

# CUBIERTAS PLEGABLES EN LA ARQUITECTURA

**Carlos César Morales Guzmán**



**Anáhuac**  
México



Morales Guzmán, Carlos César

*Cubiertas plegables en la arquitectura* / Carlos César Morales Guzmán; Presentación Sergio Amante Haddad.

México: Universidad Anáhuac México, © 2022

1 recurso en línea (234 páginas)

ISBN: 978-607-8566-69-3 (Libro electrónico) PDF

1. Cubiertas plegables. 2. Techos -- Diseño y construcción.  
I. Amante Haddad, Sergio, presentación.

L.C.  
NA2900  
M67  
2022

Dewey  
721.5  
M67  
2022

Diseño de portada: VLA. Laboratorio Visual

Diseño de interiores: Nuria Saburit Solbes

Primera edición, 2022

ISBN: 978-607-8566-69-3 (Libro electrónico) PDF

La presente edición digital de la obra

*Cubiertas plegables en la arquitectura*

le pertenece al editor mediante licencia exclusiva.

El editor autoriza el acceso a la totalidad de la obra para su consulta, reproducción, almacenamiento digital en cualquier dispositivo e impresión para uso personal y privado y sin fines de lucro. Ninguna parte de la presente obra podrá ser alterada o modificada ni formar parte de nuevas obras, compilaciones o colecciones.

Queda prohibida su difusión y comunicación pública en plataforma digital alguna distinta a la cual se encuentra almacenada, sin permiso previo del editor.

Derechos reservados:

© 2022, Investigaciones y Estudios Superiores SC

Universidad Anáhuac México

Av. Universidad Anáhuac 46, Col. Lomas Anáhuac

Huixquilucan, Estado de México, C.P. 52786

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana.

Registro núm. 3407

# CUBIERTAS PLEGABLES EN LA ARQUITECTURA

Carlos César Morales Guzmán



# Contenido

PRÓLOGO	7
PRESENTACIÓN	8
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO 1. ORÍGENES DE LA ARQUITECTURA TRANSFORMABLE	12
1.1. Antecedentes	12
1.2. Evolución de los materiales industrializados	19
1.3. Referentes sobre sistemas articulados	29
1.4. Tabla de referencia histórica	37
CAPÍTULO 2. DISEÑO Y BÚSQUEDA DE LA FORMA	40
2.1. Introducción	40
2.2. Mapa conceptual	42
2.3. La problemática del diseño	44
2.4. Sistemas transformables flexibles	45
2.5. Herramientas de diseño	46
2.5.1. Condiciones geométricas de una cubierta plegable	46
2.5.2. Parámetros para la construcción de una geometría plegable	50
2.5.3. Parámetros de análisis estructural de las geometrías plegables	55
2.5.4. Cálculo de los esfuerzos	56
2.5.5. Parámetros de comprobación de resultados	57
2.5.6. Desarrollo de la matriz de rigidez en coordenadas locales y ejemplo de aplicación	59
2.6. Proceso de iteración de cálculo por medio de un software	61



2.7.	Comparaciones y tipologías de los sistemas	62
2.7.1.	Tipologías de cubiertas transformables	62
2.8.	Alcances del estudio	72
2.9.	Determinación del estudio	74
CAPÍTULO 3.	MÉTODO Y ADECUACIÓN DE MODELOS DE SISTEMAS PLEGABLES	76
3.1.	Definición y adecuación de la geometría	76
3.2.	Experimentación transformable unidireccional	78
3.3.	Compatibilidad geométrica del modelo experimental	84
3.4.	Adecuación geométrica experimental	87
3.5.	Desarrollo experimental de un sistema esférico transformable bidireccional	90
3.6.	Adecuación de la geometría esférica transformable bidireccional	93
3.7.	Experimentación de una geodésica transformable multidireccional	96
3.8.	Compatibilidad geométrica	102
3.9.	Adecuación de la geometría de cúpula de módulos cuadrados	105
3.10.	Aplicación de la adecuación geométrica a los modelos experimentales	108
3.11.	Aproximaciones de diseños constructivos plegables	110
3.12.	Aproximación de un proyecto aplicado	114
3.12.1.	Simulación de la geometría en modelos constructivos	128
3.13.	Reflexión sobre el proceso de diseño de los sistemas transformables	133
CAPÍTULO 4.	SIMULACIÓN ESTRUCTURAL Y ADECUACIÓN CONSTRUCTIVA	136
4.1.	Alternativa tecnológica	136
4.2.	Premisas y cotas de una cubierta plegable	137
4.3.	Parámetros de diseño: predimensionamiento de la estructura plegable	140
4.3.1.	Descripción	144
4.3.2.	Procedimiento	144
4.3.3.	Determinación de la velocidad de diseño	145
4.4.	Análisis de simulación con membrana	149

4.5.	Propuestas constructivas experimentales	156
4.6.	Desarrollo del diseño del nodo tipo	161
4.7.	Construcción del prototipo	164
4.7.1.	Primera prueba de conexiones	164
4.7.2.	Segunda prueba de montaje	168
4.8.	Propuestas de detalles constructivos, mejoramiento de las uniones	169
4.8.1.	Primera propuesta constructiva	169
4.8.2.	Segunda propuesta constructiva	178
4.9.	Metodología del procedimiento constructivo para mejorar el diseño final	189
4.10.	Modelado constructivo de la propuesta final	193
4.11.	Propuesta final	197
4.12.	Simulación y comprobaciones de uniones estructurales	208
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		217
CONCLUSIÓN		220
BIBLIOGRAFÍA		226
LISTA DE REFERENCIAS		229
ÍNDICE DE TABLAS		233

# Prólogo

La presente obra literaria se desarrolla en la investigación de los sistemas plegables y cómo se debe diseñar y construir dicho sistema transformable. El estudio que culmina en esta obra inició en el año 2000, en la Universidad Veracruzana, por lo que parte de los escritos de este libro fueron publicados en revistas, congresos y tesis de posgrado de mi autoría. Se propone una nueva metodología basada en el método desarrollado por el doctor Félix Escrig, quien nos brindó los conceptos para desarrollar y generar sistemas transformables más rápidos, y con los cuales se construyeron una serie de prototipos que verifican y validan el proceso de diseño geométrico para la creación de estructuras plegables.

Se analizaron los modelos con el software WinTess para la simulación estructural de dichos sistemas plegables y para verificar la seguridad estructural del modelo; se abordó el diseño del nodo con el software Solid Work, que nos auxilió para diseñar los detalles industriales de conexión por medio de CAD (Computer-Aided-Desing), ya que su paquetería tiene la capacidad para desarrollar prototipados experimentales y realizar los detalles estructurales.

En consecuencia, se llevaron a cabo una serie de modelos físicos para validar el resultado del análisis estructural, lo que permitió la identificación de parámetros para la mejora del procedimiento de armado y diseño constructivo de los sistemas plegables, hasta culminar con una propuesta final. Se cuenta con conclusiones de escalabilidad para confirmar las ventajas y desventajas de dichos sistemas, verificables mediante la realización de un número reducido de ensayos prácticos y cuyo diseño se aprobó para poderse manufacturar en los espacios arquitectónicos multifuncionales, con un método geométrico fácil y rápido de generar para adecuar estos modelos a partir de un nodo articulado flexible que puede armarse para la construcción de una estructura plegable.

# Presentación

El doctor Carlos César Morales Guzmán nos presenta en este libro su experiencia resumida de muchos años de arduo trabajo de investigación científica orientado hacia las estructuras plegables como una importante opción de cobijo concebida desde la lógica de la economía de medios: haciendo mucho con poco. Se trata de una arquitectura ligera, susceptible de transportarse, de múltiples usos y propósitos, y con la longevidad posible gracias a su geometría que prevé la sustitución e intercambio de elementos estandarizados.

Con humildad investigadora mira hacia las formas vernáculas de la arquitectura itinerante para develar los principios estructurales de los recintos de membrana portátil y de mínimo esqueleto para satisfacer las necesidades primarias y primigenias de resguardo que desde tiempos inmemoriales presenta el ser humano en su afán por domiciliarse intermitentemente y poder resguardar sus teofanías u objetos que le son sagrados.

Con estos principios en mente, canaliza sus conocimientos y creatividad hacia una investigación cuyo detonante es la siguiente interrogante: ¿Cómo es posible concebir, proyectar, calcular y construir estructuras plegables aprovechando las tecnologías contemporáneas para servir a una diversidad de propósitos inherentes a los desafíos de producción del hábitat edificado en pleno siglo XXI? Es así como elabora sus métodos de análisis, diseño, estandarización de elementos y construcción para resolver un amplio rango de posibilidades, entre las que destacan: cobijo de emergencia, pabellones de exposición artística e industrial, vivienda itinerante, espacios transitorios para la comercialización de productos, campamentos de verano, conciertos musicales y recintos temporales de hospitalización en los casos de epidemias, solo para mencionar algunos ejemplos.

Desde la morfología arquitectónica, este es un tratado innovador que interpreta el concepto biológico de la metamorfosis y lo traslada al ámbito del hábitat humano. Fundamenta sus técnicas constructivas con base en modelos experimentales que ofrecen un cimiento científico a sus conclusiones y aportaciones. Su lenguaje es el de la geometría analítica ligada a la modulación y a la estandarización de los componentes de la estructura plegable. Emplea software especializado para la verificación

y fiabilidad de resultados y produce uniones que son posibles gracias a la simbiosis entre arquitectura y diseño industrial. Finalmente, es un libro abierto y no una investigación con pretensiones de ser inmutable ni inflexible. Todo lo contrario. Invita a una participación orgánica y creciente de otros apasionados por la arquitectura, las estructuras y la configuración de los espacios habitables para dar continuidad a este proceso milenario de búsqueda tenaz para contribuir a elevar la calidad de vida de los habitantes de nuestro planeta. Estudiantes, aficionados y expertos por igual disfrutarán de este texto innovador y creativo.

DR. SERGIO AMANTE HADDAD  
*Universidad Politécnica de Madrid*

# Introducción

El presente estudio se deriva del desarrollo metodológico para concebir un diseño de sistema plegable, es decir, ayudará a buscar parámetros de diseño sobre cómo concebir el espacio arquitectónico. Es aquí donde la tecnología industrial desarrolla un papel muy importante en el tema de la transformación del espacio, ya que su base de diseño es la estandarización, lo cual genera una serie de conceptos de estructuras flexibles en los edificios arquitectónicos (Morales, C. C., 2013e).

Esto nos proporciona también el material didáctico necesario para realizar un estudio variado de conceptos de diseño, basado en una serie de modelos comparativos en la evolución de la historia, desarrollada a partir de la Revolución industrial, donde encontramos referencias conceptuales de diseño y procesos de montajes constructivos sumamente importantes para la justificación metodológica de diseño y experimentación en los sistemas plegables (Morales, C. C., 2014c).

Estos enfoques están divididos en cuatro capítulos que conforman el proceso de aportación del tema que explora la producción de estructuras plegables: concepción y definición de la forma, validación de su movimiento y comportamiento estructural en la fabricación de sus elementos y en obra, montaje y apertura, el cual tendrá una guía para el desarrollo metodológico. Aunque en cada capítulo se estudia un aspecto diferente de este tema, el principal objetivo es cómo hacer la transición de diseño a la materialización de una propuesta constructiva. En el capítulo 1 se analizan las diferentes etapas de la historia en la arquitectura transformable, ya que sus referentes proporcionan temas de interés; esto para conformar distintas formas de análisis comparativo en la historia y crear conceptos aplicables al proyecto, referenciados en los desarrollos tecnológicos que nos darán pautas para desarrollar una propuesta metodológica de diseño para crear sistemas plegables.

En el capítulo 2 se describe la definición de los *sistemas transformables* y las construcciones geométricas que pueden tener dichas estructuras en un proyecto. Estas herramientas metodológicas ayudarán a construir una propuesta teórica sobre cómo diseñar un sistema plegable y cuáles serían los problemas que podrían presentarse en el desarrollo de dichas estructuras. El procedimiento a abordar en este manuscrito es la exposición de los métodos matemáticos y geométricos, que

servirán para desarrollar una tipología de sistema transformable y guías de diseño para crearlas.

En el capítulo 3 se desarrollarán experimentaciones conceptuales de movimiento por modelos que se sustentan en un pantógrafo sencillo descrito por el Dr. Félix Escrig, donde el principio del movimiento y desarrollo de esta geometría pueden ser realizados rápidamente por la geometría descriptiva. Veremos también su desarrollo matemático, el cual le da validez a esta transición, pero su concepción es más compleja por lo que la utilización de la geometría descriptiva es más rápida para las propuestas finales de este estudio. Se justificará que nuestro método puede tener una translación más sencilla para construir un prototipo plegable, creando así una guía para el desarrollo de propuestas para su posterior aplicación de un modelo final.

En el último capítulo se examinará la propuesta planteada en los apartados anteriores, se tratará de resolver cómo construir y desarrollar un sistema plegable tenso, y su concepción en el diseño, su simulación estructural, la construcción del prototipado y sus detalles constructivos para replicarlos a un proyecto arquitectónico. Tendrá como análisis buscar y adaptar el proyecto a una escala considerable, donde aplicar el desarrollo constructivo dentro de la propuesta ayudaría a crear un espacio diferente al que se tiene concebido en la arquitectura, haciendo una discusión de los problemas encontrados y las ventajas que pueden tener dichas estructuras ya instaladas, y las desventajas que podrían tener al construirlas por la falta de mano de obra especializada (Morales, C. C., 2013e).

Con esto se podría obtener un campo distinto y alternativo en la arquitectura, generando diferentes formas para integrar un diseño acorde al contexto, donde los proyectos no convencionales den paso a una concepción diferente de diseños arquitectónicos, desarrollado por sistemas plegables que den espacios más confortables en las edificaciones (Morales, C. C., 2013e).

## Capítulo 1

# Orígenes de la arquitectura transformable

### 1.1. ANTECEDENTES

Desde la antigüedad, los materiales han marcado un papel importante en la construcción de edificios arquitectónicos; por ello las grandes obras se basan en los materiales empleados para su construcción, ya que el objetivo transcendental era diseñar un edificio más resistente que los convencionales (piedra y tabique) y así tuvieran mayor dimensionamiento del espacio. Con la aparición del acero y el concreto surgieron sistemas estructurales esbeltos y estéticos, estos parámetros generaron una ordenación en el espacio y en los elementos arquitectónicos (Morales, C. C., 2013e) (Puertas del Río, 1990) ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)).

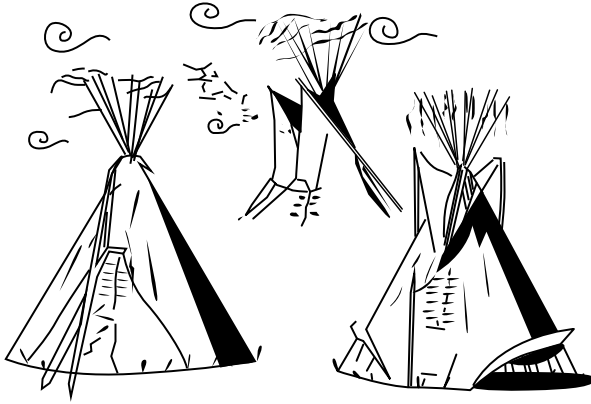
Los conceptos primigenios de la actividad arquitectónica están ligados al concepto de permanencia e inmutabilidad, pero intervenir en una obra preexistente siempre genera polémica sobre si es lícito superponer valores nuevos sobre el lenguaje antiguo. Toda sociedad intenta institucionalmente consagrar su ideología mediante la permanencia de las formas arquitectónicas, mucho más que en los textos literarios, la música o demás artes. El poder se expresa mediante la construcción en ese intento de reescribir la historia con los mismos materiales existentes desde el comienzo de los siglos y que duraran tanto como la propia naturaleza.

En este orden de ideas, la transformabilidad no es un concepto ligado a la arquitectura tradicional donde las sociedades muy primitivas, que no sienten una cultura propia que perpetuar o sociedades muy críticas, que no asumen verdades absolutas, han podido trabajar las formas constructivas con una libertad que pone en entredicho su imagen resultante y, por lo tanto, su constancia.

La arquitectura transformable es aquella utilizada por los pueblos nómadas hasta la actualidad para optimizar el transporte, la rapidez de montaje e incluso la combinatoria de elementos integrantes. Para entender la magnitud de este tipo de arquitectura se menciona, por ejemplo: las tiendas tipis en las praderas norteamericanas desarrolladas en el siglo XVII, para adaptarse al modo de vida de los pueblos indios que habitaron en esa región, y a las extremas condiciones climáticas propias de la misma (figura 1). Ellos utilizaban una estructura basada en mástiles de madera que se



ataban con cuerdas en uno de los extremos, para luego formar una cubierta cónica por corteza de árboles, piel de caribú u otros materiales disponibles (<http://www.inoxidables.net>).



**FIGURA 1.** Orientación de la tienda tipi hacia los vientos dominantes. Durante las horas o épocas de calor, resulta uno de los grandes beneficios de estas tiendas. Imagen extraída y redibujada de <http://infantilgraciapc.blogspot.com>, Morales, C. C. (2018).

Estas tiendas, por sus formas cónicas, gozaban de grandes beneficios: buen comportamiento a la precipitación pluvial y a los fuertes vientos, mejor ventilación por el sistema de linternilla en la parte superior, además del sistema de entrada por solapa que permitía orientar el tipi hacia los vientos dominantes (figura 2). Atando el extremo superior de la estructura a los caballos permitía su rápido transporte, al tiempo que sirvió como remolque para arrastrar sus pertenencias (Rodríguez, N., 2007), (Morales, C. C., 2012a, 2012b, 2013a).

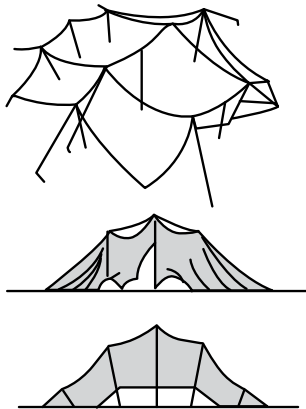
**FIGURA 2.** Tienda tipi. Utilizaban varillas de madera que se ataban en la parte superior formando una cubierta cónica, forradas de pieles de búfalo. Imagen extraída y redigitalizada de <http://www.tipis.es>, Morales, C. C. (2018).



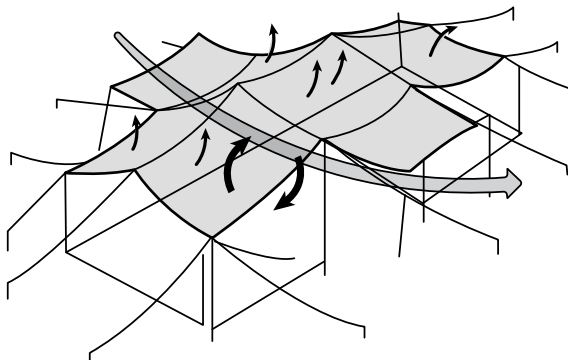
En otra región ubicada en la península arábiga, los moros y beduinos utilizaron tiendas rectangulares llamadas *jaima*, que iban montando y desmontando según la estación: lluvia o sequía. Estas tribus utilizaron una estructura compuesta por mástiles de madera, tensores de cuerda y grandes piedras que les servían como cimentación

(figura 3). La disposición de los tensores y las piedras con respecto a la ubicación de la tienda es fundamental para que soporte los fuertes vientos que habitualmente azotan la región.

La cubierta de la carpa está formada por un tejido elaborado con pelo de camello, cabra o lana, que por sus características tienen un comportamiento bioclimático. Las telas se recubren con grasa y almagre (arcilla roja) para protegerlas de la lluvia y del sol, creando así un sistema de repelencia al agua muy eficiente e impermeable. Los laterales de la tienda pueden enrollarse para dejar entrar la brisa o cerrarse herméticamente durante la lluvia o las tormentas de arena (figura 4); el interior de la tienda está dividido en tres partes llamadas “gatas”, una destinada al hombre, otra a la mujer y a los niños, y la tercera como despensa y cocina (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2009, 2012a, 2012b) (<http://aguiluchos.net>).

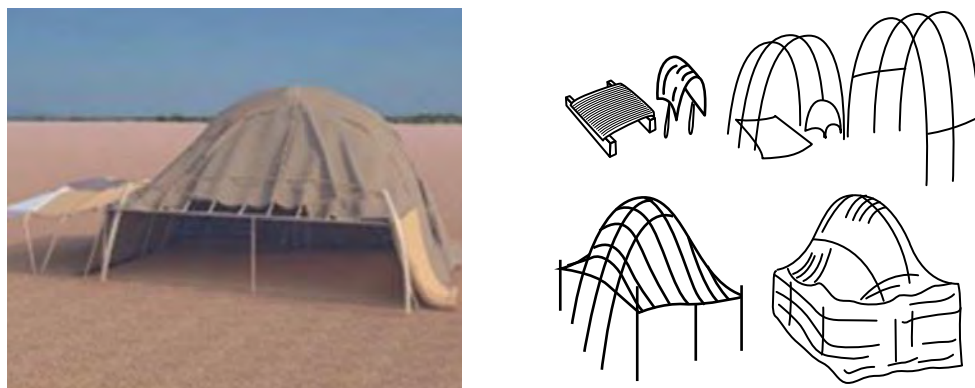


**FIGURA 3.** El techo son seis bandas de color oscuro atirantadas y anudadas a la estructura y ancladas al suelo. Imagen extraída y redigitalizada de <https://www.freeimages.com>, Morales, C. C. (2018).



**FIGURA 4.** En verano, las bandas de tela laterales se elevan permitiendo la circulación de corrientes de aire. En invierno se cierra la parte trasera para proteger el interior del viento dominante. Imagen extraída y redibujada de <https://www.freeimages.com>, Morales, C. C. (2018).

Otras culturas nómadas, ubicadas en las vastas áreas del sur del Sahara y Norte de Kenia, Somalia y Etiopía, utilizaron el cuero curtido como material principal en varios de los elementos que constituían sus tiendas. Se veían afectados por un clima desértico en el que apenas existe vegetación, precipitaciones escasas, altas temperaturas durante el día y bajas durante las noches, con poca variación durante el año. En otra región los kurdos construyeron sus viviendas “bóvedas” llamadas Tuareg (figura 5) (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2013a).



**FIGURA 5.** Tienda Tuareg de la cultura nómada de los kurdos. Imagen extraída y redigitalizada de <https://www.almendron.com>, Morales, C. C. (2018).

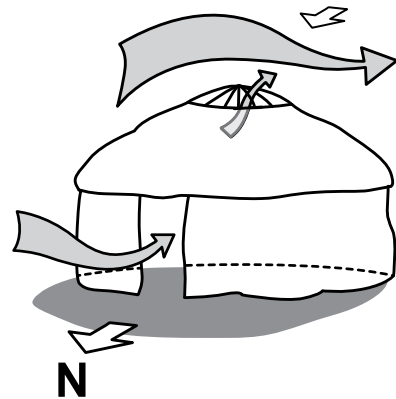
Las tiendas Tuareg eran construidas a partir de palos flectados, anclados en el terreno y unidos o atados cerca de la clave del arco. El espacio interior era de 5 metros de largo por 3 metros de ancho aproximadamente. La tienda estaba dividida por un mástil o mástiles centrales, mientras que la cubierta tenía pieles curtidas de cabras y camellos. Su forma de “bóveda”, que estaba atirantada y unida al perímetro de la tienda, evitaba la formación de arrugas en la cubierta. Esta tienda tenía la siguiente distribución del espacio: a la mitad oeste se ubica la cama y la zona para la mujer; después la zona del comedor y las aéreas de recreación (Rodríguez, N., 2007) (<https://www.almendron.com/>).

Mientras tanto, en otras regiones, los pueblos nómadas de los bárbaros y los Kazaja utilizaban las tiendas llamadas Yurts o Ger. Una Ger se compone de una estructura hecha de entramado de madera de sauce que se coloca sobre el terreno. Básicamente la forma de esta tienda es circular, lo que le permite soportar los fuertes vientos de la zona y es aproximadamente de 20 metros cuadrados con una altura máxima de 2.35 metros y mínima de 1.50 metros. Dos mástiles de madera en el centro soportan el anillo de madera o metal en el que remata el techo (figura 6).



**FIGURA 6.** Instalación de un Ger o Yurts. Se une el enrejado circular en el que se coloca una cuerda en la parte superior para posteriormente sostener la cubierta. Imagen extraída y redigitalizada de <http://www.canada-mongolia-connection.com>, Morales, C. C. (2018).

La estructura del techo se compone de varas que se apoyan sobre el entramado tipo tijera y el anillo central. Dicho anillo funciona como ventana para la entrada de luz y salida de humo de la cocina, y también como reloj solar: según como la luz entra a través de este hueco se sabe qué hora del día es (figura 7) (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2013a) (<http://culturatextil.blogspot.com/>).



**FIGURA 7.** La ventana que se encuentra en la parte superior permite la entrada y salida de luz y aire. Imagen extraída y redigitalizada de <http://www.canada-mongolia-connection.com>, Morales, C. C. (2018).

El recubrimiento exterior de la Ger es de fieltro confeccionado con lana de oveja en varias capas, golpeada a mano y rociada durante su proceso con agua y leche. Las dimensiones más comunes de un Gerson son 5,50 metros de diámetro, con una altura máxima de 2,35 metros y mínima de 1,50 metros. La tienda está dividida en nueve partes y según su distribución: la sección norte es el lugar de honor para los huéspedes, un altar pegado a la pared de lado norte también; las camas son colocadas del lado este para las mujeres y del lado oeste para los hombres; finalmente, en el centro se coloca la estufa (Rodríguez, N., 2007) (<https://www.archdaily.mx/>) (<http://culturatextil.blogspot.com/>).

Las tiendas de los pueblos nómadas representan las técnicas más primitivas para solucionar las necesidades de refugios flexibles, adaptables y fáciles de transportar, resultaron ser los principios básicos de la arquitectura transformable. Sin embargo, en la historia encontramos otros antecedentes importantes que marcaron el desarrollo tecnológico de las estructuras transformables, como la cubierta tensada. Lo anterior permite entrever que, desde las sociedades muy antiguas, las cubiertas ligeras representaron una opción arquitectónica muy eficiente, ejemplo de ello es la cubierta textil utilizada en el Coliseo romano llamada *Velarium romano*.

La construcción del Coliseo romano inició en el año 70 d.C. y concluyó en el año 80 d.C. Es un edificio de forma elíptica que mide 188 metros por 156 metros; alcanza una altura de más de 48 metros y se calcula que tenía una capacidad aproximada para 55 000 espectadores, los cuales podían ingresar a sus instalaciones a través de 80 entradas (figura 8).

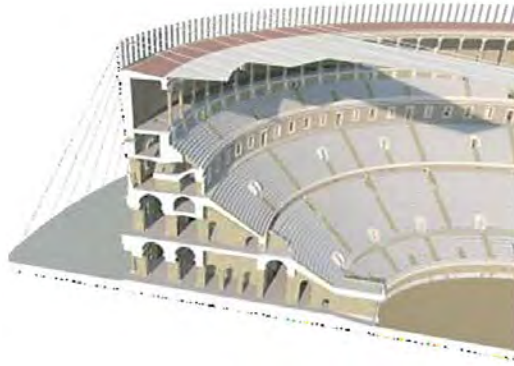


**FIGURA 8.** Coliseo romano. Iniciado por Vespasiano en el año 70 d. C. y completado por su hijo Tito en el año 80 d. C. Imagen extraída y redigitalizada de rincondelartedejudit.blogspot, Morales, C. C. (2018).

El Coliseo estaba cubierto con un enorme toldo desplegable llamado *velarium*, el cual protegía a los espectadores del sol. Durante la temporada de lluvia el *velarium* mantuvo a la audiencia cubierta; en los meses de calor extremo, el *velarium* se inclinaba hacia abajo para atrapar el viento y así proporcionar ventilación al público. El *velarium* primero fue hecho con tela de vela, pero después fue sustituido por lino, que era más ligero. Éste se apoyaba en un entramado de cuerdas y cada sector de tela podía moverse por separado (figura 9) (Nelson, R., 2007) (Morales, C. C., 2013a, 2014a) (<http://viajarbaratopuertucuenta.blogspot.com/>).

Se desplegaba gracias a unas guías colocadas en los travesaños de madera en donde unos anillos podían moverse sobre dichos travesaños, hasta extender la membrana en el coliseo, dependiendo de las exigencias climáticas. En la parte superior de la fachada se colocaban 250 mástiles de madera que soportaban los cables (figura 10) y las cuerdas se anclaban en el suelo a una serie de bolardos que circundaban al

anfiteatro. Estos bolardos estaban situados a 18 metros de la fachada en la explanada exterior (<http://viajarbaratoportucuenta.blogspot.com/>).



**FIGURA 9.** El *velarium* se anclaba a grandes postes en la parte superior del Coliseo y este era anclada al suelo mediante cables de gran tamaño. Las velas pesaban unas 24 toneladas. Imagen extraída y redigitalizada del rincondeartedejudit.blogspot, Morales, C. C. (2018).

**FIGURA 10.** Los 250 mástiles eran colocados en la parte superior del Coliseo a más de 48 metros de altura. Imagen extraída y redigitalizada de the-colosseum.net, Morales, C. C. (2018).



La velaria se encontraba conectada entre sí y suspendida por cables que colgaban de los mástiles que se situaban alrededor de la cornisa del anfiteatro. La velaria, junto con los travesaños de madera, pesaba alrededor de 24 toneladas, la membrana era accionada por medio de poleas que hacían que la vela se extendiera en las gradas del Coliseo.

Hasta aquí se ha examinado la utilización de la arquitectura transformable en pueblos nómadas y civilizaciones constituidas en grandes imperios, que utilizaban la cubierta textil para cubrir grandes claros como el *velarium romano*. Es este último uno de los antecedentes más importantes de las estructuras tensadas, pues al determinarse un mecanismo para izar la tela, se crearon conceptos útiles para la construcción de estos sistemas. En la actualidad, dichos conceptos se usan en los sistemas de tensado y en elementos estructurales que utilizan una membrana textil flexible (Morales, C. C., 2007, 2009, 2012a).



Las tiendas de los pueblos nómadas y la cubierta del Coliseo romano representan los primeros conceptos que en la historia estructural de las cubiertas ligeras dieron pie a su estudio y desarrollo; no obstante, los estudios e invención de otros métodos en el área de la ingeniería estructural también concretaron parámetros que en gran medida tuvieron influencia en el desarrollo de estructuras a base de tensión (<https://www.curiosfera.com/>).

## 1.2. EVOLUCIÓN DE LOS MATERIALES INDUSTRIALIZADOS

Posteriormente, con la aparición del hierro fundido se dieron avances importantes en la construcción de las estructuras ligeras, dando pauta a la realización de estructuras más resistentes, pero con un menor consumo de material. Lo significativo de esto es el aporte de la sistematización de los miembros estructurales, ya que gracias a que el material era relativamente menos pesado y más fácil de manufacturar que otros, se podían lograr espacios de gran tamaño, esto gracias a la manejabilidad de sus componente mecánicos y químicos que tiene el hierro fundido.

