso Internacional de Ingeniería Civil, La Habana, Cuba.
- Morales-Guzmán, C. C. (2015). *Arquitectura e ingeniería transformable*. Estancia Posdoctoral. Sevilla, Universidad de Sevilla.
- Morales-Guzmán, C. C. (2016). Construcción experimental de un sistema transformable tensado plegable. *Revista de Arquitectura*, 18(1), 98-110. doi: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2016.18.1.9>
- Morales-Guzmán, C. C. y Rivera Torres, H. (2017). Experiencias y casos de estudio: construcción de una cubierta hiperbólica tensada para espacios tropicales. En Pesantez, G. y Flores, W. (comps.). *Arquitectura: experiencias y propuestas para la ciudad* (pp. 177-192). Guayaquil: Centro de Investigaciones y Desarrollo de Ecuador.
- Reglamento de construcción del Distrito Federal (RCDF). Recuperado de: http://www.fimevic.df.gob.mx/documentos/transparencia/reglamento_local/RCDF.pdf
- Rodríguez Gonzales, N. (2005). *Diseño de una estructura transformable por deformación de una malla plana en su aplicación a un refugio de rápido montaje*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93438>
- Sastre, R. *WinTess* (Versión 3.1) [Software computacional]. Barcelona: Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Segui, W. (2000). Diseño de estructuras de acero con LRFD. México: Thomson. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/253987220/Diseno-de-Estructuras-de-Acero-Con-Lrfd-Segui>