

Diseños de nodos articulados experimentales para sistemas de cubiertas plegables

Experimental Articulated Node Designs for Folding Roof Systems

Carlos César Morales-Guzmán

Universidad Veracruzana, Poza Rica, Veracruz (México)

Facultad de Arquitectura

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).
Candidato a doctor en Estructuras de la Edificación, Universidad Politécnica de Madrid (España).
Posdoctorado en Arquitectura Tensada, Universidad Politécnica de Catalunya (España).
Posdoctorado en Ingeniería y Arquitectura Transformable, Universidad de Sevilla (España).
Investigador-académico en la Universidad Veracruzana, Facultad de Arquitectura.
 <http://orcid.org/0000-0002-4499-6968>
 dr.arqmorales@gmail.com / carlmorales@uv.mx

Morales-Guzmán, C. C. (2021). Diseños de nodos articulados experimentales para sistemas de cubiertas plegables. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 24(1), 106-114. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.1.4188>



doi.org/10.14718/RevArq.2022.24-1.4188

Resumen

La presente investigación se centra en el diseño de un nodo articulado, basado en el ensayo del doctor Félix Escrig, quien brindó los conceptos constructivos para generar una propuesta que tiene como objetivo desarrollar sistemas plegables más rápidos, por lo cual se construyó una serie de prototipos que verifiquen y validen los diferentes alcances constructivos que podrían llegar a generar un sistema estructural transformable. Esto justificó la simulación de los modelos con el *software* Solid Work, el cual validó dichas conexiones estructurales plegables, y nos ayudó a verificar los modelos constructivos, lo que es el propósito de esta investigación. En consecuencia, dichas propuestas se abordaron con la finalidad de diseñar los detalles industriales de conexión por medio de *Computer-aided-Design* (CAD), ya que el *software* en su paquetería tiene la capacidad para desarrollar prototipados experimentales y realizar los detalles con mejores resultados para las conexiones constructivas, y seguir así una fase industrial más óptima para los modelos.

Palabras clave: arquitectura transformable; construcción experimental; construcción industrial; cubiertas plegables; simulaciones estructurales

Abstract

The present research focuses on the design of an articulated node, based on the constructive test of Dr. Félix Escrig, who provided the constructive concepts to generate a proposal that aims to develop faster-folding systems, for which a series of prototypes were built to verify and validate the different constructive scopes that could generate a transformable structural system. This justified the simulation of the models with Solid Work software that validated said folding structures and helped us to verify the construction models, which validated such foldable structural connections and helped us to verify the constructive models, which is the purpose of this research. Consequently, such proposals were approached with the purpose of designing the industrial connection details by means of *Cad Computer-aided-Design* (CAD), since the software in its package has the capacity to develop experimental prototypes and perform the details with better results for the constructive connections and thus follow a more optimal industrial phase for the models.

Keywords: experimental construction; folding roofs; industrial construction; structural simulations; transformable architecture

Recibido: agosto 11 / 2021

Evaluated: agosto 17 / 2021

Aceptado: octubre 4 / 2021

Introducción

La presente investigación muestra una de las fases experimentales que se desarrollaron para el tema de las cubiertas plegables, donde se generaron modelos constructivos que ayudarán a generar un sistema transformable para espacios itinerantes o emergentes, por lo que las nuevas tecnologías ayudarán a crear esta arquitectura cambiante y caduca que hay en la actualidad, por lo que es una prioridad en nuestro presente trabajo el diseño de espacios emergentes. El siguiente estudio se basó en los sistemas plegables, cuya característica primordial es el diseño de una conexión constructiva óptima para poder manufacturar; el método en el que se realizó dicha tesis se basa en las investigaciones del doctor Félix Escrig (figura 1), ya que él desarrolló un sistema plegable simple, que responde de manera más efectiva a los constantes cambios de uso. También desarrolló un esquema de tipologías de uniones en el cual nos basamos para crear un sistema plegable en nuestras propuestas experimentales (Escrig, 1984, pp. 35-46; 1988, pp. 53-71).

Por lo tanto, la tecnología constructiva de los materiales forma parte primordial del desarrollo de esta investigación sobre un sistema transformable. Para poder crear uno de esos sistemas, se necesita tomar en cuenta los parámetros experimentales conceptuales que tenemos referenciados para poder generar dicho dispositivo, y una parte importante del presente estudio serán las conexiones de las uniones. Este desarrollo lo veremos en dos fases: 1) la de *simulación estructural y diseño de los modelos*, donde desarrollaremos la conexión de la estructura y realizaremos la simulación estructural de los modelos experimentales que pueden ser estables. Posteriormente, se formará un criterio constructivo para el diseño final del sistema plegable, y por último vendrá 2) la fase de *construcción del prototipado*, durante la cual se generarán los modelos constructivos que puedan darnos una aproximación final del nodo articulado de nuestra investigación; por consiguiente, modelaremos nodos aproximados de dichos sistemas plegables (Becker, 1995).