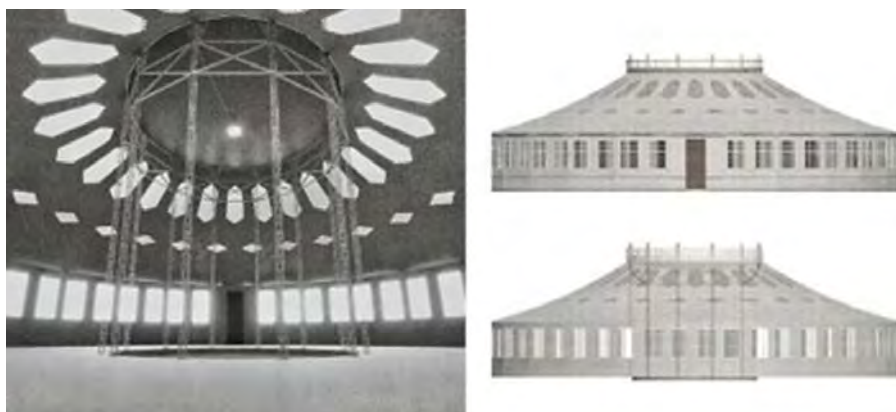
Uno de los pioneros que aprovechó esta industrialización del material para desarrollar un método de análisis diferente para la ingeniería estructural fue el ingeniero ruso Vladimir Grigorievish Shukjhov, quien realizó adelantos en el diseño industrial de las primeras estructuras tensadas del mundo, además fue el inventor de una nueva familia de formas estructurales doblemente curvadas que hoy se conoce como hiperboloides de revolución (figura 11).



**FIGURA 11.** Torre de agua. La primer hiperboloide de celosía de 37 metros de altura por Vladimir Shukjhov, Nizhny. Novgorod, 1896. Imagen extraída y redigitalizada de <https://regnum.ru>, Morales, C. C. (2018).

Shukjhov desarrolló los cálculos prácticos de tensiones y deformaciones en las estructuras tensadas, cáscaras y membranas. En 1895, patentó los revestimientos de celosías en forma de conchas y, a partir de ello, desarrolló un nuevo tipo de estructura de soporte: una cubierta colgada en una estructura espacial.

Así, durante la exposición de toda Rusia en Nizhny Novgorod, en 1896, Shukjhov presentó sus nuevas estructuras tensadas. Diseñó ocho pabellones de tamaños impresionantes que cubrían un área de 27,000 metros cuadrados (figura 12) (<http://shukhov.org/shukhov.html>).

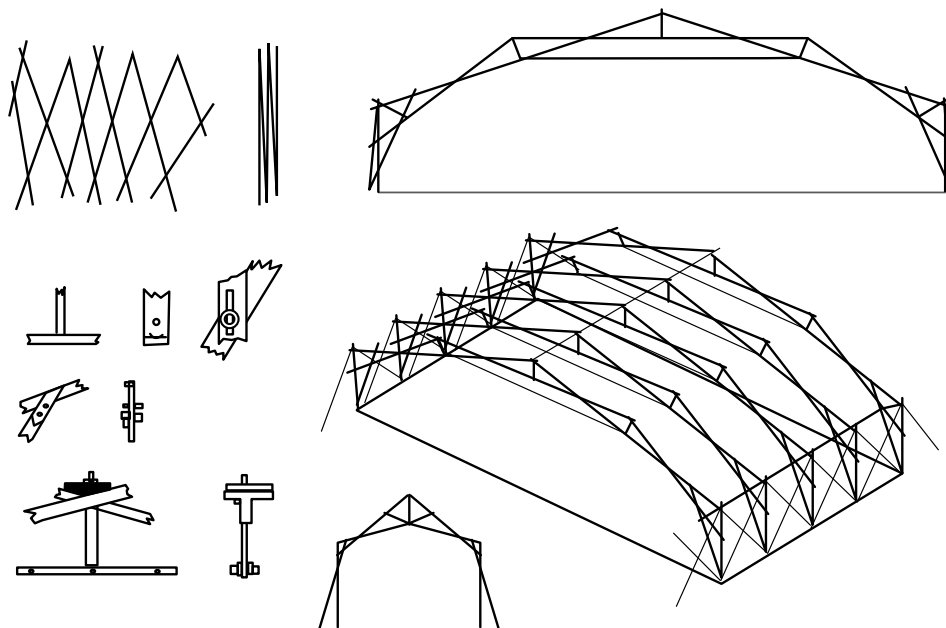


**FIGURA 12.** Pabellón oval. En el mundo, la primera estructura de tracción de acero por el ingeniero ruso Vladimir Shukjhov en 1886. Exposición industrial de toda Rusia en Nizhny Novgorod. Era una cubierta de celosía de acero colgada. En el centro, la cubierta era una membrana de fina hojalata de un diámetro de 25 metros. Imagen extraída y redigitalizada de <https://www.wikiwand.com>, Morales, C. C. (2018).

El centro de cubierta colgante de uno de los pabellones fue hecho de fina hojalata (membrana), la cual nunca había sido utilizada en la construcción; tenía un enrejado de acero en el techo a 16 metros de altura con un diámetro de 48 metros (Morales, C. C., 2015a, 2017a).

Años después, se descubrió el acero que tenía un compuesto de hierro y carbono que mejoraba el material químicamente, obteniendo una propiedad mecánica más resistente, con esta propiedad volvió más eficiente el proceso de la construcción. Esta premisa se expresa claramente en el campo de las estructuras móviles y portátiles. La primera referencia que encontramos fue la patente a la identificada con el N.º 7755 de origen británico de 1944 (figura 13), presentada por Barde Salden Watkins y registrada con el título "Improvements in supports for tents, marquees, temporary bridges and other portable structure" (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2010a) (<http://arki-actividad.blogspot.com/>) (<http://docplayer.es>).

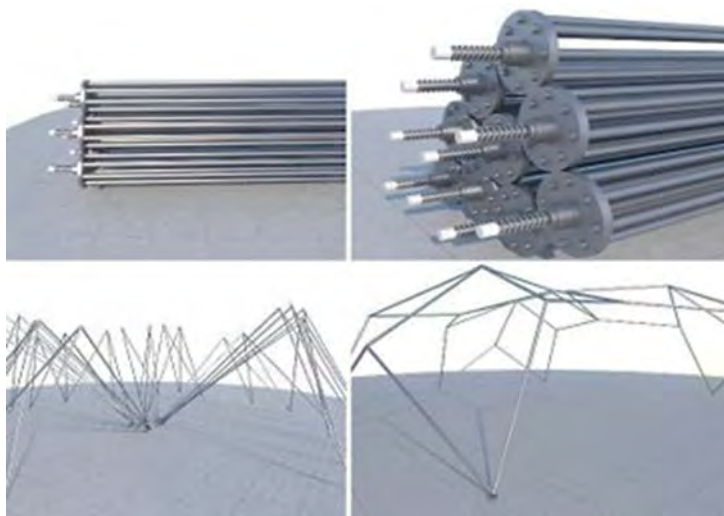




**FIGURA 13.** Arcos desplegables (1944), Barde Salden Watkins. Uno de los primeros referentes de estructura retráctiles transformables que fueron patentados. Imagen extraída y redigitalizada de Morales, C. C. (2010a).

La invención consistió en una bóveda de cañón largo compuesta por una sucesión de arcos rebajados, plegable y formada por barras de acero articuladas por nudos pasantes tipo tijera unidos por unas barras continuas (no plegables), ubicadas en la cumbrera de la bóveda y en los laterales para su estabilidad y rigidez; así como también unas barras rigidizadoras de compresión que sujetan los arcos ubicados en cada nudo, esto impide que los arcos regresen a su posición inicial. La plegabilidad de esta propuesta se realiza por arcos individuales (Nelson, R., 2007) (<https://www.tdx.cat>).

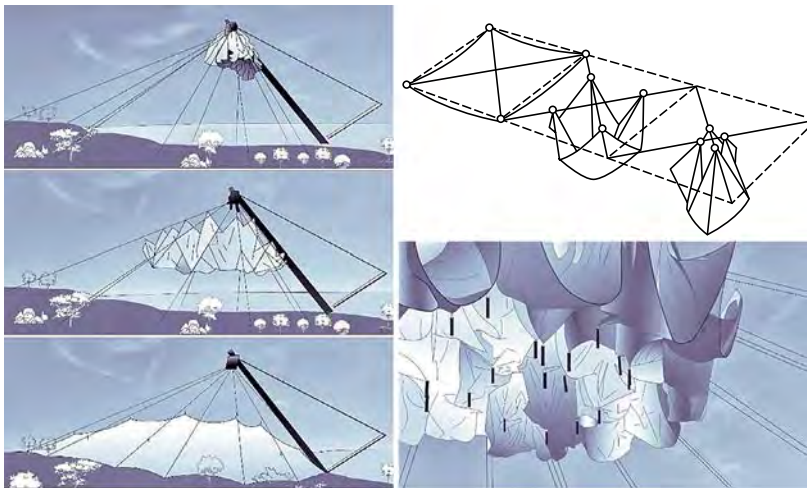
Para 1953, Fuller se construye un prototipo experimental desplegable llamado Flying Seedpod (figura 14) en la Universidad de Washington, el cual consistía en una serie de polígonos tetraédricos y con conexiones múltiples entre sí, el cual estaba constituido por nudos que eran articulados en diferentes planos, y su posición ayudaba abrir y cerrar un pequeño paquete de miembros de acero que al desplegarse formaba una bóveda de base poliédrica (Morales, C. C., 2013a) (<https://www.bfi.org/>).



**FIGURA 14.** Trípodes poliédricos articulados (1953), Buckminster Fuller. Este prototipo se compone del principio de retracción del plegado del paragua. Imagen extraída y redigitalizada de <https://www.bfi.org/>, Morales, C. C. (2018).

A partir de la década de los años cincuenta y sesenta, la arquitectura ligera de mallas espaciales móviles tomó dos caminos claramente definidos, aunque relacionados entre sí. Uno siguió el desarrollo de sistemas estructurales de mallas reticuladas plegables iniciadas por Fuller; y el otro, seducido por las propiedades de la catenaria (los sistemas estructurales de mallas espaciales y membranas tensadas). Este ámbito de la arquitectura había sido inexplorado hasta que, en 1958, Frei Otto realiza su tesis doctoral “Das Hängende Dach” (Cubiertas colgantes), iniciando un nuevo campo de conocimiento con bases técnicas en la teoría de los cables de acero y los puentes colgantes (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2010a) (<https://www.tdx.cat>).

En 1966, Frei Otto diseña la cubierta para el Open Theater in Bad Hersfeld que abracaría un área de 1315 m<sup>2</sup> (figura 15). Esta cubierta retráctil consiste en el diseño de un sistema móvil de cables y poleas que permite desplegar una membrana textil desde una posición compacta hasta su completo despliegue y tensado, todo soportado por un mástil central, en cuyo extremo superior se aloja la cubierta cuando está totalmente plegada. Para el diseño del proceso de despliegue de esta cubierta, Otto utilizó el método de catenaria colgante representada en una malla de cadenas (Llorens, J. I., 2011) (Morales, C. C., 2013a) (<https://www.tdx.cat>).

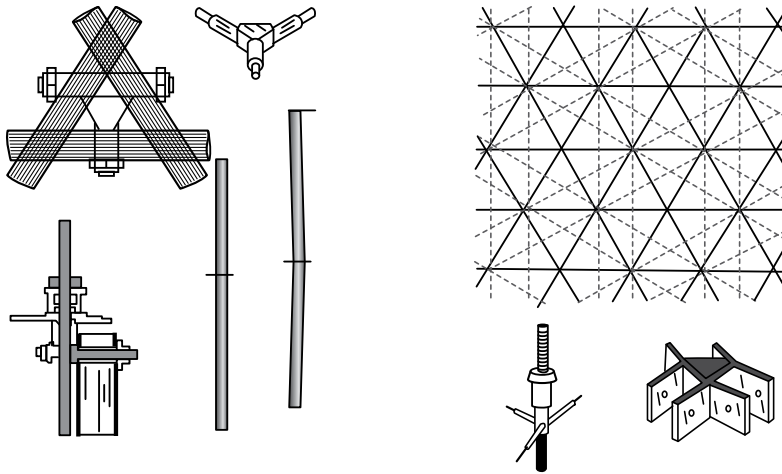


**FIGURA 15.** Open Theater in Bad Hersfeld (1966), Frei Otto. Mecanismos de cables y poleas para desplegar la membrana usando la catenaria como base del diseño del proceso. Imagen extraída y redigitalizada de Rodríguez, N. (2007), Morales, C. C. (2018).

En 1961, el arquitecto español Emilio Pérez Piñero (1935-1972) diseñó una estructura de rápido montaje basada en una bóveda reticular, se despliega sin necesidad de ser armada ni precisa de andamiajes, siendo prefabricada totalmente en taller. Esta innovación consistió en diseñar un sistema de nudos pasantes, en el que los nudos de los extremos y los del medio son atravesados por las barras haciéndolos pivotantes, naciendo así un nuevo y amplio campo de investigación de las estructuras transformables reticulares (<http://docplayer.es>).

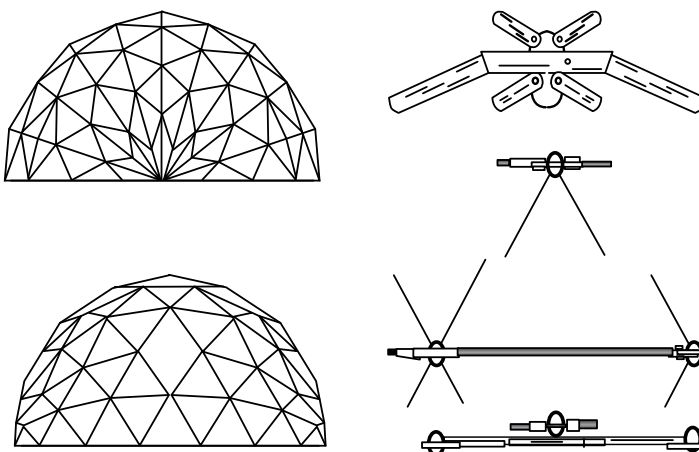
En 1965, Piñero patentó bajo el N.º 3.185.164 estas bóvedas reticulares con el nombre “Three dimensional reticular structure” (figura 16). Están fundamentalmente constituidas por un conjunto articulado de barras rígidas, capaces de plegarse hasta un apretado haz susceptible de extenderse, adoptando la forma curva deseada (<https://www.tdx.cat>).

El paquete inicial se expande, crece y levanta soportando las tensiones internas de la propia estructura durante este proceso. Estas estructuras precisan de mecanismos para desplegarse, pudiendo realizarse desde el propio camión de transporte, siempre y cuando éste cuente con plataforma o una torre que sea capaz de elevar la clave hasta llegar a su posición definitiva. El despliegue también puede realizarse desde el suelo valiéndose de ruedas y elementos auxiliares de elevación (andamios o grúas) (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2013a, 2015a) (<http://www.perezpiñero.org/>) (<https://www.tdx.cat>).



**FIGURA 16.** Nudos pasantes articulados (1965), Emilio Pérez Piñero. Están fundamentalmente constituidas por un conjunto articulado de barras rígidas, capaces de plegarse hasta un apretado paquete y susceptible de extenderse adoptando la forma curva deseada. Imagen extraída y redigitalizada de Nelson, R. (2007), Morales, C. C. (2015a).

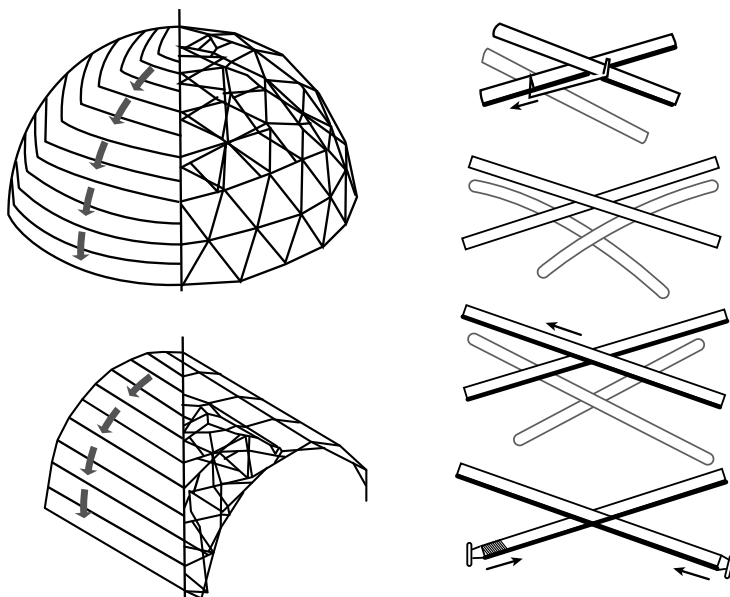
En 1967 Albert Moore patentó un sistema de cúpula llamado “Preassembled structural framework”, la invención consiste en una bóveda triangulada (figura 17) de doble curvatura, con un tipo de nudo formado por un aro al cual llegan todas las barras (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2013a) (<https://www.tdx.cat>).



**FIGURA 17.** Bóveda triangulada de doble curvatura (1967), Albert Moore. La invención consiste en una bóveda triangulada, de doble curvatura con un tipo de nudo formado por un arco, al cual llegan todas las barras. Imagen extraída y redigitalizada de <https://www.tdx.cat>, Morales, C. C. (2018).

En 1974 Theodore Zeigler diseñó su propia estructura patentada en 1977 con el N.º (U.S. 4.026.313), cuya base era el trabajo de Piñero (figura 18). La innovación de Zeigler consiste en que es una estructura autoportante en su forma desplegada, que no requiere de elementos adicionales como cables o barras rigidizadoras para bloquear el mecanismo. La característica principal es que las barras son radiales a partir de un punto interno central con nudos tipo tijera (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2017) (<https://www.tdx.cat>).

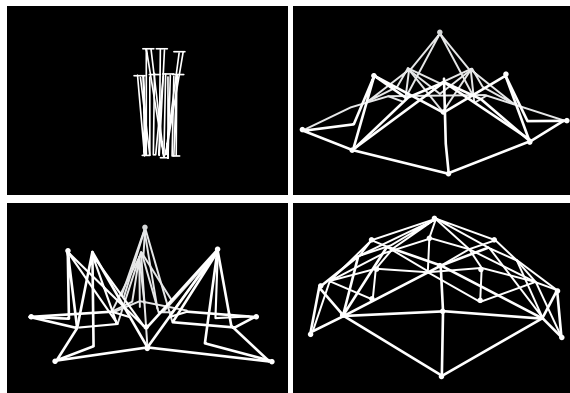
La estructura es autoportante debido esencialmente a que tiene un plano en común, cuando la estructura está desplegada puede ser conectada en sus nodos finales con otros módulos vecinos, resultando una bóveda de doble curvatura triangulada. Las barras son tan ligeras (aluminio) que pueden considerarse carentes de peso y las fuerzas exteriores actúan solo en los nudos (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2017) (<https://www.tdx.cat>).



**FIGURA 18.** Nudos pasantes articulados con sistema tipo tijera (1977), Teodoro Zeigler. La estructura es autoportante debido esencialmente a que tiene un plano en común, cuando la estructura está desplegada puede ser conectada en sus nodos finales con otros módulos vecinos, resultando una bóveda de doble curvatura triangulada. Imagen extraída y redigitalizada de <https://www.tdx.cat>, Morales, C. C. (2017).

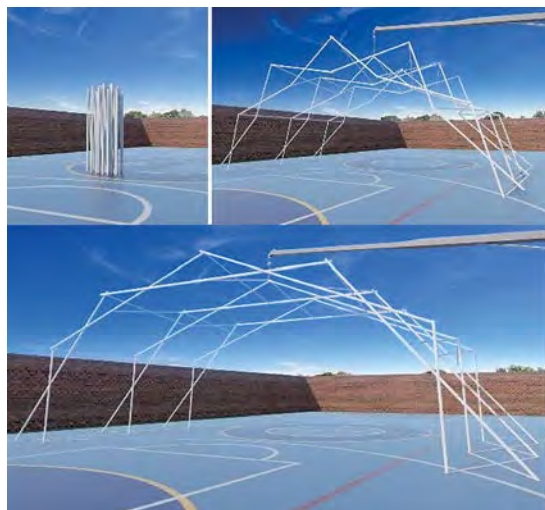
Para el año de 1980, el arquitecto español Santiago Calatrava realizó su tesis doctoral titulada “Zur Faltbarkeit Von Fachwerken”, sobre la plegabilidad de los entramados,

donde realiza un estudio geométrico de las estructuras construidas con entramados plegables a partir de módulos romboidales, poliédricos, cúbicos y esféricos (figura 19) (Morales, C. C., 2015, 2008) (<https://www.tdx.cat>).



**FIGURA 19.** Entramados plegables con módulos romboides, poliedros, cubos y esféricos (1980). Santiago Calatrava realizó un estudio geométrico de las estructuras construidas con entramados plegables a partir de módulos romboidales, poliédricos, cúbicos y esféricos. Imagen extraída y redigitalizada de <https://www.tdx.cat>, Morales, C. C. (2009).

En 1987 Carlos Hernández y Zalezky desarrollaron la tesis “Deployable Structure” (Estructuras transformables) en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), posteriormente en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC) edificaron el prototipo ESTRAN1 (figura 20). Estos estudios consolidan las estructuras transformables como un sistema estructural viable, ya que resuelven problemas constructivos, de montaje, proceso de despliegue, de estabilidad estructural, resistencia al desgaste, diseño de nudos, accesorios para rigidez y cubierta (Morales, C. C, 2014c) (Rodríguez, N., 2007) (<https://www.tdx.cat>).



**FIGURA 20.** Desarrollo de nudo tipo tijera y la bóveda de cañón largo (1987-1992). Hernández, C. y Zalezky, W. Entramados plegables con módulos. Imagen extraída y redigitalizada de <http://www.grupoestran.com>, <https://www.tdx.cat>, Morales, C. C. (2018).

El prototipo ESTRAN1 es una retícula espacial transformable proyectada sobre un cilindro, produciendo una bóveda de cañón cuyo largo cubre un área de 112 m<sup>2</sup> (8 × 14 m) con una altura de 7 m y un peso de 800 kg para un total de 7 kg/m<sup>2</sup>. Está formado por tres arcos plegables en paralelo unidos por miembros tipo tijera, a su vez estos arcos se unen por medio de un nodo cúbico que conecta a los elementos tipo tijera, dichos miembros estaban puestos en cada cara plana del nodo y conectados por un col roll en sus diferentes aberturas, lo cual ayudará a generar la articulación de los miembros plegables en los dos sentidos de la cubierta (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2014c) (<https://www.tdx.cat>).

Más adelante en 1992, Hernández y Zalewsky vuelven a marcar referencia en el mundo de las estructuras transformables, con el diseño de la estructura del Pabellón de Venezuela para la Expo Sevilla 92, donde la novedad consistió en el diseño del nudo tipo bisagra que permitió fabricar en Venezuela la estructura transformable más grande hasta ahora construida, transportarla a España y erigirla en 24 horas (<http://www.legadoexposevilla.org>) (<https://www.tdx.cat>).

Indiscutiblemente la innovación que permitió el desarrollo de las estructuras transformables articuladas fue el invento del sistema de tijeras tanto rectas como curvas, lo que dio origen a una gran cantidad de tipos de cúpulas. La desventaja de este sistema es que durante el proceso de montaje las barras son sometidas a grandes esfuerzos de corte y flexión que pueden llevar al colapso de la estructura.

Entre los trabajos que destacan son los realizados por los arquitectos españoles Félix Escring y Luis Sánchez. Escring patentó en 1984 “El sistema modular para la construcción de estructuras espaciales desplegables de barras” y en 1994 la “Cubierta modular desplegable”, además de aportar producción bibliográfica sobre temas textiles y transformables (Escrig, F., 1997) (Morales, C. C., 2015a).

Por otra parte, el arquitecto Luis Sánchez con su propuesta geométrica logra que las barras pasen de su estado cerrado a su estado desplegado, sin que se produzcan tensiones internas. Su descubrimiento radica en el diseño del nudo que mantiene su posición vertical durante todo el proceso y no radial a la circunferencia del arco como sucede en otras estructuras (Escrig, F., 2012).

Ramón Sastre realizó su tesis doctoral sobre “Diseño y cálculo de estructuras de barras articuladas con grandes deformaciones” en 1981, cuyas aportaciones fueron para el desarrollo del software para el cálculo de la arquitectura textil. En 1986 el arquitecto José Ignacio Llorens presentó su tesis sobre “Anclajes pasivos de estructuras traccionadas” haciendo novedosas aportaciones acerca de métodos de cálculo de anclajes pasivos y su clasificación (<http://www.tdx.cat>).

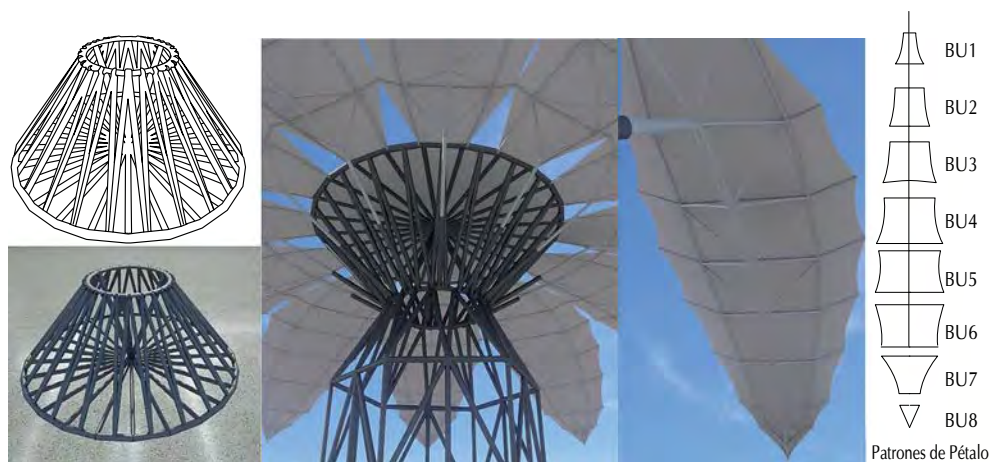
Recientemente, en el 2001, el arquitecto Emilio Martín Gutiérrez presentó en la Universidad de A Coruña su tesis doctoral “Estructura desplegable con módulo de haces y base cuadrangular”. En ella elaboró un sofisticado sistema de cálculo matri-



cial de barras, siendo el principal aporte el desarrollo de aplicaciones informáticas que simulan el comportamiento y estado de las barras de la estructura durante el proceso de desplegado.

En la línea de construcción de grandes estructuras plegables una referencia reciente es el pabellón de Venezuela en Expo 2000 Hannover, se constituye de una cubierta móvil y traslúcida proyectada por los arquitectos Fruto Vivas, José Ignacio Llorens, Hubertus Pöpinghaus y Charo García en colaboración con Frei Otto y la empresa Buró Happold (UK) (Rodríguez, N., 2007) (<http://www.tdx.cat>).

La cubierta simbólicamente análoga a una flor de 38 m de diámetro y 18 m de altura se construyó alrededor de un mástil central en celosía (figura 21), con una cubierta formada por 16 pétalos de membrana textil accionados mediante cilindros hidráulicos que permitían su apertura o cierre adaptando a las condiciones internas del pabellón y al clima de su entorno, medido mediante un sensor (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2014d, 2013f) (Llorens, J. I., 2001).



**FIGURA 21.** Pabellón de Venezuela para la Expo 2000 Hannover, Fruto Vivas. Es un edificio de contorno circular y 38 m de diámetro. Se organiza en una planta baja, la planta de piso y cuatro plataformas, alrededor de un mástil central, que contiene el ascensor y soporta la cubierta compuesta por 16 pétalos móviles, abiertos o cerrados, de acuerdo con las condiciones meteorológicas. Imagen extraída y redigitalizada de García-Diego, CH. (2008), Llorens, J. I. (2001), Morales, C. C. (2018).

Lo destacable e innovador de esta cubierta es el hecho de haber logrado trasladar dispositivos y mecanismos de otras industrias como la aeronáutica hacia la arquitectura. En el siguiente subtema se presenta una tabla resumen que expone esta línea de innovaciones (Rodríguez, N., 2007) (<http://www.tdx.cat>).

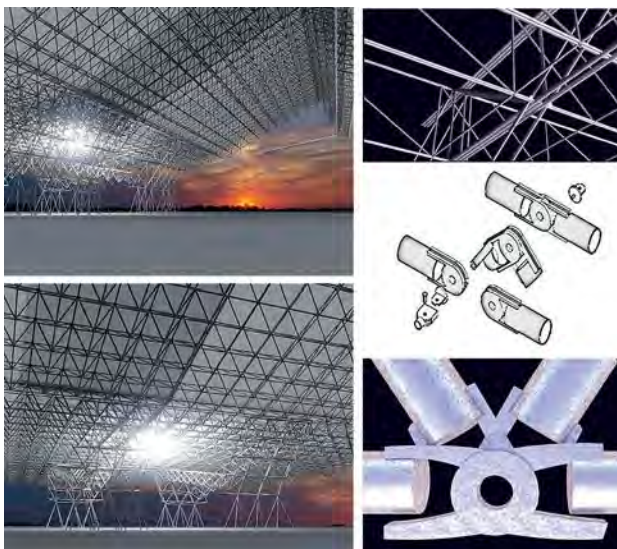


### 1.3. REFERENTES SOBRE SISTEMAS ARTICULADOS

En estas referencias afirmamos el estudio realizado anteriormente y observamos el método de construcción experimental que se tuvo con los sistemas plegables en algunos casos y sus capacidades de montaje en la manufactura para realizarlos; las fases de interacción que debemos tener en cuenta de este sistema para diseñarlo, construirlo y desarrollar la estructura plegable; debemos analizar cómo están unidos los miembros de la estructura para obtener esa transformación del sistema. Por lo que se llevó a cabo la búsqueda de referencias directas de los diferentes sistemas experimentales, para contribuir al entendimiento de estas estructuras, creando así una metodología constructiva que lleve al desarrollo y diseño de una estructura plegable.

#### Proyecto: hangar de aviones móvil para la Corporación de Atlas Air, 1945 Konrad Wachsmann

**Descripción.** Este proyecto realizado por el arquitecto Wachsmann muestra innovación en el sistema de nodos modulares al poder conectarse de manera muy rápida a sus miembros. Las conexiones pueden llegar a cubrir grandes espacios, ya que gracias a su geometría triangular presenta ligereza que se ve sustentada con nodos flexibles, por lo anterior, la manufactura de la estructura se vuelve fácil. Con todo ello la estructura obtiene su característica principal “rápido montaje” (figura 22) (Morales, C. C., 2015a).

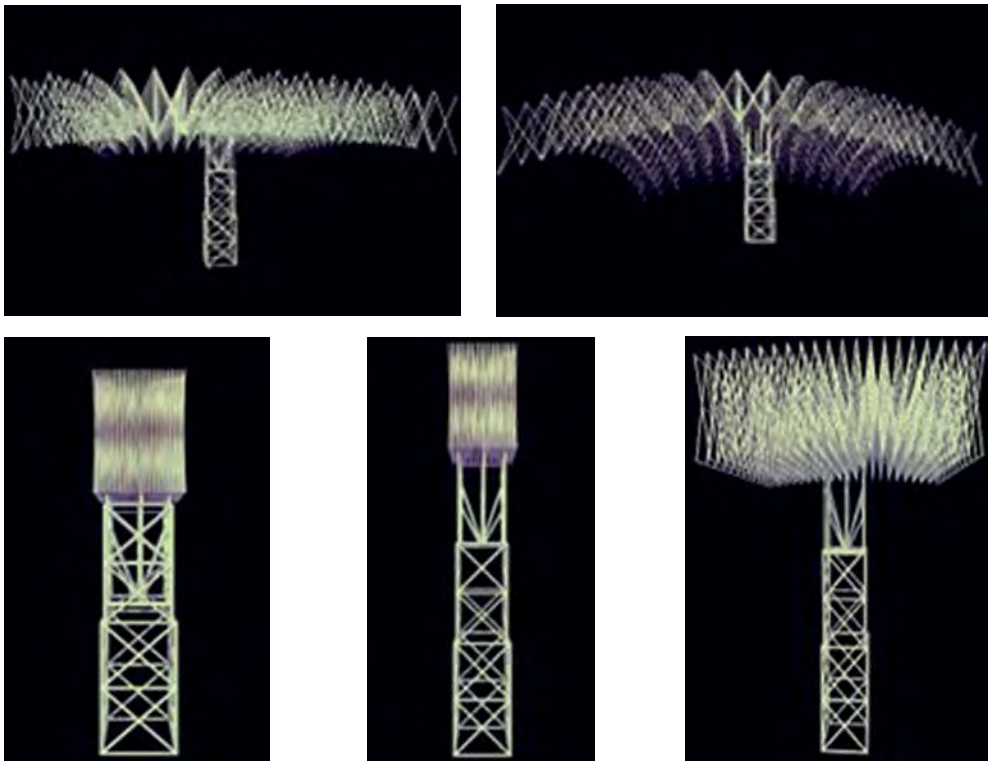


**FIGURA 22.** Arquitecto Konrad Wachsmann, Estados Unidos (1945). Imagen extraída y redigitalizada, Morales, C. C., 2015a.

**Características del sistema.** Estructura rígida montable, cuyo proceso de montaje es rápido gracias a que los nodos se ensamblan fácilmente con los demás componentes. Es una de las primeras aportaciones en la elaboración de estructuras transformables debido a la rapidez de su armado (<https://www.britannica.com/>).

### Proyecto: Teatro transportable, Emilio Pérez Piñero, 1961

**Descripción.** El teatro transportable desarrollado por el arquitecto Emilio Pérez Piñero fue presentado en el Congreso UIA, en Londres, en 1961, ganador del primer premio por la innovación del desarrollo de estructuras transformables. El proyecto presentaba un menor uso de material y puede cubrir grandes espacios rápidamente. Este fue uno de los primeros sistemas que detonó su línea de investigación, siendo una solución veraz y efectiva donde el nodo se adecuaba perfectamente a la geometría esférica (figura 23).



**FIGURA 23.** Arquitecto Emilio Pérez Piñero, Inglaterra (1961). Imagen extraída y redigitalizada. Fuente: <http://www.perezpinero.org/>, Morales, C.C. (2018).

**Características del sistema.** El modelo se despliega bajo la geometría esférica de una cúpula, sostenida de una gran columna central que funciona como un sistema de retracción de paragua y que se conectará en sus cuatro puntos, dicha retícula unida por nodos estándares que facilitaban la manufactura del prototipo (Morales, C. C., 2013a, 2015a) (<http://www.perezpinero.org>).

### Proyecto: Teatro Ambulante Calasparra, Emilio Pérez Piñero, 1966

**Descripción.** En el año 1966, Emilio Pérez recibió el encargo del Ministerio de Información y Turismo de España para realizar un teatro transportable destinado a festivales en España. Se buscaba construir un recinto capaz de albergar a 1,800 espectadores y que tuviese todos los elementos necesarios para realizar representaciones y, lo novedoso, que fuese desmontable y transportable fácilmente.

Emilio optó por una solución de dos cúpulas reticulares interceptadas (figura 24), el cual cubriría una mayor área de construcción. Dicho dispositivo lo construyó en Calasparra, adiestrando a una serie de artesanos locales a quienes enseñó la construcción y el montaje de las piezas que componían la estructura (Morales, C. C., 2013a, 2015a) (<http://www.calasparra.org>).



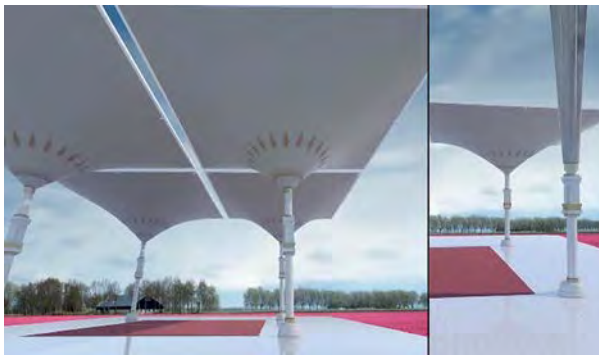
**FIGURA 24.** Arquitecto Emilio Pérez Piñero, España (1966). Imagen extraída y redigitalizada de <http://www.perezpinero.org/>, Morales, C. C. (2018).

**Características del sistema.** El mecanismo es de aspas con uniones articuladas para que puedan transformarse rápidamente y ser utilizado en unas cuantas horas. La facilidad del montaje ahorra tiempo y herramientas para su ejecución en la obra, su éxito principal fue la fácil manufactura de sus componentes (<http://www.perezpi-nero.org/>).

### **Proyecto: Paraguas retractiles en la mezquita, en Arabia Saudí, Bodo Rasch, 1971**

**Descripción.** A la mezquita de Medina se le añadieron 27 cúpulas móviles que combinan la estética tradicional islámica con la tecnología más avanzada. La primera etapa se desarrolló dentro de los patios del edificio y logró la integración con la edificación. La segunda etapa se realizó en los atrios de los tribunales externos, se colocaron 250 paraguas sombreados, mejorando un espacio que alberga 106,000 m<sup>2</sup> (figura 25).

Una estructura de paraguas abierto solo abarca un área de 625 m<sup>2</sup>. El revestimiento fue hecho de PTFE debido a que los componentes de cada paraguas son muy grandes, añadiendo a esto la necesidad de soportar posibles condiciones climáticas extremas. Este material deja pasar una cierta cantidad de radiación solar calorífica (Morales, C. C., 2017) (<https://sl-rasch.de>).



**FIGURA 25.** Arquitecto Bodo Rasch, Arabia Saudita (1971). Imagen extraída y redigitalizada de <https://sl-rasch.de/portfolio/umbrellas/>, Morales, C. C. (2018).

**Características del sistema.** Los revestimientos de los brazos y de los accesorios del recubrimiento se construyen a partir de una estructura de sándwich metálico, compuesto ligero de fibra de vidrio laminado de resina epoxi, que proporciona una alta rigidez torsional; las cuales fueron fijadas a los sistemas flexibles de soporte de las sombrillas.

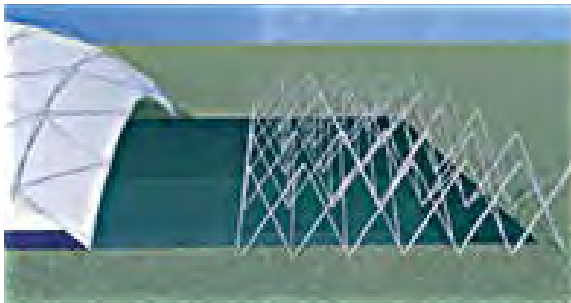
Cuando está cerrado, los brazos cubren la membrana mientras que los revestimientos adicionales de su parte superior forman una carcasa prismática para proteger la membrana de teflón plegada. Los paraguas se abren o cierran simultáneamente mediante el uso de un motor eléctrico.

El proceso de construcción del revestimiento de material compuesto es con diseños técnicos de molde, para la pieza que finaliza en el suelo es de baldosa de metal. El despliegue de los brazos metálicos se ejecuta con un motor eléctrico cargado de energía fotovoltaica que está colocado en el brazo del paraguas (<https://sl-rasch.de>).

### Proyecto: Cubierta olímpica desplegable para el deportivo San Pablo, Félix Escrig, 1994

**Descripción.** Escrig diseñó una cubierta desmontable para cubrir una piscina olímpica. Encontró la posibilidad de usar una estructura desplegable de aspas de módulo cuadrado y superficie esférica. Esta estructura la resuelve con dos casquetes esféricos cortados por cuatro planos verticales y conectados por uno de sus planos (figura 26).

La estructura es totalmente de aluminio y está conformada por aspas, dos barras  $\varnothing 50.5$  mm conectadas por un pasador intermedio, en sus extremos se une con nudos también de aluminio, lo que le ofrece más ligereza para retraerse y poder montarse en un espacio de gran envergadura.



**FIGURA 26.** Dr. Félix Escrig Pallares, España (1994). Imagen extraída y redigitalizada de Escrig, F. (2012), Morales, C. C. (2013e).

**Características del sistema.** La estructura está compuesta por grupos de barras de un casquete esférico, se empaqueta junto con el material textil ocupando un volumen

de  $2.5 \times 2.5 \times 5$  m de altura. Una vez desplegado cubre una superficie de  $30 \times 30$  m, toda la estructura metálica se encuentra al exterior para no ser afectada por los vapores de cloro, el material textil es una malla de fibra de poliéster recubierta de PVC.

El proceso de montaje es sencillo, cada módulo se despliega tirando hacia arriba 8 nudos de la estructura, esto se realiza con una grúa y una cuadrilla que ancla cada nudo perimetral manualmente, el montaje completo de la estructura se lleva a cabo entre tres y cuatro días (Escrig, F., 1995, 1997, 2012).

### **Proyecto: MODUNAM, prototipo para espacios emergentes, Juan Gerardo Oliva Salinas, 2003**

**Descripción.** Cubierta ligera con base en geometría de doble curvatura, constituidas de marcos de acero tubular de alma abierta, con estructura de acero inoxidable desmontable, el montaje puede realizarse en horas. Puede ser transportado muy fácilmente a diferentes puntos de la ciudad. Fue realizado para espacios emergentes o eventos académicos para la UNAM.



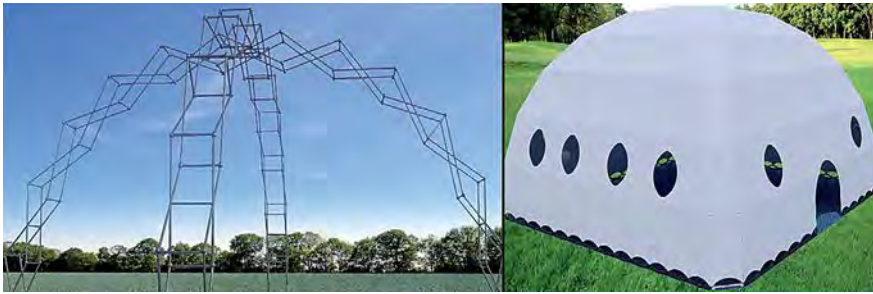
**FIGURA 27.** Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas, México, 2003. Imagen extraída y redigitalizada de <https://arquitectura.unam.mx/estructuras.html>, Morales, C. C. (2018).

**Características del sistema.** Sirve para varias funciones espaciales, fácil de transportar e instalar. La estructura cuenta con dos arcos de alma abierta que tensan la membrana (velaria), están sujetas por cables y apoyadas por anclaje (figura 27). Los arcos se unen por cables que tensionan y estabilizan el módulo; el montaje es de siete horas y desmontarlo lleva cinco horas, esta flexibilidad de estructura tiene ventajas muy útiles para otros espacios (Morales, C. C., 2017) (<https://arquitectura.unam.mx/estructuras.html>).



### Proyecto: MODUNAM II, prototipo para espacio de emergencia segunda fase, Juan Gerardo Oliva Salinas, 2004

**Descripción.** El desarrollo de este prototipo se derivó del MODUNAM I, Salinas mejoró la capacidad de izaje y agregó el concepto de plegabilidad al diseño, sustentado por la idea de obtener espacios para emergencia en las costas o zonas de inundaciones, y que funcione para albergar varias personas. También tiene la capacidad de modularse y repetirse varias veces hasta formar un sistema complejo, creando espacios de fácil de montaje.



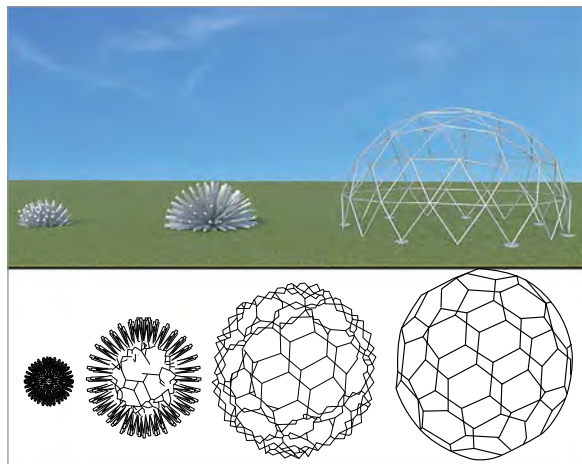
**FIGURA 28.** Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas, México, 2004. Imagen extraída y redigitalizada. Fuente: <https://arquitectura.unam.mx/estructuras.html>, Morales, C. C. (2018).

**Características del sistema.** Está constituida por dos arcos unidos en el centro con un anillo de compresión, su forma geométrica es derivada de la catenaria y esto complica la generación de la estructura, ya que es una curva (no modular como el círculo) que cambia las longitudes de los miembros (figura 28).

El montaje se realiza desplegando los miembros flexibles desde el anillo de compresión, y se asienta en un basamento metálico que ayuda a soportar la estructura. Los componentes fueron manufacturados con aluminio estructural para no tener sobre peso y poder manipular su construcción (Morales, C. C., 2017) (<https://arquitectura.unam.mx/estructuras.html>).

### Proyecto: Geodésica plegable. Chuck Hoberman, 1991-2000

**Descripción.** La esfera de Hoberman es una estructura inventada por Chuck Hoberman, se inspiró en el modelo de cúpula geodésica. La peculiaridad de esta forma estructural es la capacidad de plegarse a través de un sistema de uniones que se mueven como la articulación de una tijera (figura 29).



**FIGURA 29.** Arq. Chuck Hoberman, Suecia, 1991-2000. Imagen extraída y re-digitalizada de <http://www.hoberman.com/>, Morales, C. C. (2018).

**Características del sistema.** Esta estructura se compone de un icosidodecaedro que tiene 20 caras triangulares y 12 pentagonales, 60 aristas y 30 vértices; los vértices son los que se articulan para formar las uniones flexibles y así sus miembros puedan plegarse, cada unión se encaja con las anteriores como una estructura de acordeón similar a la de un espejo plegable. Esto permite la amplia variación dimensional. La mayor esfera de Hoberman construida se encuentra en el Liberty Science Center de Jersey City con un diámetro de 5,5 m (abierta), elaborada en aluminio y apenas pesa 320 kg (Morales, C. C., 2017) (<http://www.hoberman.com/>) (<http://microarquitectura.org>).

### Proyecto: Cubierta plegable en Gerona, Luis Sánchez Cuenca, 2006

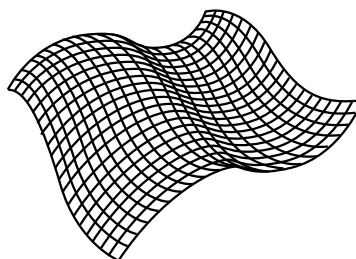
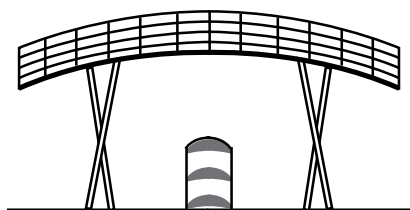
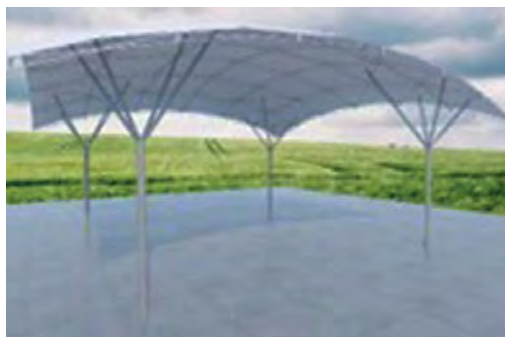
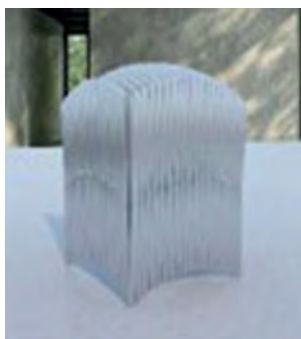
**Descripción.** Es una lámina flexible e impermeable que se enlaza a la estructura en cada uno de sus nudos. La cubierta se pliega simultáneamente con la estructura recogida por los propios tensores.

La extensibilidad de la cubierta presenta algunas singularidades: las diagonales de las caras cuadrangulares (no próximas al centro) sufren extensiones máximas previas a la extensión total de la estructura, y en longitud superior a la de la posición final extendida, lo cual se ha de considerar en el diseño de la cubierta.

**Características del sistema.** Es una estructura de barras articulada. Las barras son de tubo de 0.25 mm × 2 mm de grueso, están cortadas en forma recta y perforada para incorporarse a los nudos. El agujero central siempre es equidistante de los extremos. Hay 10 longitudes de barras que se agrupan por parejas. Cada pareja suma una longitud de 3, 2007 m, que coincide con la del eje mayor de la elipse base (figura 30).



El nudo tiene tres ejes ortogonales entre sí, la fijación entre nudos y barras se realiza mediante pasadores, descartándose el uso de tuercas por la movilidad de las barras. La posición final de la estructura desplegada se asegura mediante tensores, los de la parte superior aseguran la estructura mientras queda colgada; los tensores de la parte inferior aseguran la estructura una vez apoyada al suelo. Los tensores superiores e inferiores son idénticos.



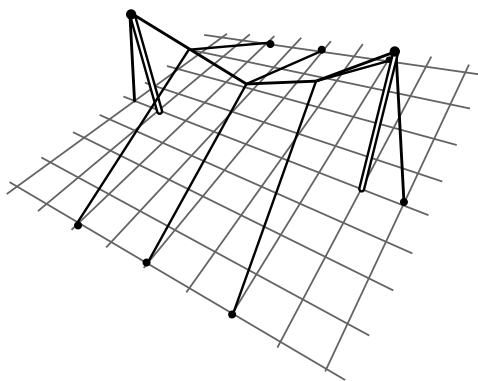
**FIGURA 30.** Dr. Luis Sánchez Cuenca, España (2006). Imagen extraída y redigitalizada, Morales, C. C. (2009).

Hay cinco longitudes diferentes. Los tensores verticales se fijan a la estructura y aseguran que las barras trabajen solo a compresión, miden 0,4142 m (espesor nominal de la estructura). La célula estructural queda compuesta por un paralelogramo, sus cuatro lados son tensores y las diagonales son las barras (Morales, C. C., 2009) (Sanchez-Cuenca, L., 1996).

## 1.4. TABLA DE REFERENCIA HISTÓRICA

En esta sección resumimos las aplicaciones que tendrá este estudio en cuanto a su concepción, se mostrarán tres conceptos que fueron importantes para el desarrollo histórico de la arquitectura transformable.

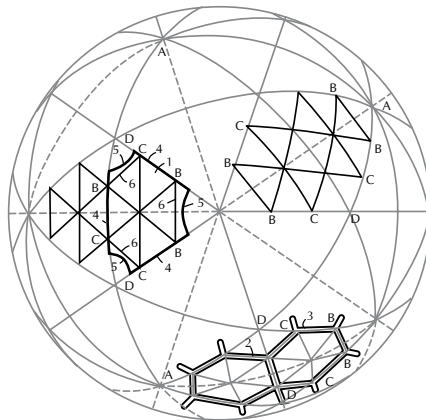
**Flexibilidad.** En la primera sección de la línea de tiempo se ubicó a los beduinos como una de las culturas que utilizaron materiales textiles para autoconstruir sus espacios provisionales; de igual manera, el coliseo romano representó otra aplicación de estructura provisional flexible (figura 31) que tiene concentraciones funcionales y prácticas para un espacio arquitectónico más adecuado, dejando como principio que la estructura debe ser flexible para adecuar su espacio a otros requerimientos (Morales, C. C., 2013e).



**FIGURA 31.** Tribu beduina, Península arábiga. Imagen redibujada de <http://aguiluchos.net/2017/may/beduinos.php>, Morales, C. C. (2009).

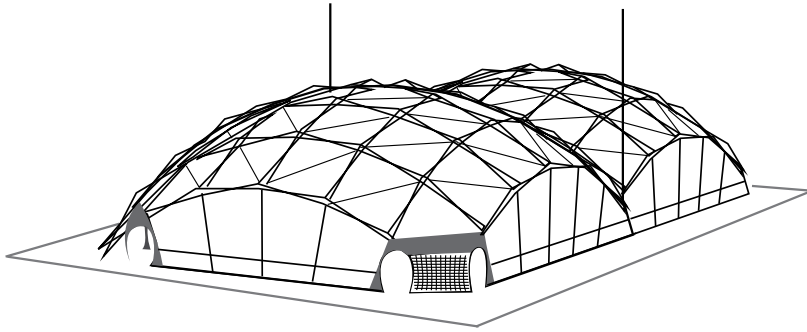
**Prefabricación.** En la segunda etapa de la línea de tiempo se presenta el uso de la geometría aplicada en la tecnología industrial (figura 32), con el descubrimiento de materiales más resistentes y ligeros aparecieron infinidad de prototipos prefabricados que ayudaron a construir espacios grandes en tan poco tiempo.

De ahí los aportes del arquitecto Emilio Pérez Piñero y el ingeniero Fuller, con sistemas ligeros y eficientes para cubrir espacios arquitectónicos en horas. Estas aplicaciones demuestran que una estructura prefabricada bien geometrizada y diseñada sirve para varias funciones y se adecúa a diferentes entornos muy fácilmente (Morales, C. C., 2013e).



**FIGURA 32.** Ing. Buckminster Fuller, USA (1950). Imagen redibujada de <https://www.bfi.org/>, Morales, C. C. (2009).

**Transformación.** En la última etapa se dice que las estructuras plegables toman el requerimiento de transformación del espacio, debido a la demanda de espacios dinámicos y multifuncionales en la sociedad (figura 33). En la actualidad se desarrollan pocos sistemas plegables a causa de su difícil manufacturación e interpretación de análisis estructural, por lo que existen pocas estructuras de este tipo (Morales, C. C., 2013e).



---

**FIGURA 33.** Dr. Félix Escrig Pallares, España, 1994. Imagen extraída y redibujada de Escrig, F. (2012), Morales, C. C. (2013).

---

En este campo de investigación y desarrollo, aparece el Dr. Feliz Escrig, que es uno de los exponentes más trascendentes en la actualidad, quien realiza estructuras transformables de manera aplicada y eficiente. Cabe mencionar que en el desarrollo de su investigación deja pautas para seguir innovando en la aplicación de estructuras plegables.

Por lo tanto, el estudio de la línea de tiempo es analizada a profundidad, para poder realizar las siguientes experimentaciones y formalizar una serie de pasos que ayudarán al diseñador a proponer este tipo de sistemas estructurales (Morales, C. C., 2013e).

# Diseño y búsqueda de la forma

### 2.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las estructuras compuestas por elementos traccionados y comprimidos son altamente eficientes por el gasto mínimo de material que requieren, característica que les da la capacidad de cubrir grandes claros. A lo largo de la historia, el hombre se ha servido de la fuerza de gravedad para conseguir la estabilidad.

Las bóvedas y cúpulas de la antigüedad, construidas con piedras y ladrillo (elementos constructivos que trabajan predominantemente a compresión), representan un sistema constructivo desfavorable entre la relación del peso propio y la resistencia; es decir, para asegurar la resistencia de la estructura era necesaria la construcción de muros de grandes espesores, lo que producía que el peso propio fuera superior al de las cargas externas (nieve o viento) que la estructura debía resistir, lo que originaba grandes masas de materiales nada funcionales para los espacios arquitectónicos.

Con la aparición de materiales eficientes, ligeros y de alta resistencia fue posible la reducción de espesores de estas construcciones, hoy la realización de una cúpula respecto a su peso propio representa incluso menor peso al aire que envuelve. Tal es el caso de la cubierta “The Eden Project” en Inglaterra, diseñada por el arquitecto Nicholas Grimshaw, la cúpula está construida con base en almohadones neumáticos de lámina plástica de poco espesor, con aire comprimido internamente y estructura de marcos de aluminio (Banco, A., 2007) (Broto, C., 2006) (Morales, C. C., 2013e).

Este gran avance en el mundo de las estructuras fue posible al manufacturar materiales cuyo peso propio y rigidez son casi despreciables y elaboradas bajo una lógica estructural que los hace poco deformables, aun estando solicitadas por cargas externas. Esta aparente resistencia se logra bajo un buen diseño geométrico de las estructuras, encontrado formas que favorezcan el equilibrio estructural del diseño; con esto se mejora la distribución de los esfuerzos.

Este estudio está dedicado a la creación de sistemas plegables tensados capaces de replegarse, desplazarse y erigirse en otro lugar, con posibilidades de adaptarse

en casi cualquier entorno. Por ello requiere la utilización de geometrías como la parábola, la catenaria, la circunferencia, la elipse; este tipo de formas ayuda a cubrir grandes claros y favorecen a estandarizar algunos miembros de su estructura (Morales, C. C., 2013e).

Es por lo anterior que se presentó la descripción de diferentes líneas de innovaciones, que permitieron llegar al estado del conocimiento actual. Los significativos antecedentes se inician a partir de la utilización de materiales como el hierro fundido que, después de varias nuevas aleaciones, dieron resultado a un acero más resistente, como el aluminio, el acero inoxidable y cables de acero de alta resistencia, que permitieron cubrir grandes claros gracias a su ligereza y alta resistencia.

Otro punto es el desarrollo metodológico que se tendrá en esta investigación, en este caso la adecuación geométrica de las estructuras plegables, así como también los fundamentos metodológicos basados para crear sistemas transformables, analizado en las primeras etapas de este trabajo y que son referidas específicamente a entender las herramientas metodológicas de diseño de este sistema estructural. La metodología para obtenerlos incluye actividades bibliográficas-descriptivas y experimentales (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2013e) (<http://www.tdx.cat>).

Es de destacar que esta investigación tiene una orientación eminentemente tecnológica, propiciando el desarrollo de la construcción experimental en estructuras de rápido montaje. Partiendo de directrices como: 1. La geometrización de modelos plegables, que encontrarán respuestas a lo largo del trabajo. Posteriormente, se desarrollan dichos modelos que puedan simularse con un software. 2. Realizar un análisis geométrico del mecanismo de movimiento, para determinar el proceso del despliegue y puedan ubicarse dentro del campo de las estructuras transformables, ya que precisan de mecanismos articulados en las uniones que les permita desplegarse y retornar a su estado inicial. 3. Ordenar sistemáticamente los tipos de estructuras transformables, haciendo una propuesta que incluye dentro de esta categoría las cubiertas plegables tensadas. Esta clasificación no debe considerarse como definitiva, sino como un punto de partida. 4. Obtener parámetros relevantes que ayudarán a proponer y definir aproximaciones o resultados de los estudios previamente analizados, con el objetivo de demostrar la viabilidad de una propuesta teórica-práctica, por ello se realizarán experimentaciones con modelos a escala de diferentes materiales para que proporcione parámetros de diseño sobre su comportamiento estructural y constructivo (Morales, C. C., 2013e) (Rodríguez, N., 2007) (<http://www.tdx.cat>).

Para ello, se realizarán prototipos a escala que se desarrollarán con las herramientas metodológicas encontradas y se mejorarán con una propuesta geométrica más rápida, analizada con rigor científico a fin de comprobar si la utilización de dicha geometría sirve para el diseño preliminar de las cubiertas plegables; por ello se cons-

truirán modelos físicos y digitales para que así se verifique el proceso constructivo de la geometría propuesta en este estudio y verificar su desarrollo en el despliegue de la cubierta. Igualmente se presentarán las ventajas y desventajas de este desarrollo geométrico en las que se buscará realizar y reajustar la forma para determinar su modelo final constructivo.

## 2.2. MAPA CONCEPTUAL

En la arquitectura actual hay una gran variedad de desarrollos tecnológicos industriales, que aportan una diversidad de sistemas estructurales que pueden concebir un espacio arquitectónico, que se requiera transformar de lo habitual a las nuevas necesidades del usuario para proporcionar una mejor calidad de vida.

En el presente la edificación tiende a ser más esbelta y de fácil evolución, lo que implica el diseño de un sistema estructural más ligero y de rápida transformabilidad, para conseguir esto, es necesario contar con un mapa conceptual que se usará como guía aproximada y obtener los resultados más adecuados para este tipo de estructuras.

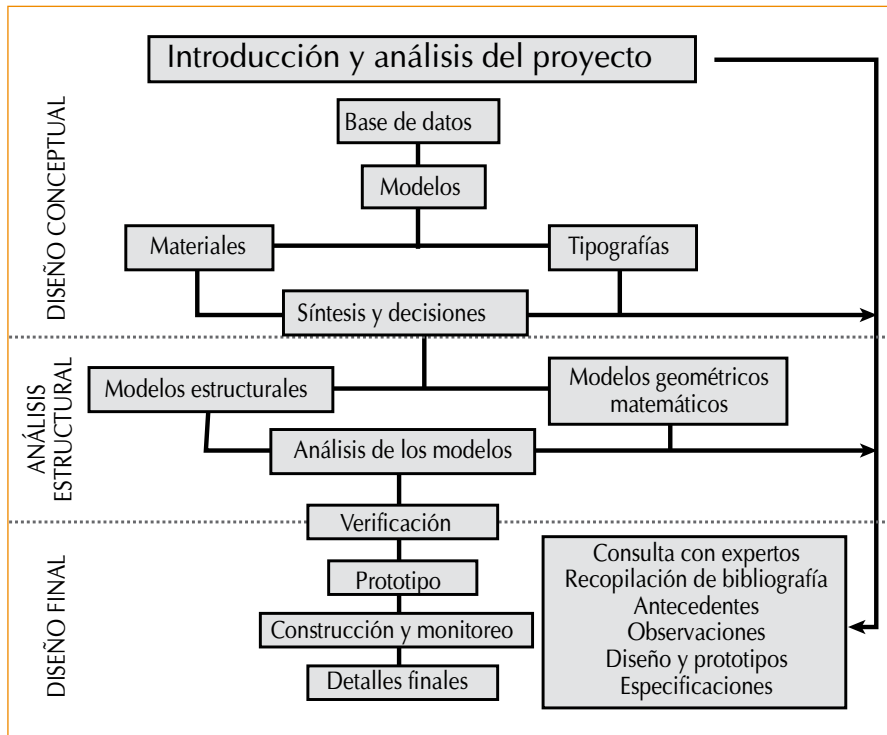
Para lograr la concepción de la forma con mayor exactitud en los sistemas plegables se tomarán tres etapas de desarrollo. Primeramente, se abordará el *Diseño conceptual*, el cual buscará y desarrollará una base de datos, en donde los métodos teóricos de diseño ayudarán a definir las diferentes tipologías de sistemas transformables y materiales que se pueden utilizar, por lo cual el siguiente paso se apoya en la geometrización de la estructura. Existen métodos para proyectar este tipo de geometrías como el propuesto por el Dr. Félix Escrig y el Arq. Emilio Pérez Piñeiro, etc., los cuales ayudan a encontrar la forma adecuada, por lo tanto, se hará uso, del método por modelación matemática de Félix Escrig, para aproximar y adecuar una propuesta y proponer un método geométrico descriptivo, que pueda facilitar la construcción modular de un sistema plegable.