Figura 1. Proyecto de una cubierta desplegable de aspas para cubrir una piscina unifamiliar 11 × 7 m. Sevilla, España.

Fuente: Escrig (2012); Sánchez (1992).

Tipo de nodo	Gráfico	Condiciones
Por rotación de la barra		Pueden llegar al nodo varias barras
Abisagrado		
Atornillado de pasador		Las holguras son necesarias para el movimiento
Por rodamiento		

Para comenzar a desarrollar los sistemas plegables, primeramente clasificamos la variedad de los tipos de nodos que podemos realizar para un sistema estructural plegable. Esta tipología se desarrollará bajo los principios reglamentados en las estructuras de acero; se eligió este material por su fácil manipulación y su resistencia: esto nos ayudó a comprender y simplificar el método de análisis constructivo de dicha cubierta, y nos dio parámetros para desarrollar un prototipo a escala adecuada para simular sus ventajas y sus desventajas, así como para estudiar y analizar su comportamiento estructural y poder detectar si la geometría propuesta es la conveniente para la elaboración del proceso constructivo (Berger, 1996).

En consecuencia con lo anterior, se delimitó el estudio a la búsqueda de una unión, por lo que se diseñaron los detalles correspondientes para la estructura, lo cual se realizó en la etapa experimental de nuestra investigación, por lo que nuestra primera premisa tuvo que ver con los mecanismos en las uniones para realizar el proceso de pliegue, despliegue, cerrado o deformado. En la tabla 1 se intenta resumir los tipos de conexiones encontrados en la bibliografía de Félix Escrig. Las dos primeras uniones que se observan son por rotación y abisagrado. Estas

primeras soluciones simples pueden estar ubicadas en el centro de la barra o en sus extremos. Los dos últimos casos son los enlaces de pasador y por rodamiento, que suelen ser más complejos; además de rotar la barra que une los enlaces, cambia las posiciones del desplegado de toda la estructura. Las holguras, una característica importante en estas conexiones, son un requerimiento importante para permitir el paso de la barra por sus diferentes etapas. Sobre este aspecto profundizaremos en la etapa de diseño de los modelos (Escrig, 2012; Morales, 2012; Morales, 2016a).

Metodología

Para nuestro ensayo experimental se propone una estructura de 25 m de envergadura, por 12,5 m de alto y 27 m de largo, como se muestra en la figura 2, por lo que se determina una simulación estructural del proyecto de investigación con unas cargas normadas en el manual de construcción del Distrito Federal de México, por lo que se eligieron las cargas recomendadas en dicha norma para cubiertas no transitables. Dichos parámetros de carga son: 1) carga muerta, 30 kg/m²; 2) carga viva máxima, 40 kg/m², y 3) carga viva accidental, 20 kg/m². En la tabla 2 se desglosa la combinación de cargas que se

Tabla 1. Tipología de las uniones para estructuras transformables.

Nota: se pueden observar los esquemas constructivos de la tesis del Dr. Escrig, donde se nota el desarrollo de movimientos que pueden llegar a tener las conexiones.

Fuente: Escrig (2012); Morales (2016a).

tendrá en la simulación estructural de la estructura, y que afecta solo a las cubiertas no transitables (McCormac, 2000, pp. 39-60).

Para desarrollar nuestro diseño experimental en los nodos, proponemos miembros estructurales de acero tubular A36 de 100 mm de perfil y un espesor de 6 mm. Se selecciona la combinación primaria para desarrollar este ensayo, el cual nos genera la bajada de carga general presentada en la tabla 3. También se propone en dicho experimento una membrana textil de la marca Serge Ferrari, la cual nos ayudará a determinar la carga final que tendrá dicha cubierta integrada a la estructura plegable. Uno de los factores importantes a la hora de elegir el mencionado material textil es por el comportamiento del material y su ligereza. El requisito necesario y de mayor importancia para que una membrana textil funcione como un componente estructural viable reside en generar formas que favorezcan su resistencia estructural a la tracción, que es la principal propiedad que debe tener una membrana textil para resistir las cargas que recibirá la cubierta.

Con base en lo planteado, pasamos a la premisa por modelación constructiva. Esto nos llevará a la realización de prototipos para verificar la factibilidad constructiva de nuestro nodo experimental y proponer un diseño factible de una cubierta plegable. El material que se utilizó para el diseño del nodo será de acero A36, con una densidad de 7850 kg/m³, y coeficiente de Poisson¹ de .26. En este caso, para el diseño de

1 El coeficiente de Poisson es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo del material.

Figura 2. Geometría básica de la cubierta plegable.

Fuente: elaboración propia (2012).