La siguiente etapa es el *Análisis estructural*, para ello se contempla el uso del software especializado para desarrollar modelos estructurales y modelos geométricos que tomen en cuenta la tipología del diseño conceptual, la simulación de los modelos en este tipo de sistemas estructurales implica el diseño de detalles constructivos aproximados para perfeccionar las uniones de la cubierta plegable, ya que el detalle de unión es crucial para la construcción de estos sistemas estructurales transformables. En dichos puntos se analiza de manera precisa la distribución de los esfuerzos que actúan sobre ellas, para evitar los movimientos desfavorables a la hora de izamiento, con esto se consigue una mayor eficiencia en el desplegado de sus partes y por añadidura.

El principal logro de esta investigación se basará en el *Diseño final*, por lo que la elaboración de prototipos experimentales ayudará a verificar el manejo de los siste-

mas de transformación y construcción de una estructura plegable, con el objetivo de que se puedan realizar los detalles constructivos finales para su manufacturación y así sea más eficiente para monitorear su comportamiento estructural en los espacios arquitectónicos y compararlos con el uso de otros sistemas (Morales, C. C., 2017).

Para tener una idea de cómo diseñar este tipo de estructuras se considera una recomendación del experto en la materia de cubiertas ligeras (figura 34), en la que podemos observar que el Dr. H. Berger provee una serie de parámetros aproximados para encontrar los pasos del diseño de una estructura ligera. Esta tabla servirá como referencia para elaborar el desarrollo de la propuesta constructiva del sistema y la metodología de diseño de un sistema plegado tensado (Berger, H., 1996) (Candela, F., Escrig, F., 1993).



**FIGURA 34.** Desarrollo del esquema conceptual del procedimiento de diseño de un sistema plegado tensado, basado en el esquema del Dr. H. Berger. Fuente: Light Structures, Berger (1996), Morales, C. C. (2017, 2013a).

## 2.3. LA PROBLEMÁTICA DEL DISEÑO

Es importante mencionar que este tipo de sistemas son cada vez más usados en la actualidad, debido al constante cambio de paradigmas en la arquitectura, basados en las necesidades que surgen para cubrir las diversas funciones de la ciudad y las zonas metropolitanas.

Los espacios arquitectónicos son cada vez más multifuncionales, lo que exige sean más grandes para ofrecer variadas funciones de manera simultánea. Esa es la razón para solucionar en este estudio el problema de diseño de este tipo de estructuras, por lo que se recurre a la propuesta de realización de una estructura plegable tensada, para cubrir un espacio grande y multifuncional.

La siguiente investigación está referida a las posibilidades que desde el punto de vista constructivo poseen los materiales susceptibles a ser plegados y su aproximación al problema estructural; enfocado sustancialmente hacia el diseño de cubiertas, donde la optimización del factor tiempo y rapidez de construcción son importantes.

Por tanto, este estudio se ubica en el campo del diseño constructivo y su desarrollo técnico en el área de las estructuras de rápido montaje, lo cual incluye estudiar los procesos de producción, crecimiento, transformación, ampliación, flexibilidad y reutilización, términos que se engloban en el concepto de adaptabilidad constructiva de un edificio.

Lo anterior expone los aspectos relacionados con el potencial del edificio, de responder activamente a diferentes necesidades del usuario y requerimientos constructivos. Esta forma de ver el hecho construido se traduce en construcciones ligeras. En este sentido, las estructuras de rápido montaje pueden ser un ejemplo de adaptación constructiva en un determinado entorno.

Una cubierta ligera de este tipo es fácil de transportar, desplazar y puede ser flexible. Por tanto, el problema planteado está enfocado hacia la resolución constructiva de un sistema que relaciona forma, estructura, materiales, proceso constructivo, montaje y su uso, características que puedan favorecer en su desarrollo a cubrir grandes espacios funcionales y agradables dentro del entorno urbano. La forma de la cubierta deberá contemplar en su producción estructuras basadas en geometrías estables y en equilibrio, cuyas uniones permitan el rápido montaje y desmontaje.

Se verificará la viabilidad constructiva de realizar la cubierta bajo métodos y técnicas alternas, esto implica esfuerzos adicionales a nivel de diseño, además de la producción con costos razonables para su fabricación. Es parte del problema de este trabajo, la viabilidad técnica para obtener formas circulares con geometrías que no excedan el uso de material (Morales, C. C., 2013e) (Rodríguez, N., 2007) (<http://www.tdx.cat>).



## 2.4. SISTEMAS TRANSFORMABLES FLEXIBLES

Como se ha mencionado anteriormente, los sistemas estructurales transformables deben tener la propiedad de plegarse, sabiendo esto se puede insinuar si es posible la construcción de este tipo de sistema. Por lo que este estudio se justifica por medio del método hecho por el Dr. Félix Escrig, en su tesis doctoral, el cual realizó una serie de modelos primarios y disposiciones sobre cómo encontrar la forma de una figura plegable, proveyendo parámetros muy interesantes a considerar para el diseño de un sistema desplegable.

Este método analiza las configuraciones geométricas que pueden llegar a obtener los módulos plegables y conseguir la formar de una cubierta plegable, el desarrollo numérico justifica el desarrollo de la geometría y encuentra los vértices que determinaran los puntos articulados de dicha geometría, estos se localizan por las intercepciones en la figura geométrica que pueda crearse. En nuestro caso se estudiará las figuras curvas que puedan modular sus miembros y estandarizar sus longitudes de plegado, esto nos provee de un parámetro de estandarización de sus miembros en la estructura (Escrig, F., 2012) (Morales, C. C., 2015a).

También definirá y ayudará a generar un modelo aproximado para simular el análisis estructural de una estructura plegable; las condiciones específicas para que la cubierta se tense totalmente es la colocación de membranas textiles que servirán teóricamente como rigidizadores, este factor ayudará a mantener estable teóricamente la estructura plegable que se comprobará en el capítulo 4 de dicho proyecto (aunque el tema solo hablará de las cubiertas plegables). Esto con el fin de entender cómo interactúa la estructura plegable con una membrana textil, y su factor determinante como estabilizador de dicha estructura transformable.

Por lo tanto, en conclusión, se construirá un método geométrico de la cubierta plegable que consistirá en generar una malla cuadrícula que nos vaya dando la forma basándonos por el método de Escrig, pero desarrollada por una aproximación geométrica descriptiva más sencilla, y en consecuencia tomar como referencia dicha geometría para formar los modelos experimentales que ayuden a generar una metodología de diseño final. Por lo que el objetivo para este estudio será proponer un diseño transformable, a partir de una metodología de diseño y la construcción de modelos que nos ayuden a desarrollar conexiones constructivas que puedan aplicarse a la arquitectura (Morales, C. C., 2015a).

## 2.5. HERRAMIENTAS DE DISEÑO

Para desarrollar y generar un sistema transformable definiremos las herramientas metodológicas que tendremos a nuestra disposición para crear nuestro propio método de diseño constructivo, y para establecer los parámetros de diseño que posteriormente se tomarán en cuenta para nuestra propuesta final de nuestra metodología. Por ello, nuestra primera meta es establecer el diseño conceptual por medio de una base de datos que definiremos a continuación: *Conceptos de diseño*. El proceso de diseño y la forma de la estructura se ven enfocados a dos grandes aspectos de diseño: la adecuación de una geometría a una forma constructiva y la configuración estructural de dicha geometría, para que funcionen los materiales empleados y sus componentes constructivos, viables en términos de posibilidad de montaje rápido y de capacidad estructural suficiente. El primer estudio se concibe a partir de una estructura plegable.

Como la estructuración será difícil de elaborar, se determina primeramente que la cubierta será de membrana textil, con la misma característica de flexibilidad que la propia estructura; con la particularidad de que los materiales utilizados para su manufactura sean ligeros, resistentes para cubrir grandes claros y soportar considerables esfuerzos generados por este tipo de estructura. Esta actúa bastante bien gracias a la adecuación de su forma, funcionando dicha membrana como un rigidizador, para que la cubierta esté equilibrada tendrá que tensarse junto con el despliegue de la estructura plegable.

Para entender el proceso de diseño y aplicación del descubrimiento de la forma de una estructura transformable, el primer paso antes de comenzar a revelar el proceso del proyecto, es explicar cómo se diseñará el modelo, para que así se deduzca cómo interactúa cada uno de sus componentes y cómo se comportarán una vez unidos (Escrig, F., 1988, 1995) (Morales, C. C., 2014b, 2015a).

### 2.5.1. Condiciones geométricas de una cubierta plegable

Las estructuras espaciales de barras han sido muy utilizadas en distintos campos de la tecnología, por ello para poder desarrollar la configuración geométrica de este tipo de sistemas plegables se definen la configuraciones y esquemas que pueden tener para formar una cubierta transformable, por lo cual explicaremos su parámetros y propiedades que debe tener cada esquema de transformación referenciado.

Primeramente, analizamos las formas de las cubiertas planas de barras metálicas, con varias capas de ellas y las cúpulas con una o más capas de barras, son bien conocidas y numerosas las investigaciones que han aportado soluciones innovadoras

para la configuración de las barras y soluciones de nudos para definir las estructuras con características bien precisas: *modulación, rigidez y forma definitiva*, por lo cual estas condiciones se deben tomar en cuenta para nuestra propuesta.

La modulación hace referencia al establecimiento de un reducido número de elementos que genera el conjunto por acumulación de ellos. La rigidez se refiere a la estabilidad geométrica que hace a la estructura capaz de resistir su propio peso y las cargas aplicadas sin otras deformaciones más que las elásticas, y la forma definitiva implica la definición formal y la constancia de las dimensiones que solo podrán variarse desmontando los módulos o elementos y emplazándolos con otra configuración. Esas estructuras reciben el nombre de “Espaciales de barras con nudos articulados” y en ellas, todas las barras empiezan y terminan en una articulación (Escrig, F., 1984, 1998).

Para conocer este tipo de sistemas, se determina que están formadas por barras que empiezan y terminan en una articulación, pero que además llevan nudos intermedios que no impiden la continuidad de las piezas y tienen como misión agrupar las distintas barras que pasan por estos nudos intermedios, permitiéndoles girar cuando se tengan que transformar, sin que puedan separarse.

El ejemplo más simple y conocido es el aspa, consiste en dos barras con un pasador intermedio que las une, pueden girar una con respecto a la otra, alineándose o poniéndose de forma perpendicular. Existen también otras posibilidades como aspas espaciales con más de dos barras, que pasan por la articulación y no contenidas en un plano, o aspas complejas donde algunas barras pertenecen a más de una agrupación a la vez y, por tanto, con más de una articulación intermedia.

Las estructuras que se observan en el ejemplo se obtienen a partir de agrupaciones modulares de aspas espaciales simples o complejas, que se añaden sucesivamente para formar una malla grande en el espacio. Puesto que estas aspas tienen la movilidad propia de las agrupaciones de barras atravesadas por un pasador, los conjuntos formados con ellas tendrán la misma movilidad, siempre que se garantice la compatibilidad geométrica del movimiento de unas con respecto a las otras (Escrig, F., 1984, 1988) (Morales, C. C., 2018).

Esta movilidad las hace inservibles como estructuras, puesto que actuarán como mecanismos, cambiando de forma ante la actuación de cargas exteriores o peso propio. Para obtener rigidez pueden inmovilizarse en posiciones determinadas, por ejemplo, fijando la distancia entre dos nudos contiguos o alejados, no unidos por barras comunes. Se pueden fijar simultáneamente varias parejas de nudos hasta conseguir rigidizar el conjunto. Los elementos rigidizadores pueden ser barras que actúan solo cuando un motor las acciona o un dispositivo mecánico las liga al conjunto.

Para explicar fácilmente la generación de un sistema plegable de barras, figúrese un prisma triangular regular, donde sus lados y vértices son elementos ficticios que

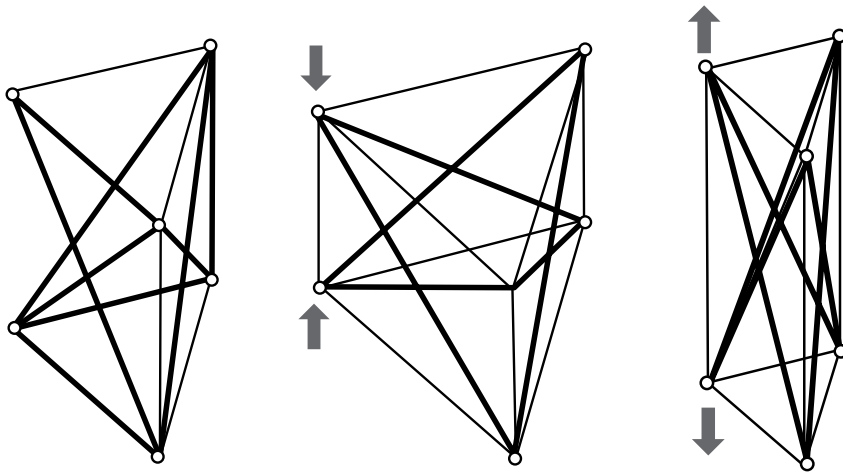
ayudan a definir una estructura constituida por barras que unen los vértices opuestos de cada una de las caras rectangulares (figura 35).

Obtendremos así un conjunto de tres aspas planas dispuestas espacialmente, formadas por dos barras, cada una cruzándose en el centro de los rectángulos. Los vértices del prisma serán formados por las uniones entre las distintas aspas.

Si se efectúa una presión sobre una base de este prisma triangular contra la otra, las aspas tenderán a abrirse de modo que las diagonales de las caras rectangulares tengan la misma longitud de las barras que forman las aspas; pero estos rectángulos cambiarán de proporción haciéndose más anchos y bajos (figura 36).

De esta forma, obtenemos un prisma triangular regular diferente al anterior y caracterizado por una menor altura y unas bases triangulares de mayor dimensión. Si se sigue comprimiendo, la cara superior del prisma llegará a coincidir con la cara inferior y el lado del triángulo será igual a la longitud de las barras mientras la altura será nula.

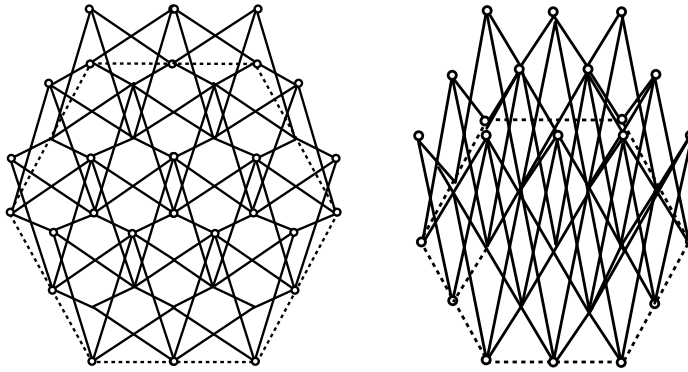
Si en lugar de acercar una base hacia la otra se separan entre sí, las bases se reducen a cambio de ganar altura el prisma (figura 37) (Escrig, F., 1984, 1988, 1995) (Morales, C. C., 2018).



**FIGURAS 35, 36, 37.** Desarrollo de una estructura plegable generada por nodos articulados y geometría triangular. Redigitalizado. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1988), Morales, C. C. (2018).

El límite será aquel cuando el prisma se eleve hasta una longitud igual a la de las barras y las bases se hagan mínimas, agrupándose en seis barras en forma de haz. Colocando encadenadamente muchos prismas con estas características (figura 38) iguales entre sí, donde las barras que confluyen en cada vértice se unen con articulaciones

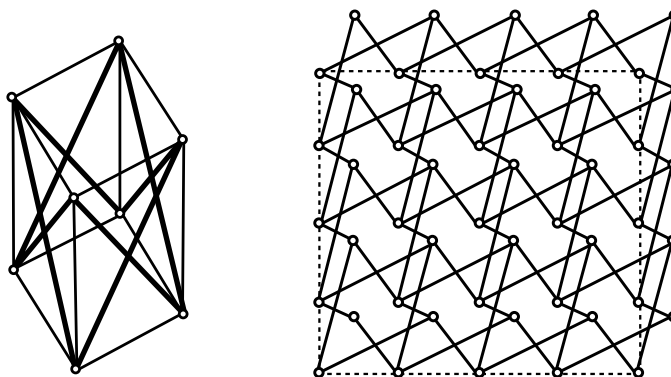
espaciales, al aproximar las dos bases de un prisma se está forzando a que lo hagan todas las restantes, obteniéndose por tanto una estructura grande con capacidad para cambiar de forma (figura 39).



**FIGURAS 38, 39.** Desarrollo tetraédrico de cubiertas plegables con nodos articulados. La búsqueda de la forma geométrica se da por la implementación de las articulaciones. Redigitalizado. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1988), Morales, C. C. (2018).

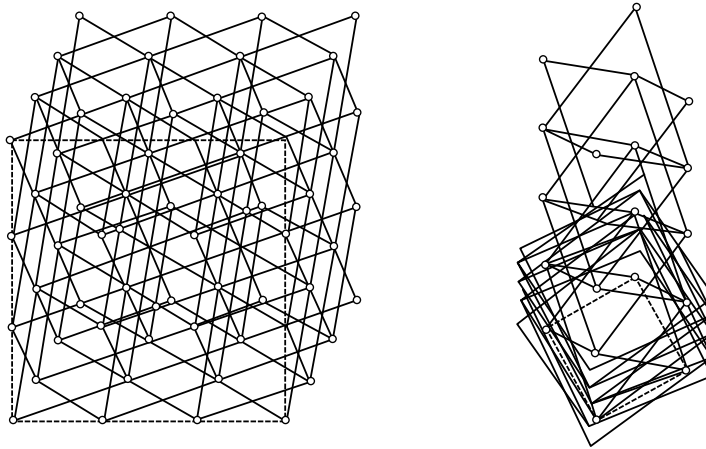
El sistema modular generado por prismas triangulares regulares está determinado por barras de igual longitud y con una articulación en su punto medio. Por su capacidad para llenar el espacio, permite diseñar estructuras longitudinales, planas o volumétricas.

Ahora bien, si en lugar de un prisma triangular se elige un cuadrado con el mismo procedimiento, se proyecta una estructura desplegable (figura 40) capaz de encadenarse a otras similares para crear un conjunto (figura 41).



**FIGURAS 40, 41.** Combinación experimental de una geometría básica y su construcción de una estructura compleja. Redigitalizado. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1988), Morales, C. C. (2018).

Estas figuras pueden crecer volumétricamente varios sentidos, vertical y horizontalmente (figura 42 y 43) (Escrig, F., 1997, 1995, 2012).



**FIGURAS 42, 43.** Desarrollo experimental de combinaciones de figuras plegables para una estructura compleja. Redigitalizado. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1988), Morales, C. C. (2018).

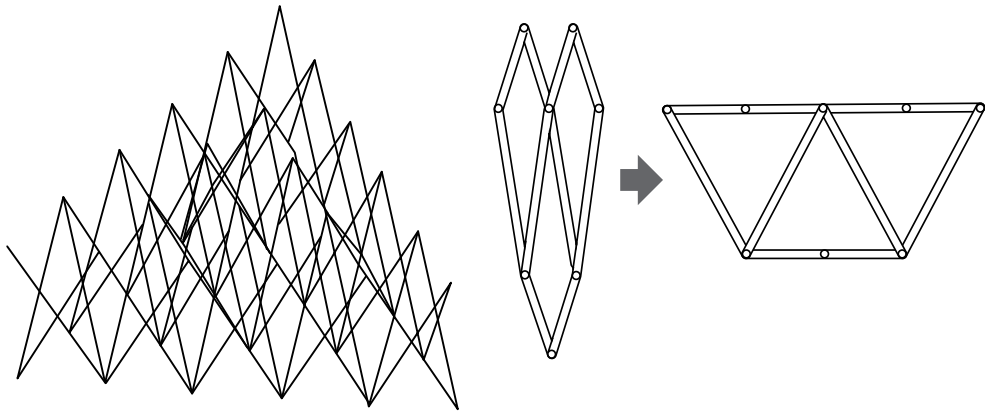
### 2.5.2. Parámetros para la construcción de una geometría plegable

El proceso de desplegado puede ser más o menos complejo dependiendo del trabajo, la especialización que requiera y la cantidad de medios auxiliares necesarios que se utilicen. Podemos observar por las imágenes experimentales el funcionamiento de las estructuras cuyo proceso de apertura y cierre son tan elementales que pueda realizarse en pocos minutos y con los propios dispositivos internos del sistema; es decir, estructuras que pueden tomar varias configuraciones en el espacio y bloquearse en varias de ellas, fundamentalmente en estado de máximo progreso o de mínimo volumen.

Las tipologías de estructuras que cumplen con estos requisitos tienen una bibliografía mínima y algunas están documentadas en los artículos y libros de Félix Escrig. Las aplicaciones estudiadas son:

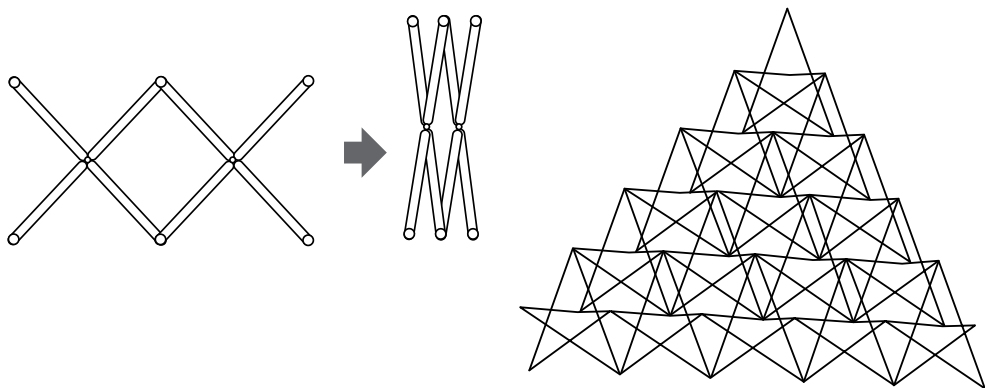
- **Tipo paraguas.** Estructuras que se pliegan sobre un mástil mediante el deslizamiento de un punto de apoyo sobre él. Son estructuras adecuadas para luces pequeñas, no mayores de 5 m y tienen su utilidad como mobiliario urbano (Escrig, F., 1995, 1997, 2012).
- **Tipo mecanismo con articulaciones bloqueables.** Tal como se expresa en las figuras 44 y 45, las articulaciones en el interior de las barras, una vez que la estruc-

tura se ha abierto se bloquean y la hacen rígida. El inconveniente que tienen es que el proceso de cierre es complicado y requiere soltar uno a uno todos los cierres, sin embargo, son estructuras muy rígidas y se usan frecuentemente en instalaciones aeroespaciales (Escrig, F., 2012).



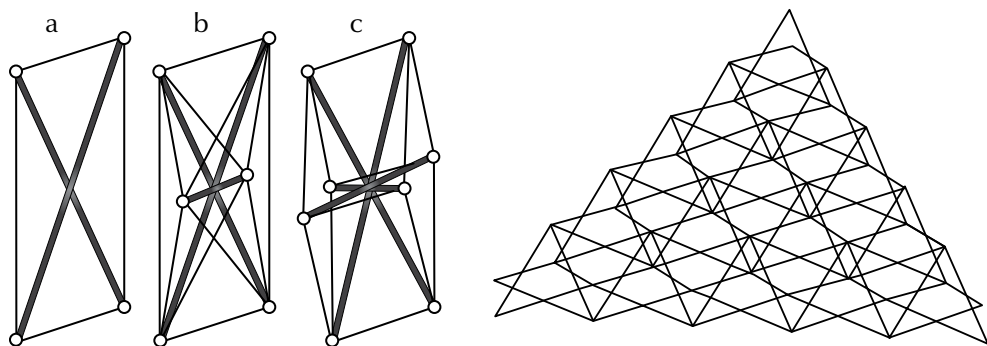
**FIGURAS 44, 45.** Desarrollo de tijereta con topes de movimiento. Redigitalizado. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1988), Morales, C. C. (2018).

- **Tipo aspa.** Son las estructuras que interesan en el presente trabajo y se basan en las distintas posiciones que pueden tomar un elemento como el de las figuras 46 y 47 (<http://www.perezpinero.org/>) (Escrig, F., 2012).



**FIGURAS 46, 47.** Desarrollo de tijeretas con combinaciones triangulares. Redigitalizado. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1988), Morales, C. C. (2018).

Estas estructuras han sido estudiadas en sus configuraciones elementales en las referencias de la figura 48 a, b y c, y son mecanismos que se obtienen combinando espacialmente piezas como las de la figura 53 o como los módulos de las figuras 49.



**FIGURAS 48, 49.** Combinaciones experimentales para el desarrollo de sistemas plegables complejos. Redigitalizado. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1988), Morales, C. C. (2018).

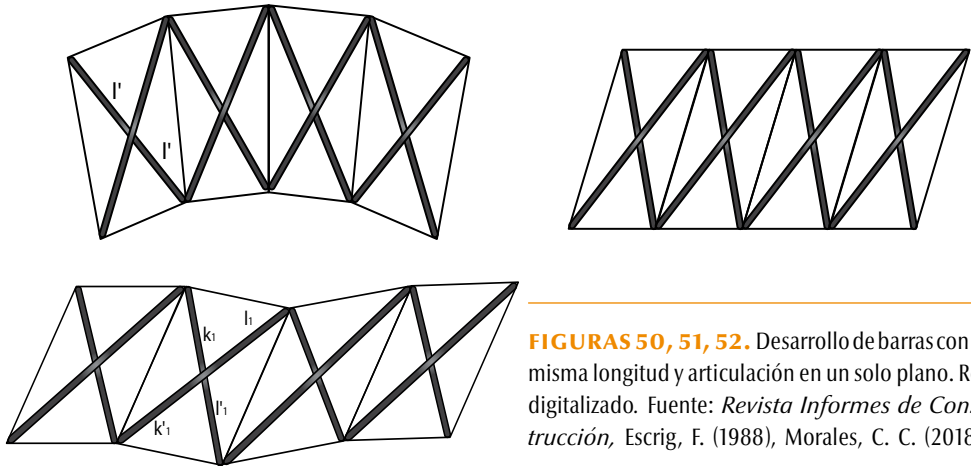
El conjunto es móvil e inestable, puede plegarse y desplegarse, sometido únicamente a las leyes de la compatibilidad geométrica de las barras. Para funcionar como estructura, estos conjuntos deben estabilizarse en alguna posición. Pero a diferencia de lo que ocurría en las estructuras de articulación bloqueables, basta con fijar tres o cuatro nudos para impedir el movimiento, pero este bloqueo se puede estabilizar por elementos adicionales como barras rigidizadoras en algunos puntos del sistema estructural, aprovechando las capacidades de la forma que se podrían obtener para asegurar la estructura. La figura 49 muestra un gráfico del desplegado de una de estas estructuras.

Las posibilidades geométricas del sistema por degeneración del elemento básico definido se muestran en la figura 50. En ese sistema todas las barras son de la misma longitud y tienen una sola articulación en el punto medio. Podemos cambiar ambos supuestos de forma separada o simultáneamente, para obtener elementos básicos también desplegados, pero con propiedades bastante diferentes:

- Por ejemplo, se pueden utilizar barras de la misma longitud y con la articulación interior excéntrica (figura 50). Como se observa, el conjunto se curva circularmente si la proporción  $1/1'$  ( $l$ , longitud de la barra mayor de las aspas;  $l'$ , longitud de la barra menor de las aspas) es constante, en cambio, si varía la proporción, la estructura tiene curvatura variable. La única condición que se impone es que  $1 + 1' = \text{cte.}$  en todas las barras.

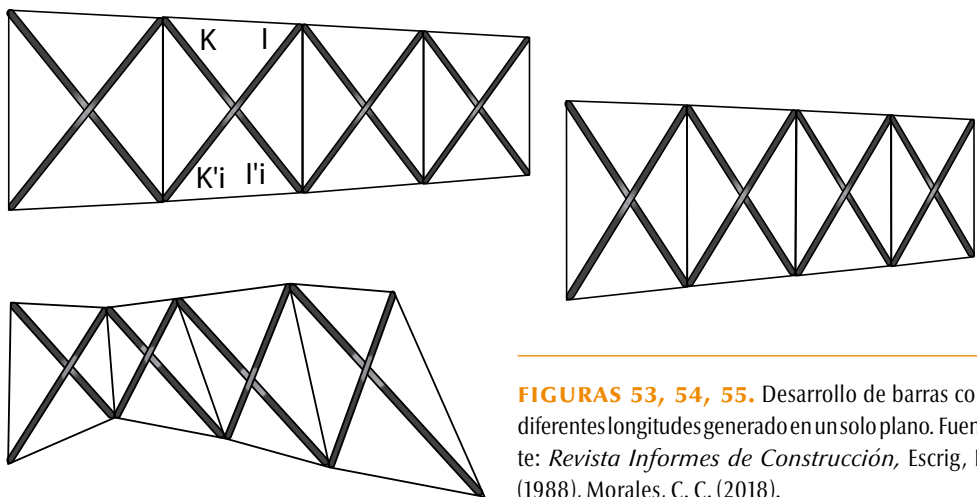


Si se utilizan barras de distinta longitud con la articulación centrada, se obtienen esquemas como el de la figura 51, en la que se usan sólo dos tipos de barras; o como el de la figura 52 si se utilizan barras de muchos tamaños. En este caso la única condición necesaria será que  $li + l'i = \text{cte}$  (Escrig, F., 2012).



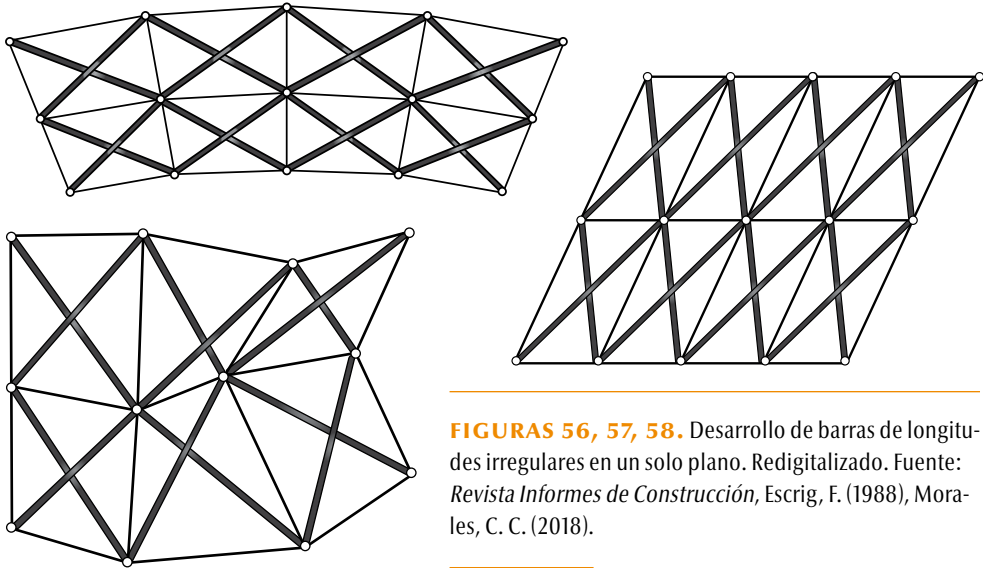
**FIGURAS 50, 51, 52.** Desarrollo de barras con la misma longitud y articulación en un solo plano. Re-digitalizado. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1988), Morales, C. C. (2018).

- Si se usan simultáneamente barras de distinta longitud y articulación excéntrica, se puede obtener una gran variedad de estructuras, como en las figuras 53, 54 o 55. La condición necesaria y suficiente para que el plegado sea posible es en todas las aspas:  $li + 1_j + 1_j = k_{i+1} + k_{i+1}$ .



**FIGURAS 53, 54, 55.** Desarrollo de barras con diferentes longitudes generado en un solo plano. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1988), Morales, C. C. (2018).

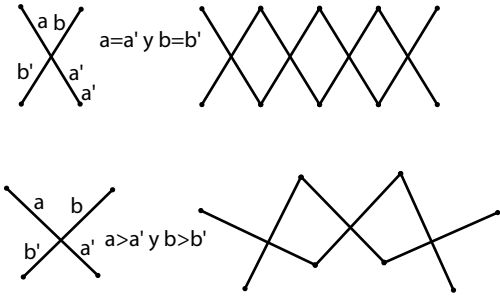
- Pueden utilizarse sistemas de aspas de más de una capa con las mismas variantes anteriores (figuras 56 a la 58). Y la condición que deben cumplir los tramos de barra es bastante más compleja en los casos más irregulares (Escrig, F., 2012).



**FIGURAS 56, 57, 58.** Desarrollo de barras de longitudes irregulares en un solo plano. Redigitalizado. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1988), Morales, C. C. (2018).

Para nuestra investigación, la definición de nuestra herramienta será la obtención de la forma de este tipo de estructura resumida en la tabla 2.1, esta contiene principios básicos que debe poseer una estructura geoméricamente plegable. Si esto no está contemplado la flexibilidad estructural del sistema, no se dará. Teniendo este principio básico se podrá hacer la traslación matemática más simplificada a una geometría descriptiva que realizará una estructura experimental mucho más rápido y sencilla, para así generar una serie de iteraciones con los módulos de tijeras, para que la condición de la geometría se dé el razonamiento matemático es simple: si  $a = a'$  y  $b = b'$  es una estructura plegable lineal, pero si  $a > a'$  y  $b > b'$  es una estructura plegable curva positiva y si se invierte y  $a < a'$  y  $b < b'$ , la curva es negativa. Esto determinará dicha condición de la geometría y conllevará posteriormente a generar una serie de propuestas geométricas que comprueben la construcción final de nuestra estructura plegable (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2013e, 2017).

**TABLA 2.1.** FORMAS BÁSICAS PARA GENERAR UNA ESTRUCTURA PLEGABLE

Sistema de tijera	
Condición geométrica básica	
	<p>Este sistema de tijera es llamado también por la bibliografía “Pantógrafo”, el cual se basa en un nudo intermedio pivotante y dos ubicados en los extremos. Estos puntos pivotantes tienen total grado de libertad entre dos barras en el eje perpendicular del plano del pantógrafo.</p>

Fuente: Escrig, F. (1988), Rodríguez, N. (2007), Morales, C. C. (2007), (<http://www.tdx.cat>).

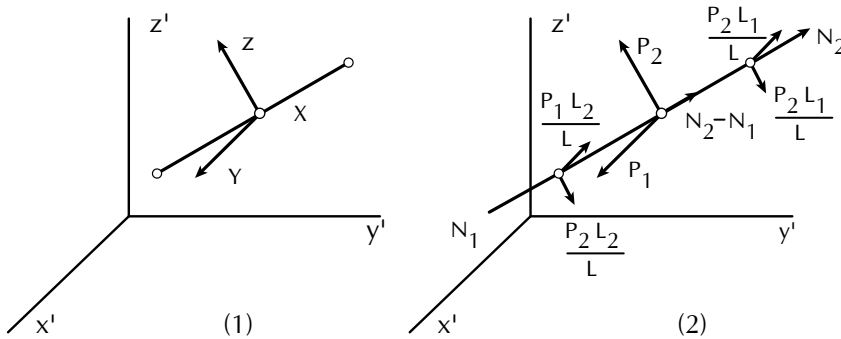
2.5.3. Parámetros de análisis estructural de las geometrías plegables

Desarrollar matemáticamente la estructura de barras plegables es a partir de la elaboración de un patrón matricial basado en el concepto de estructuras despleables. Estas estructuras presentan problemas debido a que sus piezas son barras articuladas en sus extremos y tienen el apoyo central sobre otra pieza.

Esto hace que los nudos centrales deban considerarse como articulados, si se estudia la interacción de una barra con la otra y se empotra, se considera la barra como continua. Algunos programas de computadora generan ecuaciones de segundo orden y ayudan a definir con más precisión el modelo estructural planteado, es decir, de la estructura plegable.

Sin embargo, actualmente existen programas con métodos de cálculo tan complejos que son capaces de resolver eficazmente este tipo de estructuras. Para entender cómo se comportará el sistema, se explican las características del sistema de forma general; una barra en este tipo de estructuras se puede considerar articulada en sus extremos y apoyada en un punto interior. La reacción exterior, por efecto de la barra que se articula sobre ella, puede descomponerse en tres fuerzas: X, Y, Z. De ellas, la fuerza X actuante según el eje de la pieza, modificará los valores de los axiles en los dos tramos de la barra y las fuerzas transversales Y, Z provocarán flexiones sobre la barra. El equilibrio total de la barra será la que arroja la (figura 59). Es decir, que los cuatro esfuerzos  $N$ ,  $N_2$  P, Y,  $P_2$  definen una primera aproximación de equili-

brio de la barra, posteriormente tendremos que comprobar las excentricidades de los nudos que conectan la barra (Escrig, F., 1984, 1988, 1997, 2012).



**FIGURA 59.** (1) Localización de los planos de trabajo de los esfuerzos, (2) desarrollo de las ecuaciones de cargas, flexiones y desplazamiento de los esfuerzos dentro de la barra. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1984).

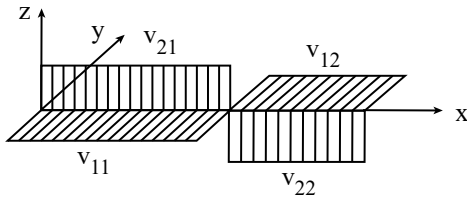
## 2.5.4. Cálculo de los esfuerzos

Para realizar un cálculo de esfuerzo en estos sistemas transformables toca el turno de razonar, con el análisis de las siguientes ecuaciones (1) y (2), las expresiones de los desplazamientos en coordenadas locales (ecuación 1) (figura 60). En función de estos desplazamientos, se calcularán para resolver el sistema de ecuaciones  $L = S \times X$  y así podremos calcularlos a partir de (1) los esfuerzos en las barras.

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{E \cdot A}{L_1} u_1 & P_1 &= \frac{3EI_1 L}{L_1^2 L_2^2} v \\
 N_2 &= \frac{E \cdot A}{L_2} u_2 & P_2 &= \frac{3E \cdot I_2 \cdot L}{L_1^2 \cdot L_2^2} w
 \end{aligned}$$

**FIGURA 60.** Ecuación 1. Deformación y desplazamiento. Fuente: *Revista Informe de la Construcción*, Escrig, F. (1988).

Generalmente, es de mayor interés calcular los esfuerzos cortantes y los momentos flectores (ecuación 2) (figura 61), que las propias fuerzas transversales, por ello se muestran las ecuaciones y condiciones que pueden llegar a tener las barras para estabilizar su forma (ecuación 3, figura 62) (Escrig, F., 1984, 1988, 2012).



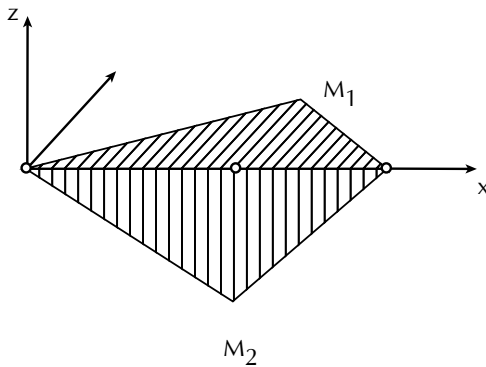
$$V_{11} = \frac{P_1 L_2}{L}$$

$$V_{12} = \frac{P_1 L_2}{L}$$

$$V_{21} = \frac{P_2 L_2}{L}$$

$$V_{22} = \frac{P_2 L_1}{L}$$

**FIGURA 61.** Ecuación 2, Esfuerzos cortantes. Fuente: *Revista Informe de la Construcción*, Escrig, F. (1988).



$$M_1 = \frac{P_1 L_1 L_2}{L}$$

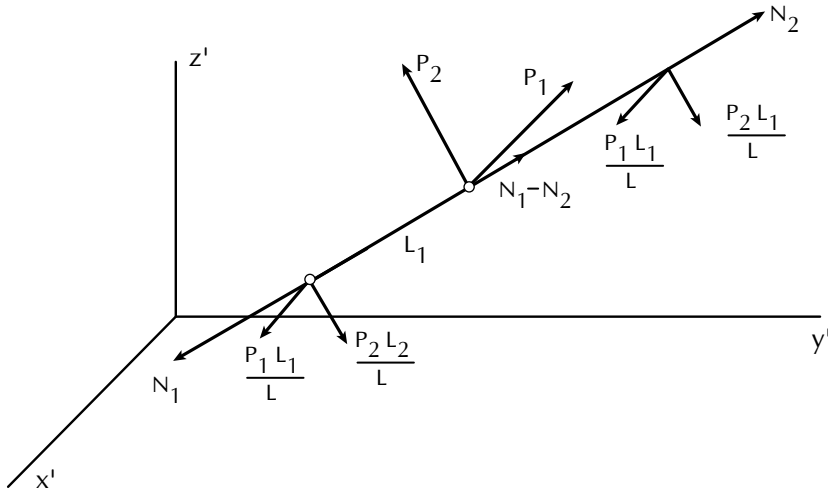
$$M_2 = \frac{P_2 L_1 L_2}{L}$$

**FIGURA 62.** Ecuación 3, Esfuerzos de momentos. Fuente: *Revista Informe de la Construcción*, Escrig, F. (1988).

### 2.5.5. Parámetros de comprobación de resultados

Una vez definido el método de análisis estructural que utilizaremos, es preciso comprobar cómo interactuarán los nudos y las barras dentro del sistema. Por tanto, es

justo calcular las fuerzas que actúan en cada uno, en coordenadas globales. Hemos visto que el equilibrio de cada barra (figura 63) actúa en cada nudo tras proyectarlas sobre los ejes globales.



**FIGURA 63.** Comprobación de esfuerzos. Fuente: *Revista Informa de la Construcción*, Escrig, F. (1988).

Teóricamente el método de análisis comprueba que las fuerzas totales en cada nudo, considera que la fuerza exterior y las barras que concurren en él, están en equilibrio. Se puede comprobar la corrección de los cálculos efectuados a continuación:

$$\begin{aligned} x_1 &= -N_1 \cos \alpha_1 - (P_1 L_2)/L \cos \alpha_2 - (P_2 L_2)/L \cos \alpha_3 \\ y_1 &= -N_1 \cos \beta_1 - (P_1 L_2)/L \cos \beta_2 - (P_2 L_2)/L \cos \beta_3 \\ z_1 &= -N_1 \cos \gamma_1 - (P_1 L_2)/L \cos \gamma_2 - (P_2 L_2)/L \cos \gamma_3 \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} x_2 &= (N_1 - N_2) \cos \alpha_1 + P_1 \cos \alpha_2 + P_2 \cos \alpha_3 \\ y_2 &= (N_1 - N_2) \cos \beta_1 + P_1 \cos \beta_2 + P_2 \cos \beta_3 \\ z_2 &= (N_1 - N_2) \cos \gamma_1 + P_1 \cos \gamma_2 + P_2 \cos \gamma_3 \end{aligned}$$

Por consecuencia:

$$\begin{aligned} x_3 &= +N_2 \cos \alpha_1 - (P_1 L_2)/L \cos \alpha_2 - (P_2 L_2)/L \cos \alpha_3 \\ y_3 &= +N_2 \cos \beta_1 - (P_1 L_2)/L \cos \beta_2 - (P_2 L_2)/L \cos \beta_3 \\ z_3 &= +N_2 \cos \gamma_1 - (P_1 L_2)/L \cos \gamma_2 - (P_2 L_2)/L \cos \gamma_3 \end{aligned}$$

En general, estas estructuras presentan un número relativamente importante de puntos y un ancho de banda considerable por las dificultades de su numeración. En consecuencia, es importante tratar de reducir el número de elementos de estas, por aplicación de condiciones de simetría cuando ello sea posible.

En muchos casos, la estructura tiene una simetría respecto a planos verticales que pasan por el eje  $z$ , que se supone contiene los puntos fijos. En estas condiciones es preciso plantear la circunstancia de que los desplazamientos se produzcan según un plano vertical formando un cierto ángulo con los ejes globales.

La condición será que la componente del desplazamiento, ortogonal al plano de simetría, sea nula:  $\delta x \text{ SEN } \alpha - \delta y \cos \alpha = 0 \Rightarrow \delta y = \delta x \tan \alpha$

En fin, para determinar la simulación estática de la estructura plegable será necesario el uso de la computadora, ya que las ecuaciones iterantes que se llegan aplicar en el sistema son muy grandes y se necesitarían meses para poder terminar tan solo las matrices de geometría. Por ello, para el capítulo 4, donde se desarrollará la simulación se utilizará un software que realice varias sucesiones de hipótesis de cargas y las matrices necesarias para ejecutar el análisis estructural.

Explicado esto, se determina como se realizará el análisis estructural en nuestro estudio (Escrig, F., 1984, 1988, 2012) (Morales, C. C., 2013c).

### 2.5.6. Desarrollo de la matriz de rigidez en coordenadas locales y ejemplo de aplicación

A efectos de esfuerzos axiales, la respuesta de la barra será similar a la de una barra de una estructura de nudos articulados. En consecuencia, llamando  $U$  al alargamiento del primer tramo de la barra y  $U_2$  al del segundo.

$$N_1 = E\Delta / L_1 U_1$$

$$N_2 = E\Delta / L_2 U_2$$

A efectos de las fuerzas transversales en el nudo central, suponemos la barra articulada en sus extremos y sometido a una carga trasversal sobre dicho nudo. En este caso:

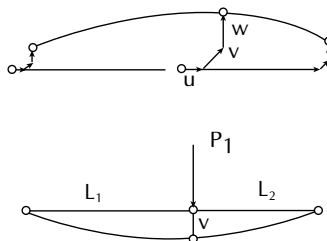
$$v = 1 / E \cdot I_1$$

$$P_1 \cdot L_1^2 \cdot L^2 / 3 \cdot L$$

En consecuencia:

$$P_1 = 3 \cdot E \cdot I_1 \cdot L / L^2 \cdot L_1^2 \cdot v \quad P_2 = 3 E I_2 L / L_1^2 L^2$$

Esto es igual



Y puesto en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{EA}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{EA}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3EI_1 L}{L_1^2 L_2^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{3EI_2 L}{L_1^2 L_2^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

La ecuación matricial se utiliza para calcular globalmente la estructura y encontrar la interacción de los esfuerzos empleados en el sistema estructural.

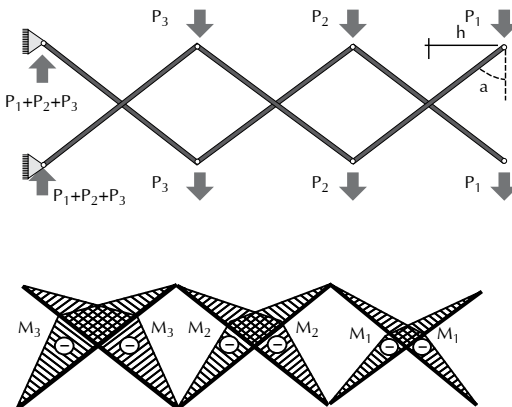
En el entendido del análisis estructural, son características que tomará la forma de la estructura, pues con estos componentes es muy importante al proponer un perfil adecuado, donde los procesos de cálculo pueden ser complejos en estas estructuras, con un elevado número de barras articuladas, en las que los esfuerzos de flexión son protagonistas del comportamiento resistente (Escrig, F., 1984, 1988).

El predimensionado es sencillo, sin más que razonar el sistema de generación del conjunto de cada estructura en particular. En estructuras simétricas de forma y carga, el dimensionado previo puede reducirse al cálculo de estructuras como las de las figuras 69 y 70. También en la misma figura se expresan los diagramas de momentos flectores:

$$M_1 = P_1 \cdot l; M_2 = (P_1 + P_2) \cdot l; M_3 = (P_1 + P_2 + P_3) \cdot l$$

En la figura 64, los diagramas de esfuerzos cortantes:

$$Q_1 = P_1 \cdot \sin \alpha \quad Q_2 = (P_1 + P_2) \cdot \sin \alpha \\ Q_3 = (P_1 + P_2 + P_3) \cdot \sin \alpha$$



**FIGURA 64.** Estructura de prueba con cargas estándares, el resultado fue encontrar las distribuciones de los momentos flectores. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1984).

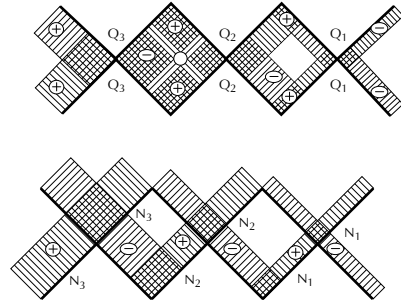


En la misma figura 65 los diagramas de esfuerzos axiales:

$$N_1 = P_1 \cos \alpha$$

$$N_2 = (P_1 + P_2) \cos \alpha$$

$$N_3 = (P_1 + P_2 + P_3) \cos \alpha$$



**FIGURA 65.** El desarrollo de la primera prueba dio como resultado tal como aparecen la distribución de los esfuerzos axiales y la gráfica de cortantes de las barras. Fuente: *Revista Informes de Construcción*, Escrig, F. (1984).

La rigidez a torsión de las barras utilizadas en las aspas puede tener influencia importante en la distribución de esfuerzos, sobre todo en estructuras muy asimétricas. Cuando la capa de tejido adicional sea considerada con su resistencia a tracción, se introduce otro grado de complejidad en el cálculo, pero mejora el comportamiento resistente del conjunto (Escrig, F., 1984, 1988, 1995, 2012).

Como se observa, el comportamiento del sistema se origina consecuentemente, como una armadura o cercha, ya que la forma de cruzar las barras hace que la distribución de los esfuerzos sea conveniente en una primera aproximación; en consecuencia, el predimensionado es recomendable realizarlo como el de una armadura o también llamada viga de alma abierta. Cabe señalar que para que sean más rígidas las configuraciones de un sistema plegable faltaría rigidizar algunos nudos de dicho sistema para tener un buen equilibrio en el sistema, Este parámetro es importante porque da la deducción de cómo debemos empezar a dimensionar el peralte efectivo de cada miembro plegable (Clarke, R. C., 1984) (Morales, C. C., 2014a).

## 2.6. PROCESO DE ITERACIÓN DE CÁLCULO POR MEDIO DE UN SOFTWARE

Una de las herramientas que darán respuesta a nuestros parámetros anteriores y tipologías posteriores de las estructuras plegables es el manejo de un software llamado WinTess, el cual maneja el método matricial no lineal y conjuga el método de análisis anteriormente mencionado. El objetivo de este estudio es desarrollar un sistema transformable constructivamente, se selecciona dicho programa para simplificar la simulación estructural, facilitando el proceso de iteración de dichos cálculos.

El número de iteraciones integradas en el programa está muy ligado con el método de cálculo. Los métodos de cálculo operativo normal para un usuario de este programa es el Método matricial no lineal y Método de Densidad de Fuerzas, por lo tanto, las consideraciones que se hagan refieren a estos métodos, que integran los cálculos del sistema estructural diseñado y mezcla las iteraciones hechas por las hipótesis de cargas incluidas en el programa.

Por defecto aparece el valor de 100000 iteraciones en el programa, es lo mismo que decir que no pare nunca hasta que encuentre el equilibrio. Sin embargo, habrá ocasiones en que nos interese detener el proceso en un momento determinado (un caso habitual es aquel en donde solamente se desea que haga una iteración) para observar cuál ha sido el desplazamiento y tomar decisiones después. Se podría detener el proceso cada 5 iteraciones o algo parecido.

La matriz que realiza informa de ciertos valores relacionados con los métodos. NumInc es el número total de incógnitas de la matriz de rigidez de la estructura. Un nudo libre típico de la malla genera tres incógnitas: desplazamientos X, Y, Z. En cambio, un nudo extremo de una barra rígida genera seis incógnitas: desplazamientos X, Y, Z y rotaciones X, Y, Z.

El valor lamb dentro del programa, llamado ancho de banda, indica las relaciones entre las incógnitas de los dos nudos de una barra. Así, si los desplazamientos X, Y, Z del nudo i y j de una barra son desiguales, no cumple con la matriz de rigidez. Pues bien, el ancho de banda máximo de todas las barras es el ancho de banda de la matriz de rigidez.

Por último, el resultado del cálculo del software muestra la forma final por flexión; los momentos, si hay estructuras rígidas, axiles, secciones efectivas, reacciones, y el ratio de seguridad que nos da el chequeo rápido si cumple con el coeficiente de seguridad marcado por el material ( $\text{Ratio} = \text{CoeficienteSeguridadGlobal} \times T_{\text{barra}} / (T_{\text{material}})$ ), la utilización del programa de cálculo nos ayudará a agilizar el análisis estructural de los sistemas plegables propuestos en este estudio (<http://tecno.upc.edu/>) (Morales, C. C., 2018).

## 2.7. COMPARACIONES Y TIPOLOGÍAS DE LOS SISTEMAS

### 2.7.1. Tipologías de cubiertas transformables

La filosofía de esta investigación presenta una serie de tipologías y prerrequisitos de aplicaciones que ayudarán a reforzar la intención de incluir sistemas de estructuras plegables en la arquitectura, puesto que los sistemas estructurales plegables propician la generación de espacios flexibles y adaptables al entorno. Una propuesta

teórica de esta práctica ayuda a formar criterios de análisis para la selección de una geometría flexible ya antes comentada, con una serie de implementaciones estratégicas que ayuden a adaptarse al ambiente. Dichas estrategias de proyecto se pueden resolver por medio de aditamentos tecnológicos conceptuales, por ello se listan las tipologías de las estructuras plegables, para luego delimitar cuál de ellas será la que se utilizará en nuestra investigación:

La primera comparación de aplicación tipológica de este modelo de estructura se realizará con los trabajos del profesor Otto (tabla 2.2), que aportan clasificaciones tanto de las estructuras móviles como de las mallas por deformación; estas clasificaciones nunca se cruzaron. Otto, en su libro *Convertible Roofs* (1972), clasifica las estructuras móviles de acuerdo con su sistema de construcción:

- Cubiertas móviles de membranas con estructuras de soporte fijo.
- Cubiertas móviles de membranas con estructuras de soporte móviles.
- Cubiertas móviles con cerramientos y estructuras rígidas (Otto, F., 1974, 1975), (Schock, H. J., 1997), (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2010a) (<http://www.tdx.cat>).

**TABLA 2.2.** CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS LIGERAS MÓVILES

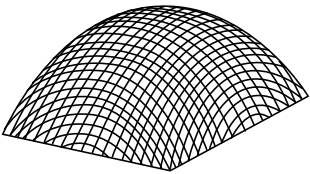
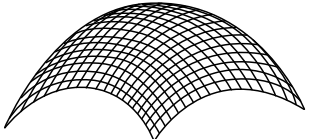
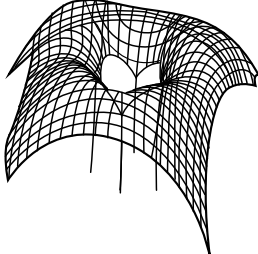
MEMBRANA MÓVIL CON SOPORTE FIJO	MEMBRANA MÓVIL CON SOPORTE MÓVIL	ESTRUCTURA RÍGIDA MÓVIL

Redigitalizado. Fuente: Rodríguez, N. (2007), Otto, F. (1974), Morales, C. C. (2018).

Dos años más tarde, en el libro *Grid Shell* 1974), el profesor Otto realiza una clasificación de las mallas por deformación (tabla 2.3), de acuerdo con las condiciones de borde y las características del interior de la malla.

- Mallas cerradas con borde rígido. La malla es una línea suspendida a lo largo del borde rígido, puede asumir diversas formas. Estas se pueden extender en un plano o en una superficie curvada. Pueden formar bordes rectos de un polígono o ser curvas como círculos u óvalos.
- Mallas cerradas con borde flexible. Su proceso es ortogonal y compuesto por rectángulos. Están suspendidas desde las esquinas. El borde de las líneas de la red es flexible en forma de arcos, catenarias, parábolas, etcétera.
- Mallas con borde flexible y crestas abiertas. Las crestas son abiertas e interrumpen las curvaturas de la forma global de la malla. Todas las líneas de la malla que cruzan la cresta tienen un doblaje en el punto de cruce y en su interior siempre tiene un borde flexible (Otto, F., 1975, 1995) (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2008) (<http://www.tdx.cat>).

**TABLA 2.3.** CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS LIGERAS RÍGIDAS

BORDES RÍGIDOS	BORDES FLEXIBLES	BORDES FLEXIBLES CON AGUJEROS
		

Redigitalizado. Fuente: Rodríguez, N. (2007), Otto, F. (1974, 1975), Morales, C. C. (2018).

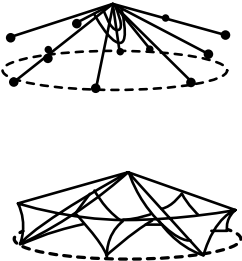
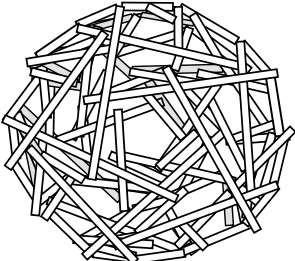
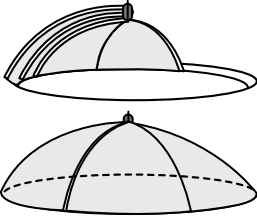
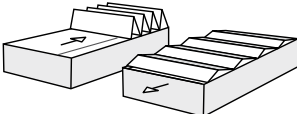

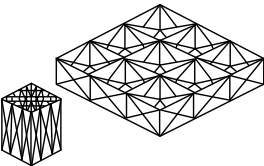
Aunque Otto desarrolló toda esta teoría de las mallas deformadas, no alcanzó a construir todos los tipos de malla que encontró con su método y están aún por definir sus requerimientos estructurales y constructivos.

En la bibliografía sobre las estructuras de rápido montaje, encontramos dos clasificaciones de las estructuras móviles. Una es la realizada por el arquitecto Félix Escrig de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Sevilla (tabla 2.4); en el artículo *General Survey of Deployable in Architecture*, Escrig las clasifica de la siguiente manera:

- Estructuras plegables textiles: son estructuras capaces de desplegarse rápidamente a través de un sistema de poleas, cables y mástiles.
- Cubiertas en tensegrity: siguen la tradición de las estructuras de Fuller y aunque no son desplegables, son de rápido montaje a través de un sistema tridimensional, de cables a tracción y mástiles a compresión.

- Estructuras retractables: son estructuras normalmente rígidas cuyos componentes se trasladan para cerrarse o abrirse a través de un sistema telescópico cilíndrico o esférico.
- Estructuras desplegadas: son estructuras con un movimiento tipo acordeón.
- Estructuras de sombrilla: son estructuras que se abren o cierran a través de unos brazos extensibles o plegables y un mástil central.
- Estructuras móviles: son estructuras que se mueven completamente y tienen similitudes con los músculos y huesos de animales y humanos.
- Estructuras transformables: son estructuras diseñadas a través del sistema de tijeras con nodos pasantes y terminales (Rodríguez, N., 2007) (Escrig, F., 1995, 1997) (Morales, C. C., 2011) (<http://www.tdx.cat>).

**TABLA 2.4.** CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS LIGERAS PLEGABLES Y TRANSFORMABLES

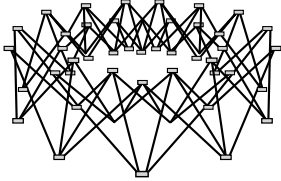
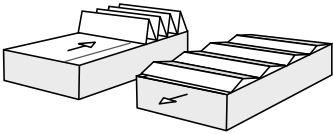


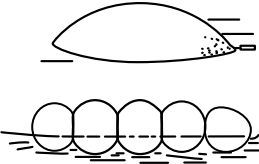
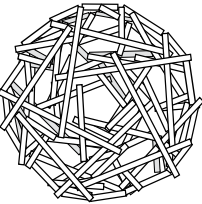
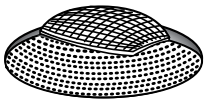
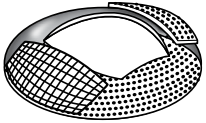
PLEGABLES TEXTILES	TENSEGRITY	RECTRÁTIL
		
PLEGABLES	SOMBRILLA	TRANSFORMABLES
		

Redigitalizado. Fuente: Rodríguez, N. (2007), Escrig, F. (1997), Morales, C. C. (2018).

La otra clasificación es elaborada por el ingeniero Charis Gantes (2001) en el libro *Deployable Structures: Analysis and Design*. Clasifica las estructuras de rápido montaje (tabla 2.5), desplegadas y transformables en:

- Estructuras de barras rígidas conectadas entre sí por el sistema tipo tijera.
- Estructuras transformables de paneles rígidos que se transforman con sistema tipo acordeón.
- Estructuras desplegadas a través de cables y membranas textiles.
- Estructuras transformables neumáticas. La transformabilidad es a través de la presión de aire en ductos arqueados hechos en membranas textiles.
- Estructuras transformables por tensegrity. Combinan elementos rígidos a compresión con cables a tracción.
- Estructuras retráctiles. Cubiertas fabricadas para estadios deportivos cuyos componentes se abren y se cierran (Conrad, R., 1979), (Gómez, C., 2007), (Gandes, Ch., 2001), (Motro, R., 2003) (Rodríguez, N., 2007) (<http://www.tdx.cat>).