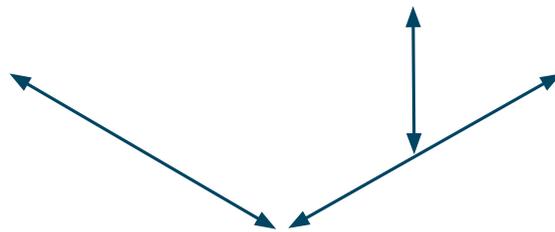


Tabla 2. Combinación de cargas por el Reglamento de Construcción del D. F.

Nota: se observan las combinaciones que se colocarán dentro de la cubierta plegable de la investigación.

Fuente: elaboración propia

Primera combinación gravitatoria:	(CM (1,4) + CVM (1,7))
Segunda combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) + SISX (1,1) + SISX (,33))
Tercera combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) + SISX (1,1) - SISX (,33))
Cuarta combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) - SISX (1,1) + SISX (,33))
Quinta combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) - SISX (1,1) - SISX (,33))
Sexta combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) + SISZ (,33) + SISZ (1,1))
Séptima combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) + SISZ (,33) - SISZ (1,1))
Octava combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) - SISZ (,33) + SISZ (1,1))
Novena combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) - SISZ (,33) - SISZ (1,1))
Décima combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) + VX (1,1))
Decimoprimera combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) - VX (1,1))
Decimosegunda combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) + VZ (1,1))
Decimotercera combinación:	(CM (1,1) + CVA (1,1) - VZ (1,1))

la conexión se utilizó el programa Solid Works²; el programa contiene una paquetería de cálculo por elemento finito³, que es necesaria hacer para el desarrollo efectivo de las conexiones. Como el reglamento de construcción del DF no indica cómo realizar las conexiones de seguridad, en este ejemplo se realizan por medio de los parámetros establecidos por el manual del LRFD (Load and Resistance Factor Design) (Broto, 2006).

De igual manera, el reglamento menciona que en caso de no haber información, cabe remitirse a los manuales guía. En este caso, nos remitimos a su factor de seguridad de la unidad (1,20), de acuerdo con el LRFD. Con esto se verificará que el nodo modelado no vaya a afectar la seguridad íntegra de la estructura, y en este caso el manual indica que se deben revisar la tensión de la pieza y la deformación dentro de ella. En cuanto a su tensión, esta no debe de rebasar un F_y : 250 000 000,00 N/m². Los criterios de tensión serán establecidos por la teoría de Von Mises⁴, que arrojará la tensión-deformación, lo cual verificará que no se deforme más de 50 mm en ambas direcciones, que es la tolerancia marcada por la norma (Chilton, 2000).

Primeras propuestas constructivas experimentales

Para nuestra primera propuesta diseñamos un nodo. Este es de una figura muy básica para no complicar la construcción del prototipo, tal cual se observa en la figura 3. Este modelo está diseñado con un tubo de 89 mm de espesor y placas

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_Poisson

2 Solid Works es un programa que realiza modelados industriales en 3D. Fuente: <http://www.solidservicios.com/>. Consultado 2009-2018

3 El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales. Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/_elementos_finitos

4 La tensión de Von Mises y el criterio de fallo elástico asociado a un material dúctil que sufría fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebasaba cierto valor. Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Tensi%C3%B3n_de_Von_Mises

Combinación de carga: CM (1,4) + CVA (1,7)

Sobrecarga = 20 kg/m² + Carga accidental: 40 kg/m²

Tipo de edificio = Abierto (3) > Sin c = 0

Peso de los cables = 780,8 kg

Peso de los tubos = 70989,1 kg

Peso de la membrana = 1464,4 kg (1394,70 m²)

Tabla 3. Combinación seleccionada para calcular y desarrollar la propuesta experimental.

Fuente: elaboración propia.

Nota: en la tabla se ven reflejadas las primeras combinaciones y las bajadas de carga del proyecto.

de acero de $\frac{1}{2}$, para que resista las tensiones adecuadas a los miembros que se conectarán en sus respectivas caras de los nodos. Se simplifica solo en un modelo de conexión, porque se realizará solo un módulo de la cubierta, para verificar su manufactura y su adecuación geométrica.

Una vez concluido el modelo, se le aplican las fuerzas que actuarán en él, como se muestra en la figura 5; en este caso, un axil multiplicado a la carga combinatoria propuesta. Con ello mencionado, se define en el programa Solid Work la malla tipo triangular que se utilizará en el cálculo del elemento finito, con una carga: Axil, -16 009 toneladas; Carga en Z: 0,007 toneladas; Carga en Y: -0,005 toneladas; Carga en X: 0,032 toneladas (las cargas en las coordenadas X, Y y Z son los pesos de los miembros que se conectarán en el nodo).

Colocadas las cargas teóricamente en el nodo, se procede a analizar esta hipótesis. Después se procede a ejecutar el análisis que obtuvimos: el primer resultado, que son las tensiones, como se muestra en la figura 4; en ella se observa que el límite de tensión en el nodo no sobrepasa el límite elástico: esta tiene apenas 13 885 588 N/m², y el límite elástico es de 250 000 000 N/m².