**TABLA 2.5.** CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS LIGERAS RETRÁCTILES

BARRAS RÍGIDAS	TRANSFORMABLE RÍGIDO	DESPLEGABLE TEXTIL
		 
NEUMÁTICAS	TENSEGRITY	RECTIL RÍGIDO
		 

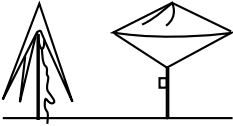


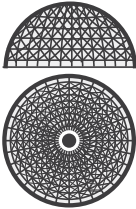
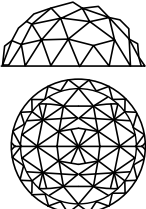
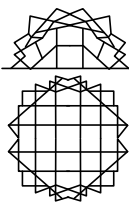
Redigitalizado. Fuente: Rodríguez, N. (2007), Gandes, Ch. (2001), Motro, R. (2003), Morales, C. C. (2018).

Como se puede observar, es reciente el estudio y la clasificación existente tanto de las estructuras retráctiles como de las estructuras transformables, esto puede ser debido a que el nacimiento de las estructuras tensadas y plegables obedecen más a

una estrategia de construcción que a una tipología estructural, por lo tanto, a efectos de este trabajo, se aporta la siguiente clasificación de las estructuras transformables agrupadas en tres subgrupos:

- 1. Estructuras de barras articuladas: son las más estudiadas hasta ahora. Pueden ser de diferentes tipos: tijera, paraguas y reticulares planas o curvas. Estas últimas se pueden definir como formas rígidas absolutamente independientes. Están constituidas por un conjunto de barras rígidas terminadas con nudos articulados (tabla 2.6), adoptando una forma final curva. Existen diversos tipos de estructuras reticulares entre las que podemos destacar: cúpulas cilíndricas trianguladas, geodésicas o esféricas (Escrig, F., 2012) (Morales, C. C., 2016a) (Rodríguez, N., 2007) (<http://www.tdx.cat>).















**TABLA 2.6.** TIPOLOGÍA DE LAS UNIONES PARA ESTRUCTURAS TRANSFORMABLES CON SUPERFICIES FRACTURADAS

TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL	CLASIFICACIÓN	TIPO DE MOVIMIENTO	GRÁFICO		
Transformabilidad por plegaduras articuladas	Tipo paraguas	Articulado central			
	Retículas planas	Tipo tijera paralelo			
	Retículas curvas	Tipo tijera curva			
			ESFÉRICAS	GEODÉSICA	ROMBOIDES
					

2. Estructuras generadas por el movimiento de una superficie. Pueden subdividirse en membranas y estructuras de superficie rígida (tabla 2.7). Dentro de éstas se pueden encontrar:

- a)** Estructuras abisagradas: este tipo de estructura se despliega como un acordeón, puede estar construida por barras o por planos rígidos unidos por una conexión flexible a lo largo de sus bordes y permite el cambio de forma.
- b)** Estructuras telescópicas: son estructuras de sección rectangular o circular que pueden entrar unas dentro de otras formando de esta manera un paquete compacto.
- c)** Estructuras retráctiles: son estructuras rígidas construidas en partes que pueden superponerse unas sobre otras por traslación o movimientos giratorios (Escrig, 1997, 2012) (Sierra, F., 2006) (Morales, C. C., 2012b) (Rodríguez, N., 2007) (<http://www.tdx.cat>).

**TABLA 2.7.** TIPOLOGÍA DE LAS UNIONES PARA ESTRUCTURAS LIGERAS CON SUPERFICIES ACTIVAS

Tipología estructural	Clasificación	Tipos de movimiento	Dirección del movimiento			
			Paralelo	Central	Circular	Periférico
Transformalidad por movimiento	Estructuras de superficies en membranas	Recogimiento				
		Enrollamiento				
		Desplazamiento				
	Estructuras de superficie rígida	Rotación				
		Acordeón				
		Telescopio				


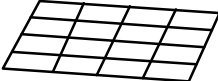
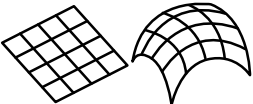
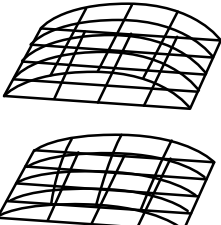
Redigitalizado. Fuente: Rodríguez, N. (2007), Escrig, F. (2012), Sierra, F. (2006), Morales, C. C. (2018).



Hasta este punto, sólo se han mencionado las estructuras transformables existentes, por ejemplo, el Dr. Nelson Rodríguez en su tesis doctoral *Diseño de estructura transformable por deformación de una malla plana, en su aplicación a un refugio de rápido montaje*, incluyó dentro de la clasificación de las estructuras transformables, las estructuras de mallas deformadas por flexión.

- 3. Estructuras preflectadas: compuestas por barras rígidas continuas en forma de malla ortogonal que, por efecto de una fuerza, son capaces de flexar (tabla 2.8), deformando la malla cuadrada a rombos, cuyas diagonales coinciden con las direcciones de las diagonales del cuadrado, generando formas abovedadas (Rodríguez, N., 2007) (<http://www.tdx.cat>).

**TABLA 2.8.** TIPOLOGÍA DE LAS UNIONES PARA ESTRUCTURAS PREFLECTADAS CON SUPERFICIES ACTIVAS

		ARCOS	BÓVEDAS
Transformabilidad por deformación tensional	Deformación de un elemento rígido		
	Deformación de una malla tridimensional		

Redigitalizado. Fuente: Rodríguez, N. (2007), Morales, C. C. (2018).

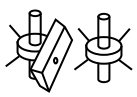
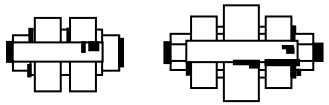
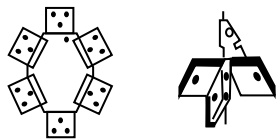

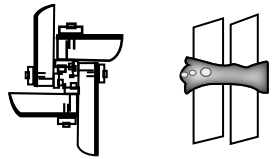
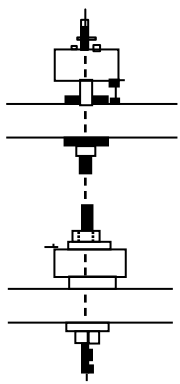
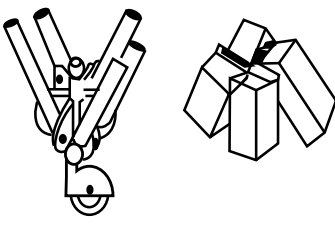
Después de la tipología anterior, llegamos a la conclusión de que toda estructura transformable precisa de mecanismos en las uniones para realizar el proceso de pliegue, despliegue, abertura, cerrado o deformado. En la siguiente tabla se intenta resumir los tipos de nudos encontrados en las diferentes bibliografías (tabla 2.9), independientemente de las condiciones de las barras.

Los dos primeros nudos por rotación y abisagrado son soluciones simples que pueden estar ubicados en el centro de la barra o en sus extremos.

Los dos últimos casos, nudo pasador y por rodamiento, son más complejos; además de rotar la barra, cambia de posición de toda la estructura. En estos modelos de nudo, las holguras son un requerimiento importante para permitir el paso de la ba-

rra por sus diferentes etapas. Sobre este aspecto, profundizaremos en el capítulo 3, concerniente específicamente a los nudos de estructuras plegables (Escrig, F., 2012) (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2015).

**TABLA 2.9.** TIPOLOGÍA DE LAS UNIONES PARA ESTRUCTURAS TRANSFORMABLES

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		

Redigitalizado. Fuente: Escrig, F. (2012), Morales, C. C. (2015).

En la siguiente tabla se resume con base en la clasificación propuesta por el Dr. Nelson Rodríguez referente a las estructuras transformables, pero cambia la generación de tipología de las estructuras con relación a su tabla y se propone la adecuada para nuestro estudio, relacionando los tipos de movimiento. Dicha información es recopilada para desarrollar las formas geométricas más flexibles para las estructuras transformables, por esa razón (tabla 2.10) es pertinente mencionarlas y tener en cuenta que hay diferentes posibilidades para desarrollar mecanismos de transformabilidad factibles, para construirlas con materiales que puedan ser manejables.

Aunque dicha tabla se manipuló y se ha considerado para las estructuras plegables, pues el tema se desarrolla con base en los sistemas transformables plegables en la arquitectura (Rodríguez, N., 2007) (Morales, C. C., 2013a).

**TABLA 2.10. CLASIFICACIÓN DE NUDOS CONSTRUCTIVOS PARA ESTRUCTURA PLEGABLE**

TIPOS DE TRANSFORMABILIDAD	DESCRIPCIÓN	FORMAS GEOMÉTRICAS	MECANISMO DE MOVIMIENTO
Transformación de barras articuladas en sentido unidireccional, plana	Formadas por barras rígidas, nudos, cables rigidizadores, elementos de cubierta y accesorios de sujeción y anclaje	Planas dobles cilindros	Se origina para estructura tipo tridimensionales planas, los nodos articulados en sus uniones y solo se rigidiza cuando adquiere su forma final por medio de atiezdadores
Transformación de barra articuladas en sentido bidireccional con malla cuadrangular	Estas superficies pueden cubrir grandes extensiones de claro y están formadas por la misma propiedad que una unidireccional solo que esta coloca superficies complejas	Pueden generar formas tipo de superficies cilíndricas, anticlásticas, sinclásticas, geodésicas y dobles curvaturas	Esta tiende a formarse más en cubiertas curvas, por su forma son complicadas de estabilizar, pero cuenta con nodos articulados que ayudan a desplegar y se rigidizan con atiezdadores y contra vientos que fija su forma final
Transformación de barras articuladas en sentido multidireccional en mallas triangulares	Formadas por barras rígidas, articuladas con nudos, cable de estabilización, elementos de cubierta y anclaje	Genera formas cupulares sinclásticas bóvedas o curvaturas anticásticas	Se desarrolla en una malla triangulada donde se obtiene una mayor estabilidad, por forma tiende a generarse para formar curvas ya que reparte eficientemente el esfuerzo.

MATERIALES					
MADERA	ACERO Y ALUMINIO	PLÁSTICOS	MEMBRANAS	BAMBÚ	CARTÓN
Listón de sección cuadrada rectangular circular	Perfiles extruidos o conformados en frío de sección cuadrada rectangular circular	Perfiles por pultrusión de sección cuadrada rectangular circular	Como elemento de cubierta		Barras huecas de cartón realizados con varias capas de cartón encoladas
Marcos de listones, tableros de compuestos, aglomerados	Láminas de acero galvanizado de aluminio	Láminas de fibra de vidrio moldeado	Telas sintéticas a base de hilo de nilón, poliéster o de fibra de vidrio, mallas reticulares de alambre, de cables o materiales flexibles	Esterillas fabricadas desplegando las varas de bambú	
Listones de madera unidos o de madera laminada	Barras macizas o huecas, redondas o cuadradas de acero o aluminio	Barras macizas o huecas, redondas o cuadrados de poliéster, fibra de vidrio o carbono	Como elemento de cubierta y arriostre de la estructura	Varas de bambú	Barras huecas de cartón

Fuente: Morales, C. C. (2013a), Rodríguez, N. (2007) (<http://www.tdx.cat>).

## 2.8. ALCANCES DEL ESTUDIO

Partiendo de las referencias anteriores, se proporcionará el proceso de una metodología geométrica, para generar estructuras plegables para este estudio, que servirá para el desarrollo de un sistema más versátil, el cual partirá de modelos experimentales de estructuras ligeras y adecuaciones geométricas de sistemas despleables. Esto podrá darnos pautas de diseño más coherentes para esta investigación que nos proporcionará, como consecuencia, un modelo de cubierta flexible, adaptable y transformable, con la versatilidad de cambiar de forma en su espacio (Morales, C. C., 2013e).

Lo que se pretende es la creación de un lugar transformable, cambiante de acuerdo con las necesidades y la expectativa que tenga que cumplir; creando tal vez el desarrollo de un sistema estructural más flexible, que propicie un lugar que aparte de activo-cambiante, sea un lugar multifuncional.

Todas estas soluciones demandadas tienen un límite y para poder definir con mayor exactitud, claridad y para no desviarse del cometido nos guiaremos del mapa conceptual anterior, del cual ya obtuvimos la base de datos e información necesaria para los primeros puntos de la fase de diseño conceptual. Ahora el estudio se divide en dos fases: la exploración conceptual y adecuación (capítulo 3), y el análisis del sistema y su tecnología (capítulo 4), las cuales marcan puntos más específicos, que se dedicarán a la solución de un sistema plegable tensado como nos guía nuestro mapa conceptual, análisis estructural y propuesta final. Con este objetivo doble obtenemos la transformación geométrica más “activación” por la tensión del textil o de una red de cables equivalentes.

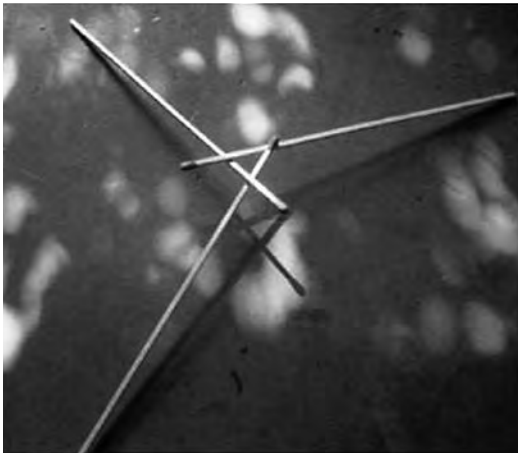
**Exploración conceptual y adecuación:** se realizarán aproximaciones experimentales como principio de diseño, que tenga como base el principio de plegabilidad, generando una serie de búsquedas de geometrías que ayuden a encontrar una metodología de diseño (figura 66); después, se concibe un modelo que servirá como guía, premisa y cota para el desarrollo de un proyecto.

En consecuencia, se crearán varios modelos que puedan adquirir la transformación de su estructura, aunque también se estudiarán las posibles aplicaciones constructivas de las adecuaciones conceptuales, que generarán modelos aproximados, pero se limitarán a buscar sistemas plegables que se puedan adaptar y transformar en diferentes espacios.

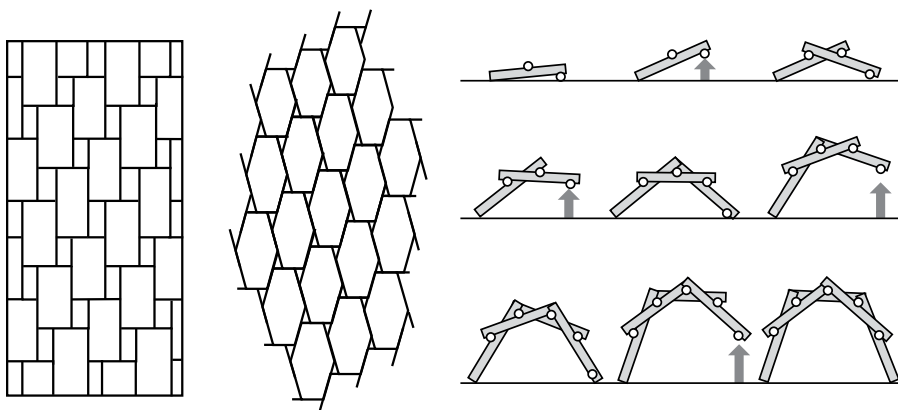
**Análisis del sistema y su tecnología:** se analizarán las adecuaciones logradas en la etapa experimental, se desplegará un método de diseño para predimensionar, para después analizar las geometrías obtenidas de la investigación y así imple-

mentarlas a diseños estructurales adecuados para este tipo de sistemas, también se integrará la membrana textil dentro de esta etapa, ya que su interacción con la estructura ayudará a estabilizar su forma y generar la figura final de la propuesta.

Posteriormente se aplicarán la praxis documentada con base en sistemas y formas versátiles, pues tendrán la factibilidad de ser prefabricadas y fáciles de transportar (figura 67), por la versatilidad, sólo se estudiarán estructuras forjadas con materiales ligeros, creando así un sistema de accesorios industrializados para el modelo; su análisis abarca también los sistemas de modulación, que se fortalecerán para obtener un mayor nivel de diseño e innovación, para obtener como resultado que estos espacios posean una verdadera flexibilidad.



**FIGURA 66.** La estructura se genera a partir de una geometría y se obtiene un sistema estructural más ligero y de fácil transformación espacial. Fuente: [htca.us.es](http://htca.us.es) (2010).



**FIGURA 67.** El proceso para la creación de un modelo conceptual proviene de la modelación. Este planteamiento crea los primeros conceptos de la investigación y la generación de su tecnología. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2007, 2013e).

## 2.9. DETERMINACIÓN DEL ESTUDIO

Comprendiendo todo lo antes mencionado, se desarrollará primeramente a una metodología de diseño geométrico basado en el método del Dr. Félix Escrig; lo cual conlleva a realizar una adecuación de la geometría en estos sistemas transformables, esta deberá de ser sencilla para que se pueda realizar una transición conceptual a una propuesta formal para la arquitectura (figura 68), éstas formas se descubrirán por el ensayo experimental de modelos, adecuaciones geométricas descriptivas, ensayos experimentales y aplicaciones de propuestas constructivas, teniendo en cuenta que la cubierta se rigidizará por una membrana textil que ayudarán a crear un sistema equilibrado y resistente. Es pertinente establecer que la guía conceptual proviene del mapa conceptual que propone el Dr. H. Berger para sistemas de cubiertas ligeras, lo cual tiene algunas variantes propuestas por nosotros que nos servirá de esquema para dicho procedimiento.

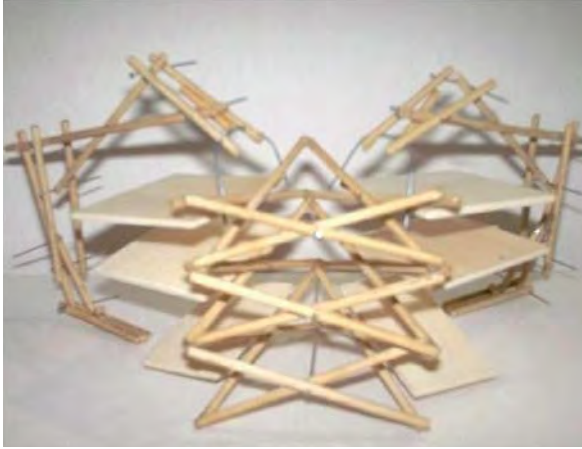


**FIGURA 68.** Un sistema flexible provocaría una mayor adaptabilidad dentro de los espacios, en consecuencia, un espacio más ágil para utilizar e interactuar. Fuente: [www.efimeras.com](http://www.efimeras.com) (2010).

Esto nos proporciona el paso a paso a seguir en el perfeccionamiento de las estructuras ligeras, para esto se forjarán una serie de procesos que ayudarán a descubrir el uso de esta guía, para así proyectar el diseño de estos sistemas transformables tensados, ya que las estructuras en la edificación por lo regular son rígidas y evitan un desarrollo más ágil.

Lo anterior lleva a la búsqueda de la flexibilidad estructural, la que generaría la esperada versatilidad en los espacios (figura 69). Esta flexibilidad estructural se obtendrá por medio de la experimentación constructiva que en paralelo estará analizada por la simulación estructural, para ello, se realizarán varias aproximaciones a escala, para entender el desarrollo del sistema estructural plegable, enfatizando en la articulación de sus uniones, que son la parte más importante de la investigación, ya que de ellas dependerá la estabilidad del sistema estructural. Derivado de este estudio se podrán realizar una serie de detalles estructurales a través de modelos y simulaciones para obtener una guía constructiva a seguir, para analizar el proceso

técnico-constructivo de este tipo de estructuras, en especial en las uniones que son las que juegan un papel importante para la movilidad de la estructura.



---

**FIGURA 69.** El desarrollo de formas transformables provoca órdenes geométricos más adecuados dentro del espacio arquitectónico, dejando parámetros de diseño más acordes para su crecimiento. Fuente: [piojilikes.blogspot.mx](http://piojilikes.blogspot.mx) (2010).

---

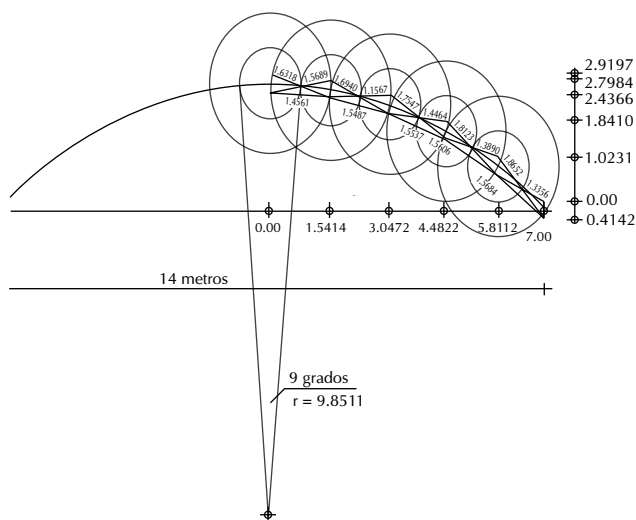
## Capítulo 3

# Método y adecuación de modelos de sistemas plegables

### 3.1. DEFINICIÓN Y ADECUACIÓN DE LA GEOMETRÍA

En este capítulo se definirán los conceptos encontrados anteriormente, por lo tanto, se desarrollarán las geometrías flexibles para la construcción de una metodología de diseño final. Bajo esta perspectiva, es importante definir qué línea se tomará para desarrollar los modelos experimentales, para así adecuarlas a la generación del sistema estructural plegable.

Para entender lo que se va a desarrollar se utiliza la investigación experimental para aplicar los conceptos encontrados anteriormente, se analizarán dos fases de estas modelaciones. En la primera se realizará el modelaje geométrico, recordemos que existen dos métodos para la generación de la forma, el método matemático expuesto por el Dr. Félix Escrig y el método geométrico descriptivo que desarrollaremos en esta investigación. Cabe mencionar que uno de los objetivos de esta investigación es la búsqueda de una metodología arquitectónica más rápida para realizar la construcción de una estructura transformable (figura 70).



**FIGURA 70.** Se desarrollará la geometría matemática para posteriormente realizar la simulación estructural para saber cómo se comporta el sistema con la geometría seleccionada para plegarse. Esto ayudará a verificar si la estructura se comportará como una cercha de alma abierta, o tendremos que cambiar la tipología estructural que se viene teorizando para calcular este tipo de estructuras. Fuente: Morales, C. C. (2013a).

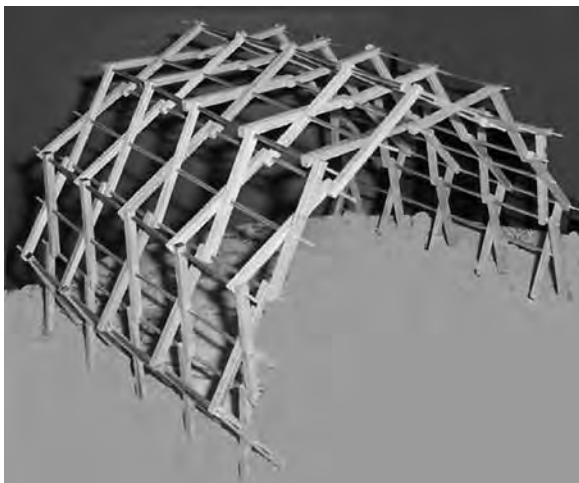


En este tipo de geometrías transformables siempre viene incluida la matemática básica por muy sencilla que sea su desarrollo. Sosteniendo este planteamiento, se buscará el método más adecuado de las geometrías experimentadas. Es muy importante realizar este análisis, porque con ello se llegará al desarrollo previo de cada geometría que ayudará a plasmar el modelo final de la investigación.

Dicho esto, la mayoría de las adecuaciones proveen el desarrollo de una geometría esférica cilíndrica y geodésica, esto ayuda a comprender cómo se desarrollará el sistema globalmente y dónde se pueden encontrar los problemas más comunes en este tipo de estructuras.

En la segunda etapa de este capítulo se desarrollarán modelos experimentales por medio de modelos a escala (figura 71), aquí se plantea este método para procesar rápidamente el modelo sustentado en la primera etapa de la experimentación, pero solo se confecciona el modelo para encontrar uniones adecuadas para los detalles de unión de la estructura.

Es por lo anterior que se realizarán modelos experimentales para entender los movimientos mecanizados que la estructura tendrá en sus nudos. De acuerdo con lo observado, se fabricará el modelado de sus uniones y definirá la tipología, que ayuda a generar el prototipo experimental a escalas más grandes, obteniendo los grados de libertad que deberían tener los miembros de la estructura transformable y así tener medios de verificación para obtener el producto final. Por consiguiente, se verán: geometrías unidireccionales, que son las cubiertas, solo se despliegan en una sola dirección; bidireccionales, que son las cubiertas que se despliegan en dos direcciones, y las multidireccionales, que pueden desplegarse en más de una dirección.



---

**FIGURA 71.** El modelado es un factor muy importante, ya que en él se sustenta la movilidad que tendrá la estructura transformable. También verifica cómo serán las uniones, el tipo de la cubierta plegable y cuáles serían los perances que pudiera llegar a tener dicha estructura. Imagen extraída y redibujada. Fuente: Morales, C. C. (2013a, 2014a).

---

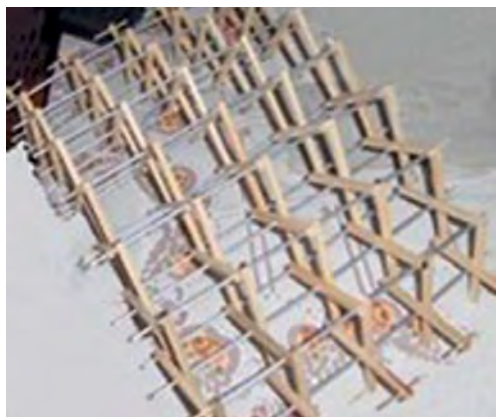
### 3.2. EXPERIMENTACIÓN TRANSFORMABLE UNIDIRECCIONAL

Para entender este tipo de sistemas, se experimentó con modelos de formas básicas plegables, esto para facilitar la comprensión de dicho sistema. La morfología-conceptual de los siguientes modelos es para conseguir la división de la figura cilíndrica y esférica como nuestro primer caso de estudio, con la pequeña característica conceptual del uso de tijeretas plegables, que es la misma que se estará explicando durante todo este estudio.

Generar geometrías estructurales plegables, en este caso, ayudará a forjar las formas más aproximadas para crear una cubierta cilíndrica, ya que la formación de diseño se conseguirá por las iteraciones de sus módulos geométricos, pero en este tema sólo se utilizará para generar formas transformables básicas (Morales, C. C., 2013e).

Para entender lo que se concebirá, se experimenta con tres modelos de tijereta, donde cada una tendrá un modelo geométrico basado en principios matemáticos y posteriormente graficados con base en los principios que se derivarán del método expuesto en el marco teórico y que cada experimento se adecuará a una geometría más simplificada, expuesta en la tabla 2.1 del capítulo 2.

La primera experimentación se aplica en una geometría cilíndrica esférica, en ella el concepto que se aplica es la modulación y la adaptación de la estructura en el espacio de acuerdo con una malla articulada (figuras 72, 73). Observando esta retícula modular es posible implementar una geometría que sea posible reproducir varias veces e integrar su estructura geométrica en el espacio (Morales, C. C., 2013e).



**FIGURAS 72, 73.** La retícula celular es un buen principio de diseño modular y de cómo se adapta el espacio a un terreno irregular. Esto dio paso a fabricar una malla plegable hacia ambos sentidos. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

Para generar esta retícula, se toman los principios geométricos de la segmentación de la figura, en este caso, se construyó una malla reticular plegable con una figura en forma de “X”, que está diseñada para desplegar un arco, cuya repetitiva proyección genera varios espacios modulares que son fáciles de montar en cualquier lugar.

Continuando con la experimentación de las tijeretas (figuras 74, 75), se analiza la geometría de la geodésica del iris de Hoberman, en ella se observa una figura en “X” ligeramente desviada, con ángulos más cerrados en su punta inferior y más abiertos en su parte exterior, la unión de estas piezas geométricas crea una cúpula geodésica circular rebajada y plegable en ambos sentidos (Morales, C. C., 2009, 2010, 2013e) (<http://www.hoberman.com/>).

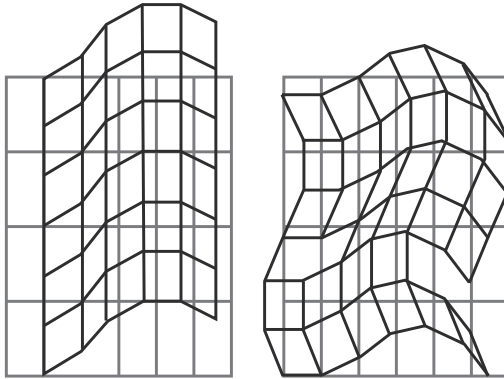


**FIGURAS 74, 75.** La geometría de una flor es una de las estructuras orgánicas más flexibles y resistentes en la naturaleza, ya que sus pétalos son de forma de parábola y las hacen más resistentes, aunque su forma oculta más geometrías como el espiral geodésico. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

Su forma geométrica se puede repetir varias veces y generar una geometría espacial más compleja, la cual puede trasladarse al espacio. Teniendo en cuenta estas experimentaciones, se justifica la ideación geométrica conceptual que se implementará al producto de esta primera aplicación experimental en el siguiente modelo.

Después de la elaboración y experimentación de algunos modelos tridimensionales conceptuales, se crea la adecuación geométrica a un modelo, donde se aplica el concepto de la tijereta en una malla cilíndrica (la que domina en la concepción de este modelo), su principal característica es la función plegable de la estructura, la cual está hecha de láminas en forma de “X”, que se pliegan en un sentido y cuando se abren forman un gran arco (Morales, C. C., 2013e).

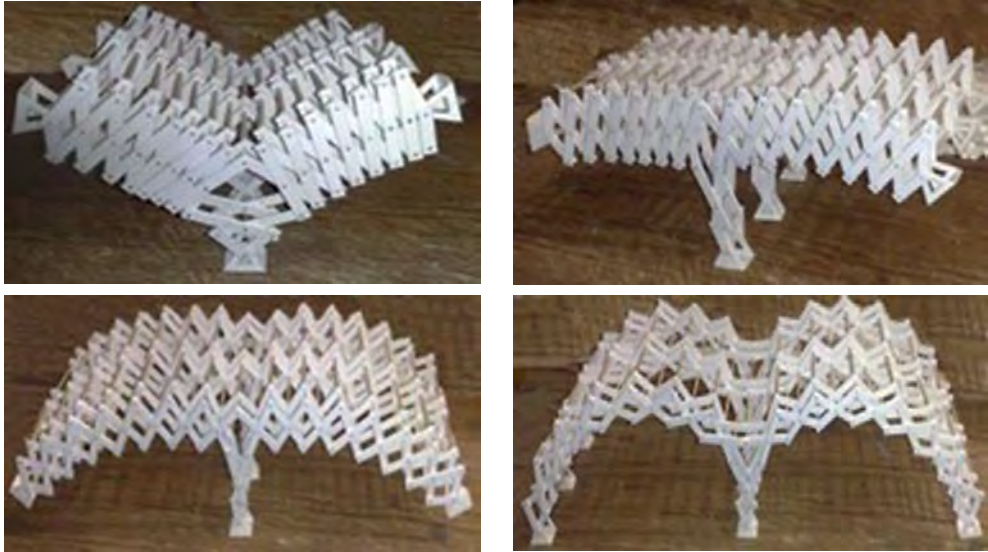
La naturaleza de este proyecto es la retícula modular, compuesta de tres cuerpos: una de una malla cilíndrica y las otras dos de forma cónica generando una cúpula geodésica rebajada, en la que se obtiene la forma de la propuesta plegable. Además, está diseñada de forma que al recibir la presión de carga y de viento en su superficie, absorbe la fuerza y la redistribuye, y a su vez amortigua las diferentes coacciones que intervienen en su contexto (figura 76) (Morales, C. C., 2012b).