Continuando con los resultados analizados en el nodo, se descubre que las deformaciones y los desplazamientos internos son pequeños; la deformación, de acuerdo con el reglamento, es, por seguridad, de 50 mm. Con esto indicado, se puede observar en la figura 5 cómo la deformación es de ,0037 mm. El caso es obvio, ya que en el análisis solo existe un sólido, que es el nodo; y como no tiene contactos de accesorios, no se tienen desplazamientos significativos (Morales 2013a; 2013b; 2014).

Construcción del primer prototipo

Posteriormente se realiza la manufactura del nodo, como se determinó en el modelado y la simulación estructural. A continuación hace un primer aplicado de pintura anticorrosiva, para que el nodo aguante la intemperie; así, se realiza el ensamble de las uniones y se construye un cimiento provisional, para montar este primer prototipo. Continuando con este proceso de montaje del prototipo, se armó solo el primer arco de la geometría propuesta, a una escala 1.1; el método constructivo que se usó fue por armado de conexiones rígidas. Uno de los principales problemas encontrados en el montaje de dicha estructura fue la falta del presupuesto, que no dio oportunidad de fijar todas las tijeretas ni los nodos de la cubierta; en consecuencia, no se la pudo desplegar, por su gran tamaño. Por todo ello se prefirió armar como piezas espaciales; aun así, se evitó utilizar una grúa (lo que era deseable para su armado final). Además de surgir imprevistos, al no estar arriostrada la parte de inferior de la estructura, esta empezó a preflexarse en sus extremos y con tendencia a abrirse. En respuesta a ello, se arriostró con cables, para lograr un prisma perfec-

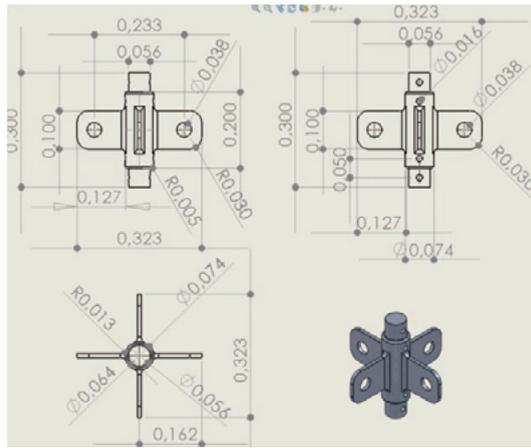


Figura 3. Esquema y medidas del modelo tentativo para manufacturar el nodo de la cubierta retráctil.

Fuente: elaboración propia.

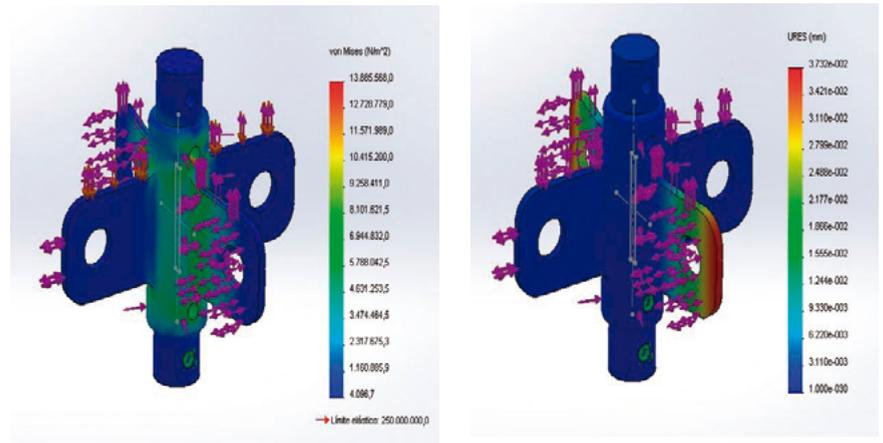


Figura 4. Las tensiones encontradas en el modelo. Nota: estas tensiones nos permiten tener un parámetro de seguridad estructural para la construcción del prototipo de la cubierta.

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Deformaciones relativamente aceptables para la manufactura del nodo.

Fuente: elaboración propia.

to, lo que ayudará a sostener la estructura en el proceso de izaje a una altura algo considerable, para poder armarla solo por andamiaje, tal cual se ve en la figura 6.

Con la experiencia obtenida al realizar el prototipo a escala real, surgieron tres cosas sobre las cuales reflexionar. La primera es que los nodos y los miembros son demasiado pesados para poder hacer maniobras constructivas más rápidas; dado que es un sistema transformable, debería ser de rápida construcción. La segunda es que el diseño del nodo debe cambiar, porque hubo problemas de excentricidad en las uniones conectadas. Por último, no hubo plastificaciones, pero no todas las caras de la estructura quedaron exactas, la colocación de la velaria es importante para el arriostramiento de la parte inferior, lo cual resolvería una de las preguntas iniciales, la colocación de la velaria en la parte inferior haría que la membrana estructural arriostrara el diafragma debajo del sistema plegable. Estas recomendaciones deben atenderse para poder dar una mejor aplicación tecnológica constructiva (Morales, 2013a; 2013b).

Ventajas

La propuesta tiene la ventaja de construirse con muy poca inversión financiera en la región, ya que la geometría del nodo propuesto es fácil de configurar y construir en cualquier taller de estructuras metálicas se pudiera construir. El material que constituye el nodo es fácil de encontrar, y a la hora de armarse este, es fácil colocar las piezas, ya que estas se pueden corregir por las perforaciones con margen de error, para que las placas de conexión puedan entrar en su sitio.



► Figura 6. (1-15). Primera propuesta Constructiva. Nota: la propuesta se realiza para formar el arco de la cubierta plegable. Este contará con ocho módulos conectados para comprobar fallas geométricas y constructivas del mismo sistema. Fuente: Morales (2012).

Desventajas

Una de las desventajas de la propuesta planteada es el diseño mismo del nodo: este no mantiene la excentricidad de los esfuerzos, al estar armados con placas tienden al pandeo. De igual forma, los miembros pueden llegar a pfectarse, como llegó a suceder en el modelo escala 1:1, tan solo por su propio peso, lo cual nos ayudó a contemplar parámetros de reconfiguración de la siguiente propuesta experimental (Morales, 2013a; 2013b; 2017).

Segunda propuesta constructiva experimental

Por último, se presenta una propuesta constructiva de nodo, y se toma el mismo valor desarrollado anteriormente; esto último, para entrar de lleno a la comprobación de la resistencia por simulación de los nodos y los accesorios que se colocan en las uniones de la cubierta plegable. Para este caso, el nodo y los accesorios se componen de una figura cilíndrica muy básica, y se la simplificó en un nodo estandarizado con un diámetro de 100 mm, con aberturas enroscables de 1", donde se alojan las conexiones de los accesorios que unirán a los miembros de la

cubierta plegable; estos ayudarán a resistir las tensiones adecuadas a los miembros, que se conectarán en sus respectivas caras de los nodos, como se muestra en la figura 7.

El siguiente paso fue la comprobación por simulación estructural por elemento finito, (FEM), con una malla tipo triangular de cada accesorio del modelo, por lo cual se describen las cargas más desfavorables que se obtuvieron anteriormente comprobando su resistencia ante los esfuerzos y las deformaciones que causan dichas cargas aplicadas. Se realizó el cálculo de la siguiente manera: con una carga axil, -16 009 toneladas; con una carga en Z, 0,007 toneladas; con una carga en Y, -0,005 toneladas, y con una carga en X, 0,032 toneladas.

Posteriormente se procedió a ejecutar el análisis, y se obtuvo el primer resultado, que son las tensiones. En la figura 8 se puede observar que el límite de tensión en el nodo no sobrepasa el límite elástico: esta tiene apenas 22 730 000 N/m², y el límite elástico es de 250 000 000 N/m². Por tal motivo, el diseño del nodo, tal como está, no tiene ningún problema, según se aprecia en la figura 9 (Morales, 2016a).



4



5



6



10



11



12



15

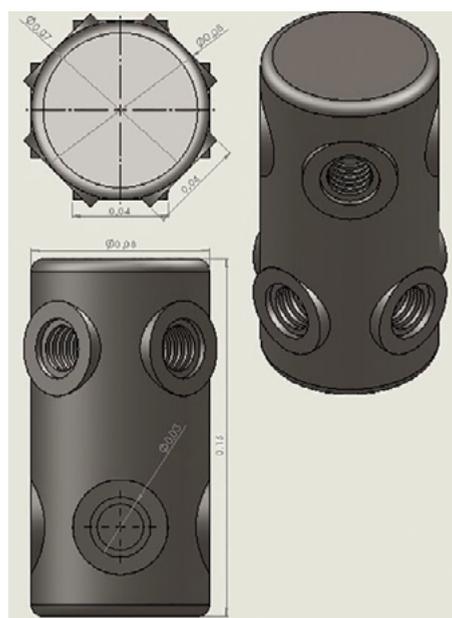


Figura 7. Esquema y medidas del modelo tentativo para manufacturar el nodo estándar de la cubierta retráctil.

Fuente: elaboración propia

Continuando con los resultados analizados del nodo, se obtienen las deformaciones internas, las cuales son pequeñas, ya que las deformaciones dadas por seguridad en la reglamentación de RCDF en México y el LRFD son de 50 mm. Con esto indicado, se observa en la figura 8 que los desplazamientos son de .00756 mm. Ya que en el análisis solo existe un sólido, que es el nodo, y como este no tiene contactos con los accesorios, no se tienen desplazamientos tan grandes, como se aprecia en la figura 9 (Morales, 2016b).

Resultados

Para verificar y rectificar la conexión descrita, se realizó un prototipo, el cual concretó la cubierta final de nuestra investigación.