**FIGURA 76.** La geometría modular compleja ayuda a generar las formas orgánicas plegables del erizo y nos da alternativas de formas en que se pueden producir. Fuente: [maestroviejo.wordpress.com](http://maestroviejo.wordpress.com) (2010), Morales, C. C. (2018).

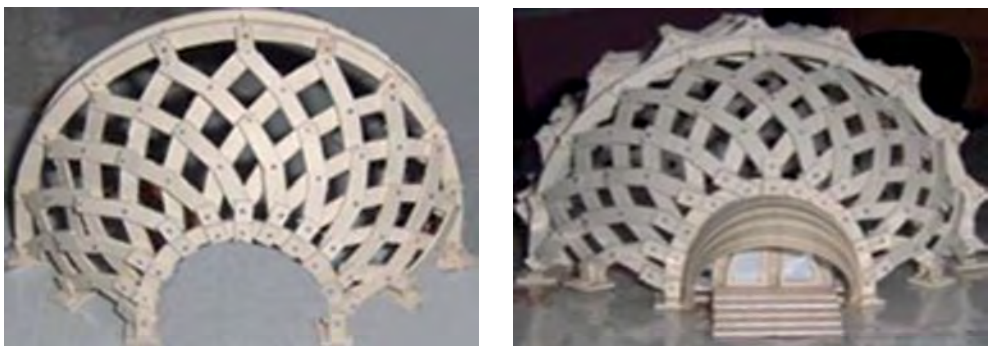
Lo primero fue esquematizar la malla y la geometría que controlaría el modelo tridimensional en el que se analizará la forma, ésta proporciona su esqueleto y su geometría nace de un punto central de circunferencia, dándole la forma cilíndrica a la armadura plegable (figuras 77 a la 80). Esta estructura puede interactuar en varias recreaciones puesto que en teoría la estructura plegable está compuesta por tres arcos principales, unidos por vigas que hacen que obtenga una mayor envergadura y estabilidad. Los marcos pueden unirse repetitivamente en ambos sentidos y con esto logramos el primer cuerpo del modelo para experimentarlo posteriormente bajo este mismo principio (Morales, C. C., 2013e).

Siguiendo con el avance conceptual, se genera la cúpula geodésica rebajada que se forma por la figura geométrica del principio del iris de la cúpula de Hoberman y de Piñero, en los que se hace evidente la cúspide de la pronunciada cúpula geodésica, la cual asume la característica de plegarse y transformarse fácilmente por estar fabricada por tijeretas en forma de X (Morales, C. C., 2010) (<http://www.hoberman.com/>).



**FIGURAS 77 A LA 80.** La figura principal de la estructura plegable del erizo son los arcos principales que sostienen la edificación, con ellos se forma la longitud del esqueleto y fija su cuerpo al suelo. Ya hecho el tronco de la estructura plegable, ésta puede transportarse muy fácilmente a cualquier parte. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010, 2013e).

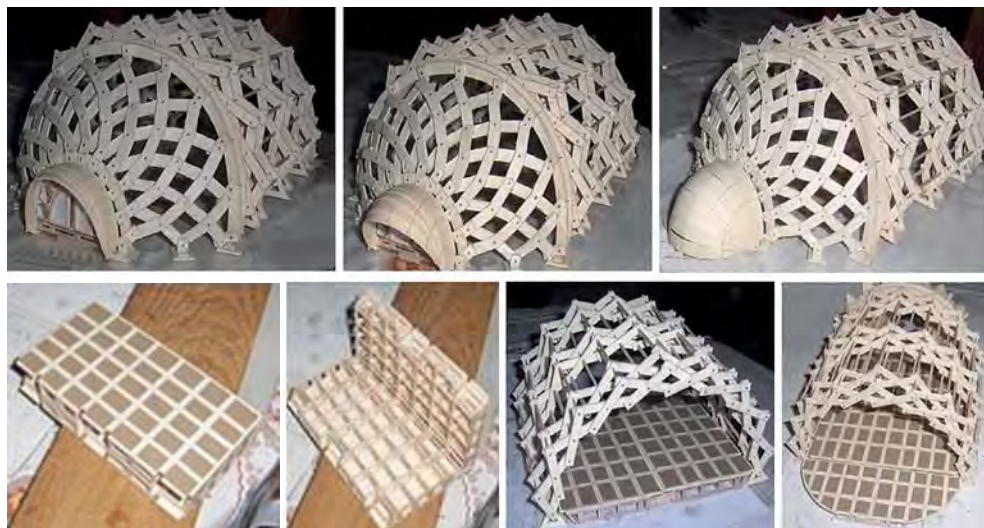
Sus ángulos inferiores cerrados le dan la propiedad de plegarse de manera horizontal abriendo una gran bocanada en donde se coloca un arco desmontable que estabiliza el empuje de la cúpula (figuras 81, 82), este armazón plegable puede ser independiente del cuerpo estructural del sistema geométrico, aunque las dos en conjunto refuerzan sus formas y crean el sistema compuesto de dos procedimientos plegables.



**FIGURAS 81, 82.** El conjunto está constituido por tres piezas, que unidas forman al erizo. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).



Por último, se elaboró una pequeña aportación conceptual en el acceso de este espacio combinado (figuras 83 a la 89), es un caparazón en forma de trompa que se pliega en un sentido y ayuda a cubrir las entradas de la estructura; ésta mantiene su forma gracias al tensor que une la forma del arco plegable en la entrada.



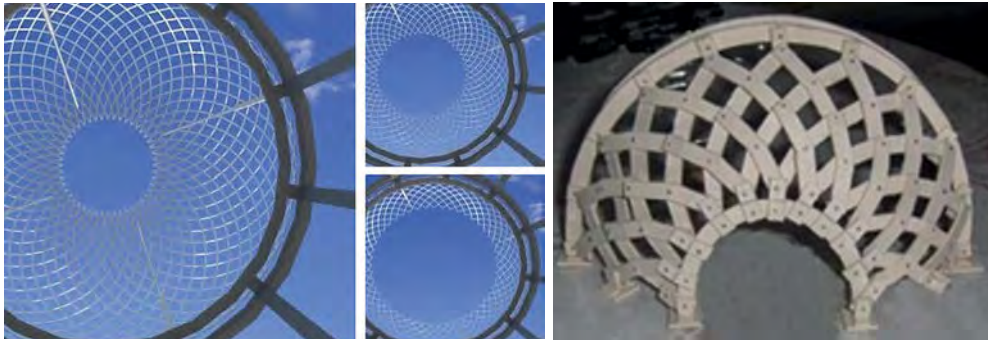
**FIGURAS 83 A LA 89.** Desarrollo de la estructura orgánica. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

Se experimentó también con el piso, que está pensado para plegarse y transportarse junto con la estructura plegable del erizo, formada con armaduras tipo joins, con un nodo central que tiene un pivote que pliega el piso de la estructura interior. El piso está constituido por tres partes, las cuales se unen por nodos y juntas que se insertan en las uniones; éstas arman un piso uniforme estandarizado, que está pensado para formar un colchón térmico y aislar la sensación térmica provocada por el suelo.

Para concluir con la figura geométrica, se cortó una cúpula geodésica rebajada plegable (figuras 90 a 93), se le dio un revestimiento fracturado que aparenta la piel de un ser viviente, el cual tiene la propiedad de autorregular su temperatura, y también tenga la aptitud para funcionar como dispositivos industriales que capturan el aire y la luz.

Continuando con esta línea estructural plegable, se planteó una piel modulada que simulará las crestas y valles que ayuden a proteger del asoleamiento para mantener regulado el confort interior. Su piel plegable está confeccionada con un bastidor

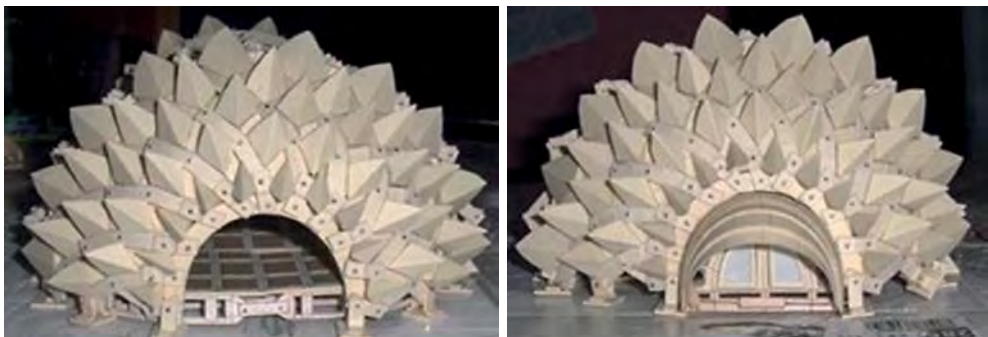
rectangular que encaja con el espacio del esqueleto plegable (Morales, C. C., 2012b, 2014e) (<http://www.hoberman.com/>).



**FIGURAS 90 A LA 93.** La piel que se desarrolla en la cúpula geodésica es de una geometría generada por antecedentes de la geodésica de Hoberman, tiene la función de estabilizar la composición del modelo. Fuente: [www.treehugger.com](http://www.treehugger.com), (2010), Fotos Experimentales e imagen redigitalizada, Morales, C. C. (2009).

La piel de la cúpula geodésica fue un poco más fracturada y rítmica en iteraciones, ya que tenía 5 pares diferentes de encaje de púas (figuras 94, 95), esta funciona para mantener la estructura con mucho mayor rigidez. La razón de su posición dentro de esta media cúpula fue la de proteger la fachada de incidencia solar y captar el viento en su parte abierta.

En conjunto, la estructura forma una geometría compleja y como podemos notar, la plegabilidad como principio de diseño estructural nos ayuda a generar formas muy diversas para resolver el espacio, pero nos deja el umbral de cómo debe generarse la retícula modular de cada tijereta de los dos cuerpos que componen este experimento.



**FIGURAS 94, 95.** El diseño rítmico de esta geometría genera la forma orgánica y, por lo tanto, se integra al contexto natural. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

### 3.3. COMPATIBILIDAD GEOMÉTRICA DEL MODELO EXPERIMENTAL

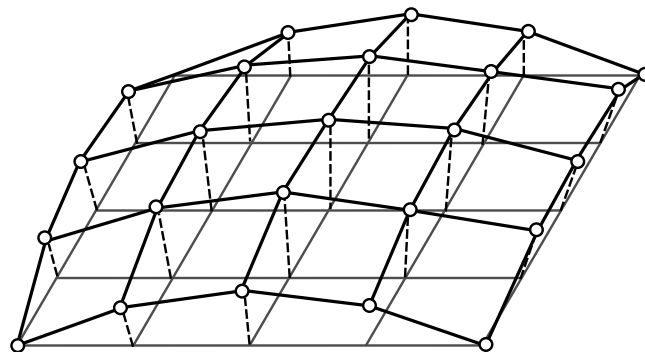
Para adaptar la experimentación anterior en su sistema plegable, distinguimos las posibilidades matemáticas que podemos ajustar a la geometría, las estructuras más sencillas que podemos construir con estos elementos son tijeras planas, constituidas por barras de igual longitud y articulación en su punto medio.

A partir de estas estructuras planas basadas en el aspa (figura 96, a), podemos obtener mallas curvas situando en el excéntrico punto de cruce, lo que da lugar a un crecimiento como el de la figura 96, b. La composición espacial de sistemas como este da lugar a la obtención de mallas complejas que mantienen la capacidad de plegado o desplegado (Escrig, F., 1984, 1988, 2012).



**FIGURA 96.** Principios conceptuales de desarrollo de estructura de tijeretas y sus condiciones de plegado, Fuente: Escrig, F. (2012).

No obstante, las mallas curvas tienen algunas dificultades geométricas que requieren ser analizadas para obtener las configuraciones más simples, ser al mismo tiempo estables y compatibles. Las configuraciones que se van a estudiar se basan todas en superficies de traslación o de revolución con directriz circular y se generan a partir de mallas planas que se curvan, en el caso de superficies cilíndricas (figura 97) o se proyectan en el caso de superficies esféricas (Escrig, F., 1984, 1988, 2012).



**FIGURA 97.** Para realizar la geometrización de una cubierta plegable, se tiene que contar con una malla geométrica de referencia para desarrollar la figura plegable. Fuente: Escrig, F. (1984, 2012).



Para posibilitar la adaptación de una malla plegable a estas retículas curvas, se adoptan los siguientes criterios (figura 98):

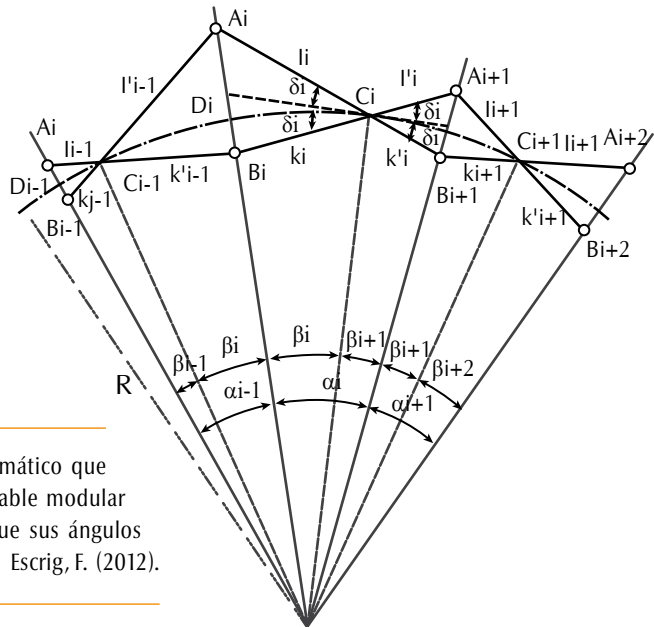
- La superficie generatriz (cilindro o esfera) contendrá todos los puntos “C” de cruce de las aspas.
- Los nudos de la retícula lineal serán los “D” y tanto los nudos superiores como los inferiores de la malla plegable, estarán sobre los radios que pasan por “D”.
- Para que el plegado sea posible debe cumplirse:  $l_{i-1} + K_{i-1} = l_i + K_i$
- Y, en el caso de directrices circulares, además:  $L_{i-1} = l_i$
- $K_{i-1} = K_i$

Esto es lo mismo que plantear que:  $\delta_{i-1} = \delta_i = \delta_{i+1} = \dots = \delta$ ,

De este modo:

$$l_i = l_{i-1} = \frac{R \operatorname{sen} \beta_i}{\operatorname{Cos} (\delta + \beta_i)}$$

$$k_i = k_{i-1} = \frac{R \operatorname{sen} \beta_i}{\operatorname{Cos} (\delta - \beta_i)}$$

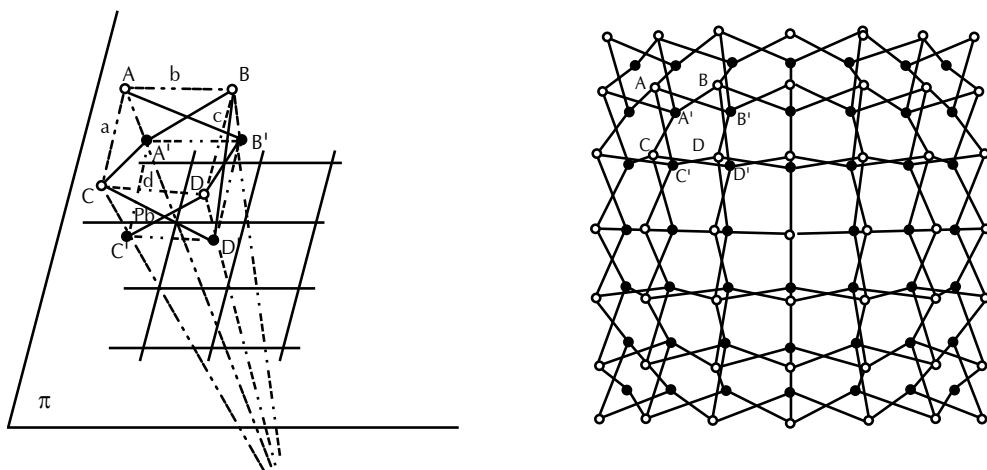


**FIGURA 98.** El principio matemático que debe cumplir una estructura plegable modular es que se una circunferencia y que sus ángulos internos sean iguales. Fuente: Escrig, F. (2012).

Como el radio es variable en las distintas fases del desplegado, se puede tomar su valor en la posición final desplegada, en donde habrá que determinar el radio final que las aspas deberán abrir, para que de ese modo se pueda tener la noción del área que va a ocupar (Escrig, F., 1984, 1988, 2012).

## Método geométrico de las estructuras desplegables esféricas

Para resolver de otra forma la experimentación anterior, podemos desarrollar la geometría descriptiva, hecha experimentalmente por el Dr. Escrig, en donde los mecanismos base desplegables se generan según las superficies curvas. Por ejemplo, para superficies esféricas se lleva hasta la superficie una retícula de cuadrados (figura 99) y el mecanismo tiene cada cadena en un plano, el que se use en el procedimiento de traslado (Puertas del Río, L., 1990).



**FIGURA 99.** El desarrollo de la cubierta geométrica plegable tiene el principio de apilamiento modular, esto ayuda para generar la cubierta esférica rebajada que se pliega en ambos lados. Fuente: Escrig, F. (2012).

Los nudos de las caras estarán sobre el mismo radio de curvatura, común a las dos direcciones, pero no sobre superficies esféricas concéntricas; ahora el punto de cruce no está en el centro de las barras, como en las desplegables según superficies planas, y son sólo ellos los que están sobre el arco de meridiano o paralelo de corte entre el plano y la superficie, los necesarios para satisfacer las condiciones que impone la curvatura.

Cada proyección de las tijeras “X” sobre la tangente a la esfera en el punto de cruce define una aproximación de la superficie esférica, como reticulación “cuadrangulada” de una capa. El mecanismo es de un grado de libertad. Durante el movimiento se acomoda a las superficies esféricas intermedias, no porque la proyección de tangentes coincida con la reticulación que la esfera le pide, sino porque tiene libertad de deformación angular adicional en los “cuadriláteros” esféricos, que se puede imponer (Puertas del Río, L., 1990).

En consecuencia, tenemos la posibilidad de efectuar la adecuación geométrica con las condiciones de la tabla 2.1 en donde si  $a > a'$  y  $b > b'$  es una estructura plegable curva positiva, solo respetando los principios matemáticos básicos descriptivos se podrá desarrollar la geometría plegable y con ello se podrían realizar varias adecuaciones no solo las del experimento anterior, sino también otros tipos de dirección geométricas (Escrig, F., 2012) (Morales, C. C., 2014f).

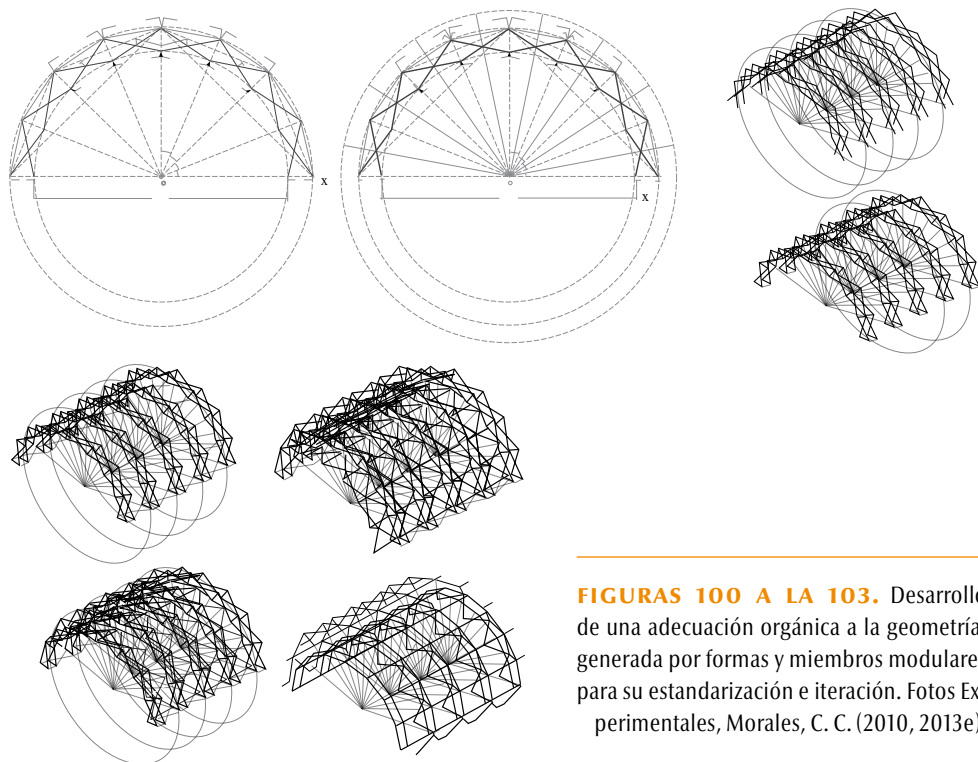
### 3.4. Adecuación geométrica experimental

La adecuación del modelo experimental anterior se realizó por medio de un método geométrico descriptivo y condiciones explicadas anteriormente. Para el primer análisis, se utilizará la circunferencia como forma rectora de la figura orgánica de los modelos experimentales, que ayudarán a modular los miembros plegables de cada geometría propuesta en esta adecuación.

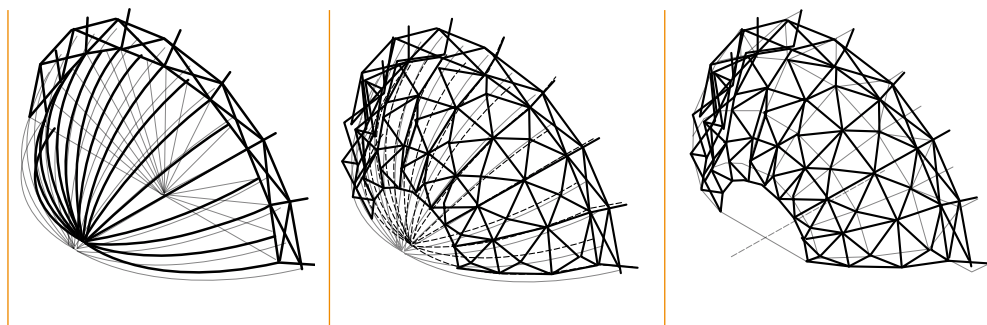
Para esto, se dibuja una circunferencia de guía para aplicar dicha traslación (por el momento sólo se analizará el ajuste de la forma orgánica a la geometría). Después de colocar el círculo, se trazan dos líneas rectoras que inician del punto “O” de origen y se forma la circunferencia; posteriormente, se traza una línea como referencia tanto horizontal como vertical en ambas las coordenadas X y Y, estas líneas ayudan a generar las líneas de segmentación del círculo formando puntos de referencia que se utilizan para las divisiones modulares de círculo, en donde se delinearán las figuras geométricas de las tijeras.

El proceso genera una armadura aligerada y flexible (figuras 100 a 103), esta sección se multiplica y crea una serie de armaduras itinerantes formando el cuerpo geométrico de la estructura y, a su vez, se unen por medio de líneas que simulan los arrostramientos y ligaduras, creando las subestructuras geométricas que establecen mayor equilibrio geométrico.

Después, se toma la geometría de la armadura circular y se ejecuta la cúpula geodésica rebajada, ésta se forma por medio de dos curvas circulares circunscritas en el centro de la armadura. Siguiendo con el proceso, dichas curvas se multiplican en su mismo eje hasta formar guías (figuras 104, 105, 106), de ellas se forman líneas guías que ayudan a integrar puntos de referencia para dibujar los arrostramientos de la cúpula. Estas se adoptarán para crear trazos que construyan una geodésica aligerada que está unida por puntos nodales, con la virtud de reforzar la geometría y distribuir las fuerzas que se llegaran a generar en un modelo estructural a escala.



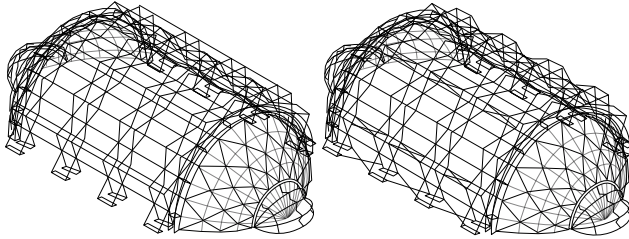
**FIGURAS 100 A LA 103.** Desarrollo de una adecuación orgánica a la geometría, generada por formas y miembros modulares para su estandarización e iteración. Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010, 2013e).



**FIGURAS 104 A LA 106.** La adecuación tiene varias formas orgánicas en la que se deben utilizar diversas geometrías para crear una estructura flexible. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

Luego del desarrollo geométrico descriptivo, se modeló la adecuación geométrica en varias propuestas, su estructuración y, posteriormente, el análisis en el espacio (figuras 107, 108), esto brindará los diferentes casos geométricos de unión e iteración del mismo modelo, ya que en este caso se pueden lograr diferentes procesos

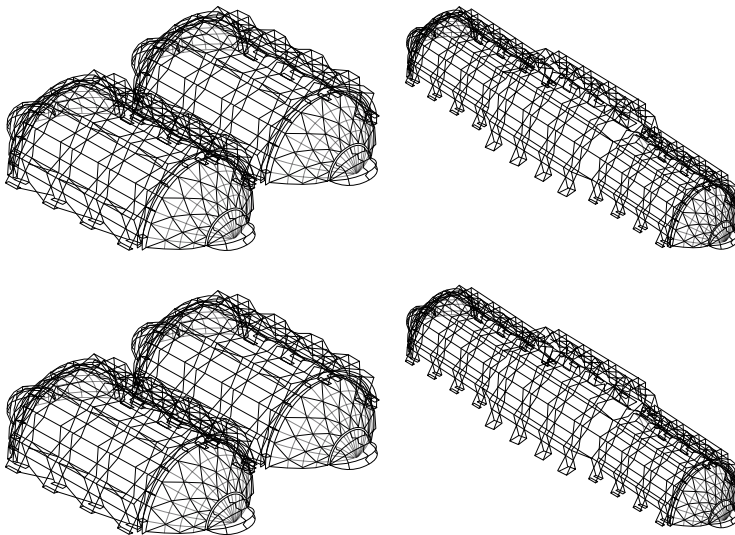
geométricos de la estructura, la cual se compondrá de una guía circular que ayudará a formar la figura orgánica del proyecto. La primera figura está compuesta de dos cuerpos que se comportan como una armadura.



**FIGURAS 107, 108.** La geometría del modelo se basa en la figura

de “X” que forma un armazón que estabiliza a la geometría por forma, está compuesta por dos cubiertas que se unen y componen la figura plegable. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

La parte más grande de la nave se integra por cuatro armaduras, ligadas por vigas unidireccionales que se pliegan en un solo sentido, su figura se compone de miembros de tijeras que unidas generan armazones ayudando a absorber los desplazamientos. La geodésica se ajusta con la misma figura de tijeras, pero está colocada en la curva de la cúpula que actúa también como amortiguador de los empujes de armazón (figuras 109 a la 112).



**FIGURAS 109 A LA 112.** La geometría puede desarrollarse en diferentes escalas y uniones de diferentes combinaciones, al igual que puede generarse de diversas piezas en “X” lo cual la hace más estable. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

La modulación de este cuerpo puede combinar diferentes uniones geométricas de plegado en el armazón, donde se encuentran una variedad de posibilidades para plegar la estructura, las cuales pueden cambiar la propiedad de la geometría y convertirla en una cubierta bidireccional en ambos sentidos, proporcionando una mayor estabilidad a la geometría del modelo. El crecimiento de la figura nos brinda un proceso de crecimiento a diferentes escalas y direcciones que forman una estructura modular autoconstruible.

### 3.5. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA ESFÉRICO TRANSFORMABLE BIDIRECCIONAL

Continuando con la incursión de los modelos experimentales, en la anterior experimentación se explicó el desarrollo de las cubiertas esféricas rebajadas. Para aumentar la conceptualización del desarrollo de este tipo de estructura se realiza una adecuación geométrica plegable, donde se introduce dos curvas en ambos sentidos. Este experimento se basará en el mismo principio de marcos principales plegables, ya que el desarrollo de un sistema flexible se puede llegar a materializar de muchas maneras con una misma figura que podrá conformar figuras flexibles.

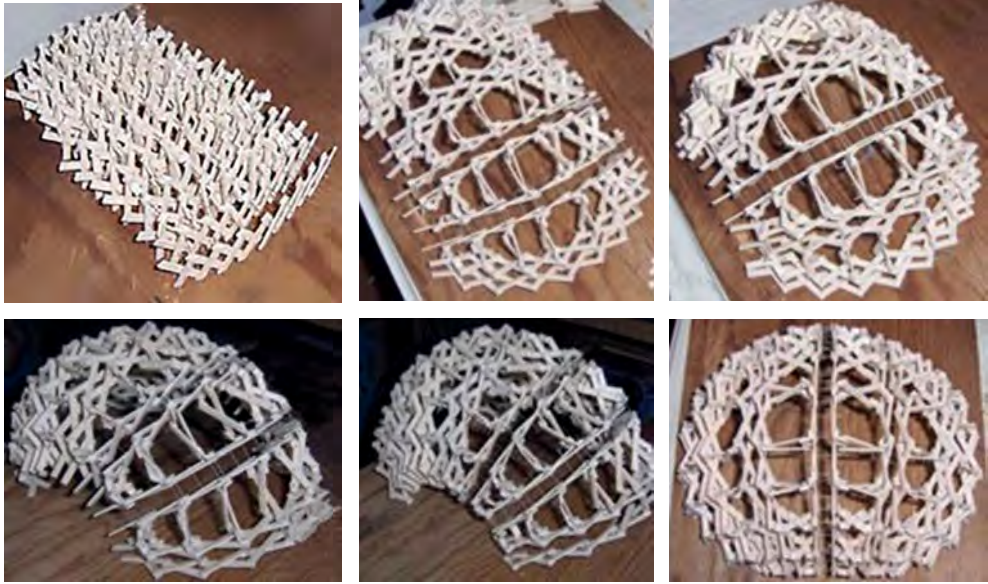
Para esta analogía se tomó la retracción de ambas curvas en dos direcciones (figura 113), esta ayuda a que se desarrollen anillos arqueados flexibles que puedan modular, los cuales le dan la habilidad de plegar su cuerpo como si fuese un caparazón. Haciendo esta reflexión de la estructura se implementa la figura a un armazón plegable que se desarrollará bidireccionalmente.



**FIGURA 113.** La estructura transformable en este caso tiene la propiedad de ser generada con arcos plegables que abren en ambos sentidos para hacerlo aún más prácticos. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).