Seguidamente, se describe el método de construcción, en los términos de lo desarrollado en el libro *Arquitectura: experiencias y propuestas para la ciudad Guayaquil*:

[...] se mejora el modelo y se ajusta a la geometría plegable de la cubierta, este caso se realizará un empaquetado plegable de toda la cubierta, para que solo sean un tipo de nodo, el que se realice y se estandarice constructivamente en una propuesta final, teniendo en

cuenta los modelos a de unión de cada parte de la estructura. En base a este modelo, se verificará su manufactura. Para ello, se trabajó el modelo con tubo galvanizado, que es fácil de manufacturar y realizar los cortes para dicho prototipo experimental. (Morales, 2017)

Para el desarrollo de la cubierta plegable, esta se realizó a escala (1:4), con material a base de acero galvanizado. Posteriormente, se realizó la construcción de la cubierta plegable, que se describe en la tabla 4, donde se proporcionan la función y el material con que se realizaron. Cada elemento que compone la cubierta transformable tiene la función de estabilizar el sistema plegable de la estructura (Morales, 2017, pp. 177-192).

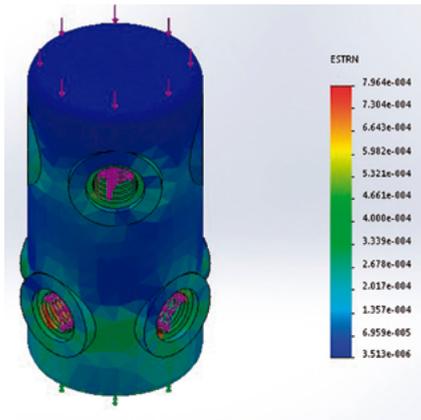


Figura 8. Análisis de esfuerzo del material utilizado en la simulación estructural.

Fuente: elaboración propia

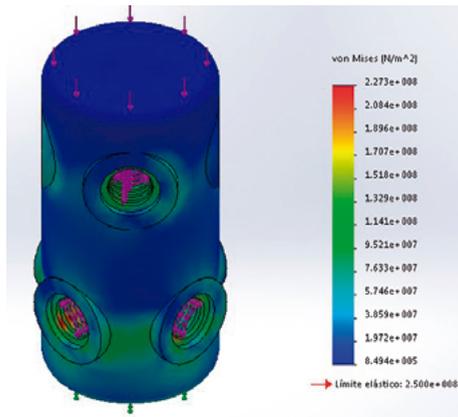


Figura 9. Deformación del material utilizado en la simulación estructural.

Fuente: elaboración propia.

<p>Nodo 1</p> <p>Vista en planta.</p>	<p><i>Función:</i> une los contravientos y las tijeras. Permite expandir la estructura rotando en su propio eje.</p> <p><i>Material:</i> Tubo conduit galvanizado tipo ligero pared delgada 1 (1/2), tornillos, rondanas para tornillos de 10 mm y tuercas de 10 mm.</p>
--	--

Tabla 4. Elementos de conexión del nuevo prototipo de cubierta plegable. Nota: la tabla 4 describe la función y el material con los que se elaboró el modelo experimental final de la investigación.

Fuente: Morales (2016b).

Posteriormente se armó el modelo a escala. Este se desarrolló bajo las especificaciones y las descripciones de la tabla 4. Con estas contemplaciones se realizó el modelo de la cubierta plegable. Una vez conectadas las piezas de la cubierta plegable, se las sometió a las pruebas de alzado: con ello se verifican los inconvenientes del modelo. El primer paso es el desplegado y el plegado de dicha cubierta, ya que esta tiene problemas estructurales por los esfuerzos que se llegan a suscitar a la hora del alzado, como se muestra en la figura 10.

En esta fase, el desplegado se ejecuta por medio de un jalón. Este desarrolló esfuerzos en las aspas de la base de la estructura; por ello, el despliegue se tendrá que hacer con mucho cuidado. Una de las principales características del modelo después del despliegue es que se equilibrará por su propia geometría; para llegar a eso, se contempla que la estructura debe estar correctamente transformada, pues los arrostros o los contravientos ayudan a rigidizar la cubierta si está completamente erguida; así, la direccionan de los esfuerzos y llegan hacia las

bases del sistema plegable formando una cúpula circular unidireccional de la cubierta plegable.

Otro factor que se debe tomar en cuenta es que el sitio debe estar nivelado, pues para este modelo no se realizaron los basamentos de nivelación, que ayudan a adaptar la cubierta al terreno. En este ejemplo se nota que en diferentes escalas a partir de 1:4, la cubierta puede llegar a tener diferentes utilidades, aunque esté analizada para claros más grandes, por cuanto su facilidad constructiva le ayuda a que sea muy fácil instalarla si se tiene contemplado el claro que el usuario quiera cubrir, ya que de ello depende el uso de las herramientas que se requieran en cada caso (Morales, 2017-2018).

Discusión

En el estudio de las cubiertas plegables, el material ocupa un lugar importante para el desarrollo de ese tipo de sistemas estructurales, ya que para poder resistir los movimientos mecánicos de dicho cambio, debe tener cierta resistencia y cierta ligereza para ejecutar el despliegue. La conceptualización de tipologías que nos presenta Felix Escrig nos proporciona parámetros conceptuales para la realización del prototipo final de nuestra investigación; este fue un factor muy significativo para una aproximación conceptual, porque sus aportes teórico-prácticos sirvieron para realizar la transición constructiva del proyecto.

La simulación estructural del sistema transformable y su construcción en la que se basa principalmente en la experimentación, es la que construye los parámetros de diseño para desarrollar una geometría y forma esquemática que ayuda a formar un prototipo arquitectónico. Esto se puede apreciar en la fase de la modelación de los anteriores prototipos que se realizaron para comprobar la movilidad del sistema, la cual se basó en la modelación y la verificación por medio de softwares como Solid Work, que realizan modelados industriales tomando en cuenta las normas y los materiales que puedan mejorar el proceso de la construcción, el cual fue una gran ayuda para realizar el proyecto final.

Todo lo anterior nos deja diferentes líneas de investigación paralelas para abordar y generar más conocimiento práctico-teórico. Un ejemplo de ello es el uso de materiales como el aluminio estructural, el aluminio aeroespacial, el plástico estructural y el acero reforzado con fibra de vidrio, etc. Por ello nos daría un bagaje de posibilidades de aplicaciones en la arquitectura la aplicación de este mismo método, pero con otros sistemas plegables u otros sistemas estructurales plegables combinados (Morales, 2018, pp. 71-86).

Por último, el resultado del modelo aproximado nos deja un parámetro de aplicación constructiva de este tipo de sistemas plegables,



← Figura 10. (1-7). Proceso de alzado, para determinar cómo se comportaría el modelo ya construido.

Fuente: elaboración propia; fotos tomadas en estancia posdoctoral (2017-2018).

los cuales podrán ayudarnos a tener ventajas constructivas en futuros prototipos de cubiertas transformables. Siempre que se diseñe este tipo de estructuras, nos encontraremos con problemas de excentricidades en sus nudos, lo que debe contemplarse desde el principio, para mejorar ese problema en la conexión del nudo; se debe simplificar el diseño del nudo, y no alberga tantas variantes de conexión a ella y así no se alejará del punto excéntrico de los miembros estructurales en la unión, por consecuencia será más fácil de construir (Morales, 2019)

Conclusiones

La investigación se basó desde el principio en la base metodológica constructiva de Félix Escrig, el cual es un punto de referencia, ya que desarrolló geometrías estandarizadas que ayudaron a generar sistemas transformables más fáciles de manufacturar para construir espacios arquitectónicos más rápidos de montar en sitio.

La idea conceptual, expuesta en el diseño experimental de los modelos de conexión, coadyuvó a crear modelos físicos de las estructuras plegables; estas solo se implementarán para el desarrollo de detalles estructurales que puedan crear un sistema plegable. Dichos modelos generan una premisa teórica constructiva para desarrollar dicho tipo de estructuras. Todo esto ofreció un parámetro para desarrollar una propuesta constructiva de cubierta plegable, las cuales sirven para verificar y validar nuestra propuesta facturable.

Con la hipótesis de cargas y la selección del material, se entró a la fase de análisis estructural, el cual se guio por el LRFD y las Normas de Construcción del Reglamento del Distrito Federal (NCRDF). Estas normas se aplican dependiendo del uso de la estructura. En este caso, se deja abierta la posibilidad a un desarrollo de tipo industrial de cubiertas no transitables, aunque la estructura pueda cumplir otras funciones, gracias a su transformación plegable, por lo cual se la denomina *arquitectónicamente multifuncional*.

Para el cálculo de la estructura se utilizó la simulación por medio del elemento finito de un software llamado Solid Work, que realiza un análisis de segundo orden, ya que tal tipo de estructuras tiende a ser deformable en sus conexiones, pues requiere mecanismos articulados en las uniones; esto, para materializar su movilidad y que puedan retornar a su estado inicial. En cuanto a las aplicaciones tecnológicas en la fase de diseño final, se realizó una serie de propuestas aproximadas para el prototipo final, derivado de la construcción parcial de modelos a escala real, o modelos de escalas 1:4, pero analizados con el rigor científico que sustenta su resistencia y su equilibrio para armarlo, y con ello, cotejarse aspectos tales como su armado y sus correcciones de nudos. Los alcances de estos modelados ayudaron a adquirir experiencia y conocimiento en la manufactura de los miembros estructurales del modelo. Esta característica metodológica experimental que se desarrolló en toda la investigación ayudó en



gran medida a mejorar ciertos criterios de diseño constructivos, que se vieron reflejados en la elaboración de un nodo final que no tuviera tantas excentricidades por medio de uniones sencillas. El diseño de un sistema transformable se puede dar de varias maneras; no necesariamente de una sola, pero, por cuestiones prácticas, solo se elaboró una de las varias posibles transformaciones. Igualmente, según se muestra en la figura 11, el tema del sistema constructivo no se profundizó con otros materiales más resistentes y ligeros, ni cómo será su ejecución en el montaje en un terreno aislado, circunstancias que pueden retomarse para crear diferentes posibilidades de montaje, y también, analizar sus propiedades físicas, para saber si estará dentro de los rangos de seguridad.

Figura 11. (1-8). Propuestas para el Ayuntamiento, para rescate de espacios públicos desarrollados por vinculación con el Laboratorio de Estructuras.

Fuente: Morales (2019, p. 89).

Referencias

- Becker, J., Kuschnir, E., (1995). *Tipologías Estructurales: La Desmaterialización de las Estructuras de Grandes Luces (2a Ed.)*. Editorial Universidad Pontificia Chile, Medellín. https://books.google.com.mx/books/about/Tipologas_Estructurales_La_Desmaterializ.html?id=C6vRAAAACAAJ&source=kp_cover&redir_esc=y
- Berger, H. (1996). *Light Structures, Structures of light, the art of tensile Architecture*. https://books.google.com.mx/books/about/Light_Structures_Structures_of_Light.html?id=elrDwAEACA&redir_esc=y
- Broto, C. (2006). *Cubiertas, innovación y diseño*. Editorial Links. <https://bib.ubp.edu.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=22488>
- Chilton, J. (2000). *Space Grid Structures*. Editorial Architectural Press, Oxford. <https://www.routledge.com/Space-Grid-Structures/Chilton/p/book/9780750632751>
- Escrig, F. (1988). Estructuras espaciales desplegables curvas. *Revista Informes de la Construcción*, 39, 53-71. <https://doi.org/10.3989/ic.1988.v39.i393.1606>
- Escrig, F. (1984). Estructuras espaciales de barras desplegables. *Revista Informes de la Construcción*, 36, 35-46. <https://doi.org/10.3989/ic.1984.v36.i365.1895>
- Escrig, F. (2012). Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil. Editorial Universidad de Sevilla.
- McCormac, J. (2000). *Diseño de estructuras de acero, Método LRFD (2da. ed.)*. Editorial Alfaomega. <http://www.bibvirtual.ucb.edu.bo:8000/opac/Record/21120/TOC>
- Morales, C. C. (2012). *Diseño de cubiertas ligeras tensadas [estancia posdoctoral, Universidad Politécnica de Catalunya]*.
- Morales, C. C. (2013a). *Diseño de cubiertas plegables tensadas en la arquitectura [Tesis de máster de Ingeniería para la Arquitectura, Universidad Camilo José Cela, Madrid, España]*.
- Morales Guzmán, C. C. (2013b). Prototipo de diseño de una cubierta retráctil tensada. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 15(1), 102-110. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2013.15.1.11>
- Morales, C. C. (2014). Proceso de diseño de sistemas transformables en las cubiertas ligeras. *Módulo Arquitectura CUC, Vol. 14 No. 1* doi: <http://dx.doi.org/10.17981/moducuc.14.1.2015.5>
- Morales Guzmán, C. C. (2016). Construcción experimental de un sistema transformable tensado plegable. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 18(1), 98-110. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2016.18.1.9>
- Morales, C. C. (2016b). Development and experimental construction of a transformable roof (first phase). *Magazine Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary*, 3. <https://revistas.cecar.edu.co/index.php/procesos-urbanos/article/view/502# : ~ : text=https%3A//doi.org/10.21892/2422085X.502>
- Morales, C.C. (2017). Experiencias y casos de estudio: construcción de una cubierta hiperbólica tensada para espacios tropicales. En G. Pesantez & W. Flores (Comps.), *Arquitectura: experiencias y propuestas para la ciudad Guayaquil (pp. 177-192)*. Centro de Investigaciones y Desarrollo de Ecuador. <http://192.99.145.142:8080/xmlui/handle/123456789/17>
- Morales, C. C. (2017-2018). *Diseño de cubiertas emergentes [Estancia posdoctoral, Universidad Politécnica de Catalunya]*.
- Morales Guzmán, C. C. (2018). Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tensoestructura. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 20(1), 71-87. Proceso de diseño de sistemas transformables en las cubiertas ligeras. *Módulo Arquitectura CUC, Vol. 14 No. 1* doi: <http://dx.doi.org/10.17981/moducuc.14.1.2015.5>
- Morales Guzmán, C. C. (2019). Diseño y construcción de un paraguas plegable para espacios arquitectónicos. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 21(1), 76-89. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.1623>
- Sánchez, F. (1992). *Estructuras ligeras para grandes luces*. Editorial Fundación Emilio Pérez Piñero. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=515621>