El mecanismo de adaptación estructural de la segmentación anterior se elaboró con el mismo principio de armaduras en "X" (figuras 114 a 119), pero en este caso forma una diferente figura orgánica, esta se conforma de varios anillos en ambas direcciones y le da una mayor estabilidad al modelo experimental.



**FIGURAS 114 A LA 119.** La plegabilidad de la estructura es parcial, ya que su curvatura en un sentido es corta para darle a la figura la forma de un gusano enroscado. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009, 2013e).

La estructura se construye por curvas bidireccionales plegables que forman la cúpula esférica, ésta tiene la flexibilidad de generarse en diferentes posiciones y formas, (figuras 120, 121), ya que el plegado del armazón cambia de figura cuando no está atiesado en sus puntos de anclaje. Esta unión está compuesta con un medio domo recto, el cual transmite la tensión a un arco que mantiene la geometría del armazón (figura 122, 123). La figura de la estructura será de acuerdo con los atiesadores que la rigidizan, ésta remata con unos apoyos en forma de punta que distribuye la compresión directamente a los basamentos.



**FIGURAS 120, 121.** La estructura principal del armazón es un arco plegable que forma el esqueleto del caparazón del sistema estructural. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).



**FIGURAS 122, 123.** La figura del armazón puede tener varias formas, esto pasa por la colocación de los rigidizadores que se encuentran en la punta de los arcos, en donde se colocan para definir la geometría de la estructura. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

El elemento que remata la armadura plegable y que abre en ambos sentidos es un pequeño caparazón plegable (figuras 124 a 129); su crecimiento y desplegado puede graduarse de acuerdo con la unión que va a ligar a toda la cubierta bidireccional sujeta a los arcos laterales, que tensionarán a la estructura plegable. La fragmentación de la estructura es muy versátil, esta puede conformar más representaciones y posiciones, gracias a la modulación cuadrática de la unión, aunque se sabe que este tipo de mallas cuadrículas no son tan efectivas a la hora de resistir y es necesario reforzarlas con contraventeos que posteriormente se aplicarán en las siguientes experimentaciones (Morales, C. C., 2010).





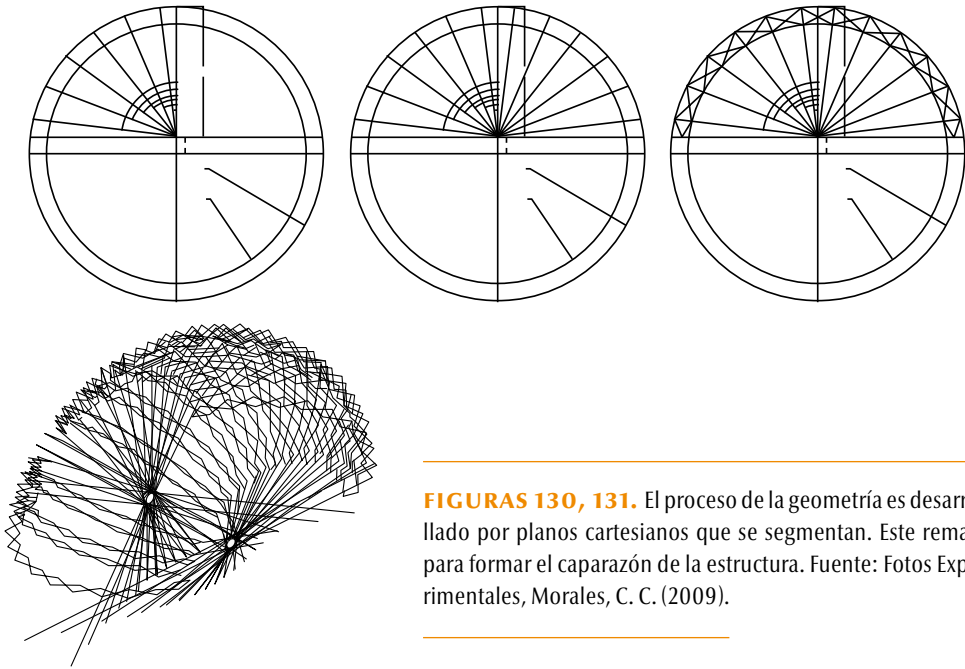
**FIGURAS 124 A LA 129.** La colocación del domo recto ayuda a estabilizar el empuje de los arcos a un arco montable central, en donde aterriza las tensiones. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

### 3.6. ADECUACIÓN DE LA GEOMETRÍA ESFÉRICA TRANSFORMABLE BIDIRECCIONAL

Se pasa directamente a la adecuación, porque anteriormente se explicó el método geométrico para el desarrollo de las estructuras de tijeretas plegables. En este caso, solo se tiene que tomar en cuenta que su desarrollo es curvo en ambos lados, explicado esto, se ejecutan las adecuaciones geométricas de la estructura bidireccional plegable, esto para simular la forma de una malla cuadrangular transformable.

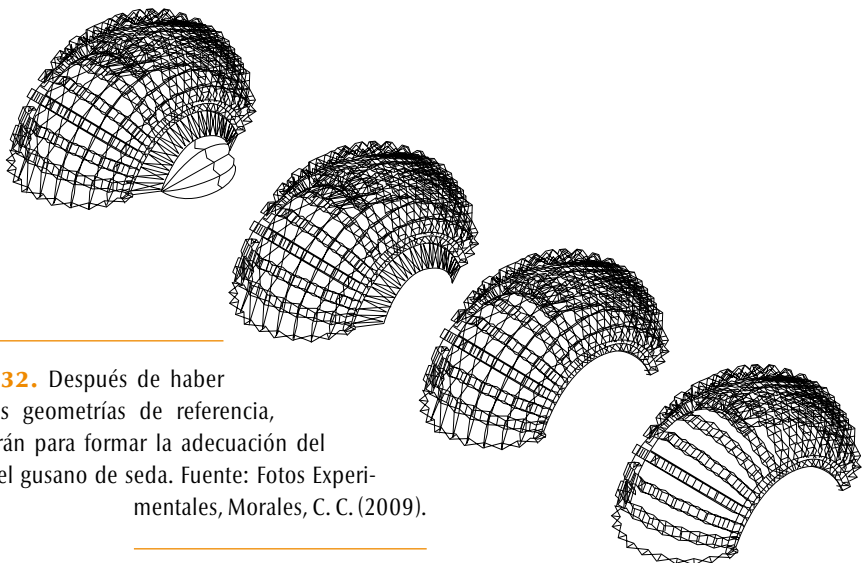
Siguiendo con el mismo trazo de la circunferencia, como en el caso anterior de la malla cuadrangular unidireccional, la geometría rectora de la forma es el círculo para lograr estandarizar la figura. En este proceso, se grafica el mismo método, pero con una distinta área del círculo en ambos sentidos, es decir, en X, Y, este se segmenta de igual manera en sus coordenadas generando líneas guía para formar el caparazón plegable en toda su figura (figuras 130, 131).

Después se interrelacionan los puntos para formar la armadura en tijeras. Esta se coloca en el punto "O" de origen, en donde se multiplica por medio de parámetro angulares en la iteración de los marcos plegables, los cuales generan la forma de cascarón enroscado (Morales, C. C., 2011).



**FIGURAS 130, 131.** El proceso de la geometría es desarrollado por planos cartesianos que se segmentan. Este remata para formar el caparazón de la estructura. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

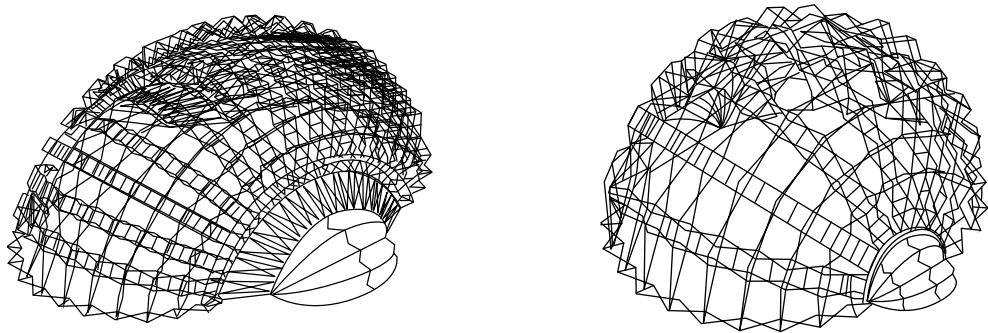
Posteriormente, se unen los puntos de la armadura guía, de tal forma que crean una malla tridimensional que funciona estructuralmente (figura 132), formadas por las figuras en "X". En los sentidos de unión, se refuerzan mediante un arco de sujeción generado por el proceso geométrico de la adecuación, el cual crea un arco de unión que mantiene el equilibrio de la forma de la figura.



**FIGURA 132.** Después de haber generado las geometrías de referencia, estas se unirán para formar la adecuación del caparazón del gusano de seda. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

Su condicionante es que el ángulo de las tijeras en la parte interior es igual a todas las tijeretas y con ello se puede equilibrar el sistema, pero como anteriormente se comentó, se fragmentó de manera que se unieran varios armazones para darle rigidez a la estructura, es por ello que se genera un punto polar fuera del círculo, que le da su figura característica. Aunque se puede observar que la geometría falla en un sentido y no le da la claridad completa de plegarse bidireccionalmente.

Después del proceso geométrico, se genera la modulación de este modelo, que brinda una gama muy variada de posibilidades de plegado, de acuerdo con el arco que se unirá a la cubierta, ya que esta es la que estabilizará y mantendrá unida al modelo (figuras 133, 134). Es importante mencionar que esta figura como es bidireccional nos produce combinaciones y uniones muy variadas; y dependiendo qué tan cerrado esté el arco, se obtendrá una figura biónica rígida, la cual asume la forma de un caparazón, pero a la vez es flexible por la composición de marcos de armadura plegable abierta en ambos sentidos.

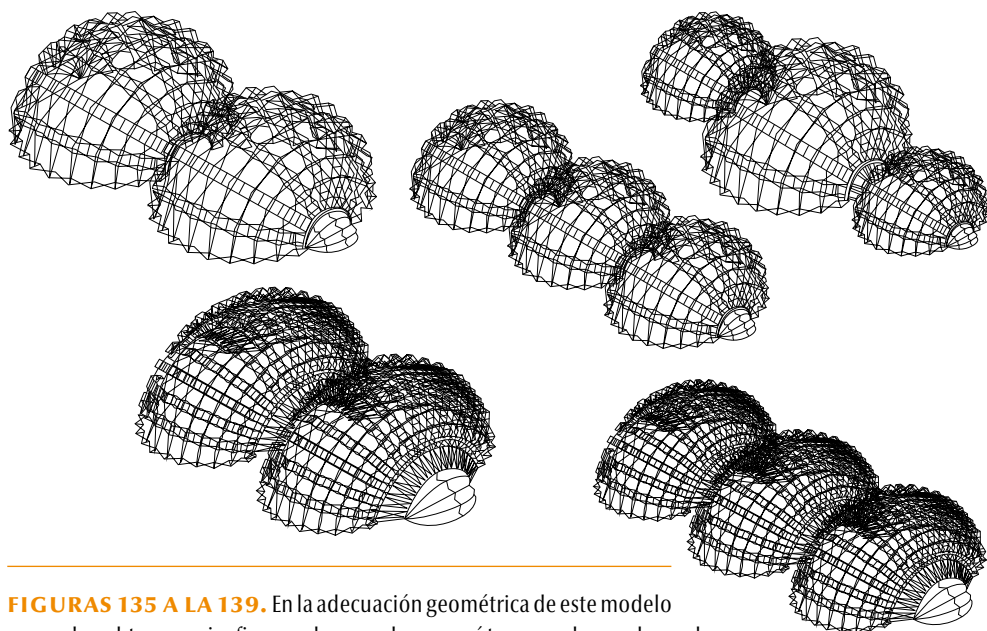


**FIGURAS 133, 134.** La conformación de la geometría del gusano se generó por medio de marcos plegables en ambos sentidos, sujetos por un arco de armadura que contiene el desplazamiento lateral de la geometría. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

La figura del modelo geométrico se compone de marcos plegables en ambos sentidos, unidos por arcos compuestos de armaduras, formados por una "X", que constituyen un armazón rígido; éste sirve para contener el desplazamiento lateral en un sentido de la cubierta plegable y este ligamento puede repetirse varias veces en la cubierta, hasta crear la figura geométrica de un gusano compuesta por varios anillos plegables. Las repeticiones itinerantes de la geometría se deben a que está dispuesta por muchas partes estandarizadas.

Este proceso geométrico puede tener varias escalas y uniones, pero su repetición sólo puede ser en un sentido, donde los arcos se unen con la cubierta (figuras 135 a 139). Estas segmentaciones generan una estructura orgánica más grande, pasan-

do a ser la figura inicial de un sólo segmento al gran cuerpo que se forma en el modelo geométrico. La conformación de estas modulaciones representa una geometría compleja, dado que sólo se inicia con una figura normal repetida varias veces hasta conformar una gran retícula flexible (Morales, C. C., 2010, 2011).



**FIGURAS 135 A LA 139.** En la adecuación geométrica de este modelo se pueden obtener varias figuras, de acuerdo con qué tan cerrado sea el arco de ligue y este a su vez será un punto de repetición del mismo modelo segmentado.

Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

### 3.7. EXPERIMENTACIÓN DE UNA GEODÉSICA TRANSFORMABLE MULTIDIRECCIONAL

Para concluir la etapa experimental por modelación de estas series de ejercicios de estructura de malla cuadricular hacemos un paréntesis. El Dr. Escrig dice: “que las estructuras de mallas triangulares son de mayor eficiencia estructural, ya que su configuración de desarrollo distribuye mejor los esfuerzos provocados dentro de sistema”, aunque se han estado estudiando diferentes metodologías geométricas para hallar la mejor estructura construible. En este caso, las mallas cuadriculares son las que más fáciles se pueden construir con una geometría descriptiva.

Las desventajas en ellas son los mismos espacios cuadrados en los que se tiene que tomar en cuenta arrostramientos para absorber dichas diferencias de estabili-

dad; dicho lo anterior, la observación de la figura de tijereta plegable nos proporciona diferentes geometrías que tienen un patrón modular, éste se utiliza para generar la modulación de los modelos adaptables al contexto, pero existe la incógnita de la inestabilidad horizontal en las uniones.

Estos modelos tienden a variar constantemente en sus segmentos y se generan con regularidad en terrenos planos y óptimos para su crecimiento geométrico. Anteriormente se explicó el proceso de esta geometría, pero para entender el concepto del siguiente modelo se experimentarán dos formas que se aplicarán para construir una estructura flexible y modular.

Se experimentó con las mismas figuras básicas anteriores, pero ahora se construyeron modulaciones más complejas, las cuales son de una geometría muy caótica por la reproducción de la misma figura, ya que un ligero movimiento y su constitución constructiva cambian constantemente por la acción confusa de la misma forma.

Como esta se conformará de varios cuerpos, uno de estos será del mismo género que en el primer ejemplo, se arreglará con geodésicas rebajadas, y para interpretar esta retracción se ejecuta una pequeña modelación de una geodésica rebajada en forma de iris, tal como se realizó en el primer experimento. Pero esta vez se mecanizó la abertura con una articulación de paraguas plegable, donde el tramado central le da mayor flexibilidad para el desplegado; con cualquier movimiento cambia su figura geométrica, pero su forma reticular ayuda a absorber las fuerzas que interactúan en ella y cambia su forma para integrarse al contexto.

Observando este perfil estructural se generó un modelo mecánico conceptual para entender cómo absorbe la fuerza interna dicha estructura (figuras 140, 141, 142). Su constitución está formada por piezas en forma de "X" que constituyen una cúpula geodésica circular, este modelo a su vez se puede reproducir varias veces hasta formar un cuerpo complejo de diferentes formas, creando una geometría más compleja y de varias modulaciones de una misma figura.



**FIGURAS 140 A LA 142.** La generación de la forma de las tijeras puede utilizarse para generar todo tipo de formas plegables. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).



Enseguida se procesan una serie de iteraciones modulares de geodésicas más grandes de la estructura de paraguas, hasta formar un conjunto de geodésicas para ver el tipo de iteración que resultaría, en la concepción de una piel más flexible que regule los espacios (figuras 143 a 148).

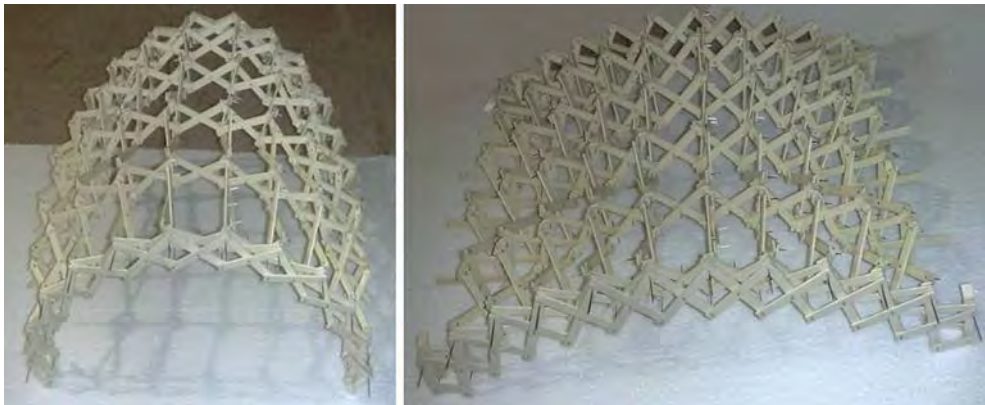


**FIGURAS 143 A LA 148.** La experimentación nos ayuda a tener parámetros conceptuales de diseño de una estructura plegable. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

La infinidad de reproducciones de una estructura transformable pueden ser muy variadas, pero el concepto de modulación es una de las propiedades más importantes en esta geometría. Esta reproducción producida por una figura base puede generar vastas formas de repetición y conexiones entre ellas mismas hasta formar una gran figura.

Siguiendo con la experimentación de geometrías transformables, se forja la malla central del cuerpo del sistema, que es una cúpula esférica. En este concepto se analiza la forma del despliegue en la maqueta, compuesta por varios anillos que le ayudan a moverse constantemente, lo que hace cambiar de forma continua y adaptarse a diferentes tipos de terrenos, esto también gracias a que sus arcos tienen la flexibilidad de replegarse y expandirse de acuerdo con la topografía del terreno en donde será ubicada.

La generación del modelo experimental mecánico se elaboró con base en este concepto, donde su cuerpo está formado por marcos de alma abierta plegables (figuras 149, 150), creados por piezas “X” que ayudan a cambiar constantemente su forma en ambos sentidos y le da la característica de adaptación a todo tipo de terreno.

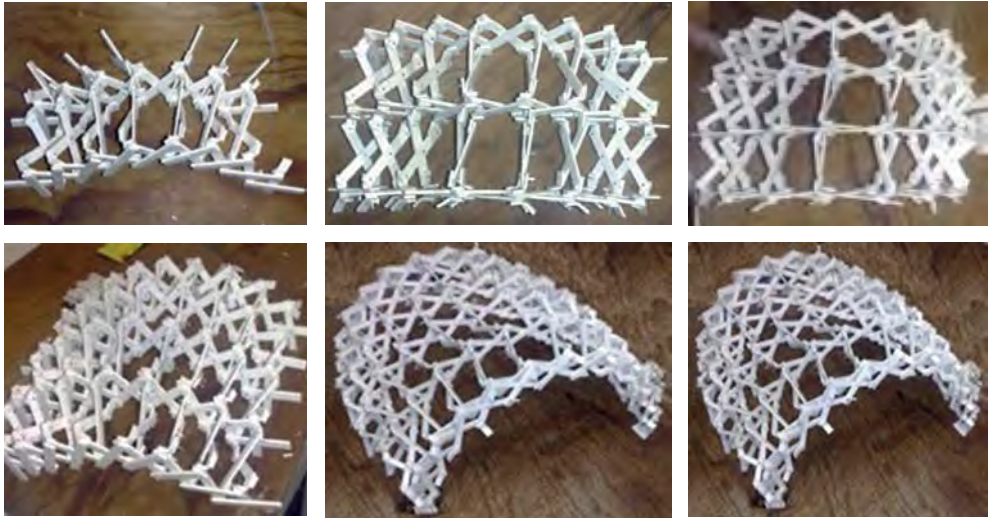


**FIGURAS 149, 150.** El desarrollo de una estructura flexible dependerá de la aplicación física-mecánica de la pieza y la forma geométrica del modelo generado, ya que esta fue realizada con base en una figura circular segmentada varias veces, en ambos sentidos, bajo el concepto del gusano. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

La experimentación da la pauta para generar nuevas metodologías de diseño, esto quiere decir que ayuda a entender nuevas formas de generar el diseño. Se concibió un contra marco de forma triangular, para estabilizar el equilibrio del modelo y comprender cómo la geometría es soportada por dos grandes marcos.

Después de un breve análisis de la figura geométrica que aplicaremos en nuestro siguiente ejercicio, ésta se construirá con base en la forma de una cuadrícula esférica, gracias a ella todos sus miembros tienen la misma distancia y forman un caparazón geodésico rebajado que actúa de forma ideal para repartir los esfuerzos internos.

Teniendo en cuenta esto se construirá la siguiente adecuación geométrica (figura 151 a la 156), en la que su cuerpo está formado por varias iteraciones, varios anillos que ayudan a soportar fuerzas externas de gran magnitud, cuya figura cilíndrica le favorece a adaptarse a diferentes asentamientos, sus apoyos de forma triangular absorben y dirigen las cargas hacia ellos. Esto gracias al marco perimetral que se le anexa para que sirva de sostén a la cubierta desplegable en ambos lados.



**FIGURAS 151 A LA 156.** La producción de las piezas flexibles y estandarizadas ayudan a generar estructuras de grandes claros, esta propiedad la adquiere por la composición de marcos segmentados plegables, estas estructuras pueden reproducirse varias veces. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

El modelo geométrico de este proyecto estará producido por marcos en “X”, esto ayudará a plegarse en ambos sentidos para adquirir diferentes formas en el espacio. La segmentación se fundamentará en marcos de forma circular que se repetirán varias veces en ambas direcciones, hasta conformar un cuerpo cilíndrico fracturado con la posibilidad de generar varias posiciones. Los arcos hechos de figuras en “X” ayudan a fabricar una serie de piezas estándar que facilitan la producción de este tipo de estructura caótica (figuras 157 a 159).

La estructura del modelo ya desplegado funcionará como una armadura de alma abierta, superficie de donde se transmitirá el esfuerzo en la estructura hacia la unión de los anillos hechos con base de armadura que, a su vez, rematan con apoyos articulados para evitar momentos de mayor magnitud que perjudiquen la estabilidad del modelo.

A continuación, se diseña la geometría lateral, el entramado cilíndrico se conforma por tres grandes cuerpos en donde uno de ellos es más grande, éste se une por medio de una armadura plegable que ayuda en conjunto a amortiguar los desplazamientos de los tres, en los que se encuentra a la estabilidad estática de los elementos, su propiedad plegable le ayuda a contraerse y transportarse de manera fácil a diferentes sitios.





**FIGURAS 157 A LA 159.** La modulación de los modelos experimentales puede llegar a obtener geometrías caóticas y complejas. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

Para terminar el modelo tipo gusano, se remata con una cúpula geodésica rebajada (figuras 160, 161), donde su forma está constituida de armaduras en “X” que se pliegan en dirección Y, sujetos por una viga guía que ayuda a desplazar el armazón para cerrar su cuerpo en los extremos, ésta también absorbe los desplazamientos de la armadura grande; su figura inicial también principia por una “X”, que le da la propiedad de estandarizar el cuerpo y transportarse fácilmente a otras superficies.



**FIGURAS 160, 161.** La geometría de los módulos de tijeras puede llegar a componer estructuras geodésicas plegables. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

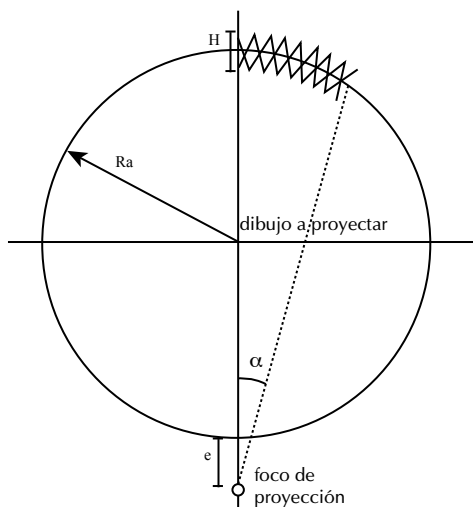
El modelo ya en conjunto se equilibra en ambos sentidos por su forma cilíndrica, se mantiene estable gracias a sus apoyos que terminan en punta articulada al igual que sus extremos geodésicos, esto ayuda a contener los empujes naturales de la estruc-

tura y arquitectónicamente se realiza una geometría versátil para concebir varios espacios; estructuralmente eficientes para transmitir las fuerzas en su cuerpo hasta los apoyos sin causar irregularidades geométricas, también queda claro que la geometría orgánica ayuda a producir formas innovadoras, muy adaptables y flexibles para integrarse a todo tipo de terrenos (Morales, C. C., 2013c, 2013d).

### 3.8. COMPATIBILIDAD GEOMÉTRICA

Se ha hablado de la compatibilidad geométrica de una malla cuadrada geodésica curva, sin embargo, podemos encontrar otro tipo de malla que se requiere para el desarrollo de la malla plegable curva, por lo que se mostrará cómo construir una malla curva triangular plegable, ya que ambas comparten una transición matemática similar. De los dos casos de malla plegable se podría resolver los modelos antes presentados, ya sea con una malla cuadrada o malla triangular.

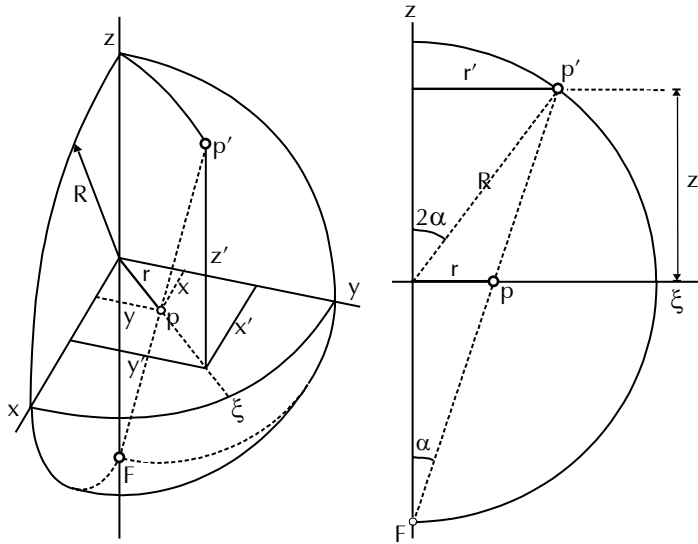
El proceso inicialmente es similar a los procesos estándares: en primer lugar, definimos la malla plana a usar y la proyectamos sobre la superficie esférica. El plano donde esté dibujada la malla no es significativo y solo afectará a la escala de la proyección (figura 162), de la misma forma que lo haría variar el tamaño de este módulo base (Escrig, F., 1984, 1988) (<https://es.scribd.com/>).



**FIGURA 162.** La adecuación geométrica analítica y matemática juega un papel importante en las adaptaciones geométricas de los modelos experimentales, ya que su desarrollo ilustra una guía para generar una malla plegable. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2013d), Escrig, F. (2012).

El foco de proyección sí es significativo, pues influirá en que los distintos módulos sean más o menos similares. Si los módulos son muy dispares, será más difícil que

cumplan las condiciones de plegado y desplegado. Normalmente dan buenos resultados focos situados cerca del polo opuesto al centro de la malla proyectada. Si se plantea la proyección desde el polo sur de la esfera (figura 163), el esquema de trabajo será el siguiente:



**FIGURA 163.** La experimentación nos ayuda a entender cómo será el proceso de geometrización descriptiva de una malla plegable triangular o cuadrada de una adaptación geométrica-matemática, por ello es importante saber cómo se desarrollará su geometría y poder construir un modelo aproximado de un sistema transformable. Fuente: Morales, C. C. (2013d), Escrig, F. (2012).

Las ecuaciones ahora se complican un poco más. Tenemos como datos el radio de la esfera  $R$ , la posición del punto a proyectar  $(x, y, 0)$  y por tanto  $r$ , y la excentricidad  $e$  del foco de proyección. Nos quedan como incógnitas básicas  $r'$  (a partir de la cual ya obtenemos  $x', y'$ ) y la cota  $z'$  (Escrig, F., 2012) (<https://es.scribd.com/>).

$$\left. \begin{aligned} r' &= r + d = r + z' \cdot \operatorname{tg}(\alpha) = r + z' \cdot \frac{r}{R+e} \\ p' \in R &\Rightarrow R^2 = z'^2 + r'^2 \Rightarrow z' = \sqrt{R^2 - r'^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow r' = r + \sqrt{R^2 - r'^2} \cdot \frac{r}{R+e}$$

$$\frac{r' - r'^2}{\sqrt{R^2 - r'^2}} = \frac{r}{R+e} \Rightarrow \dots \underbrace{r'^2 [(R+e)^2 + r^2]}_A - \underbrace{r' \cdot [2r \cdot (R+e)^2]}_B + \underbrace{[r^2 \cdot (R+e)^2 + r^2 \cdot R^2]}_C = 0$$

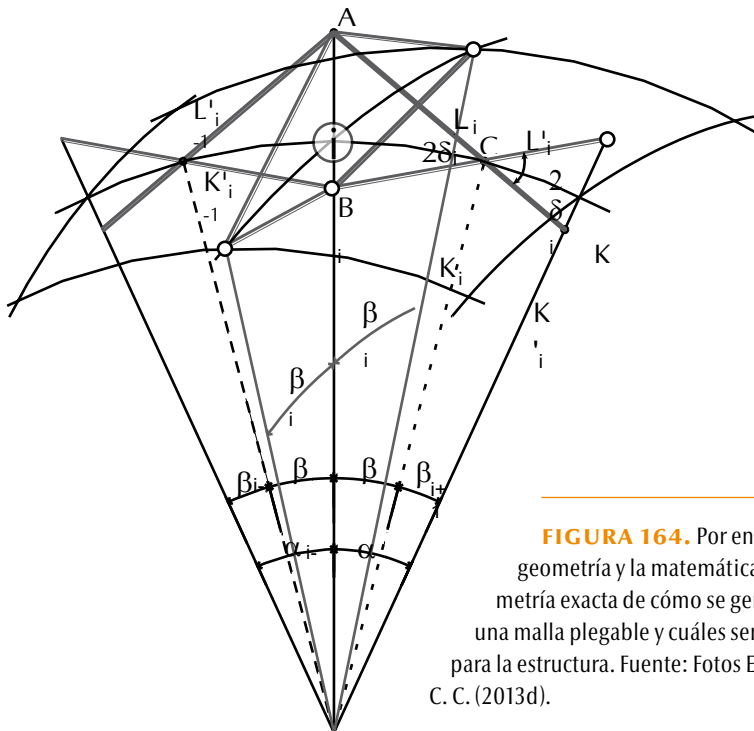
Resolviendo la ecuación de 2.º grado resultante obtenemos las dos posibles soluciones para  $r'$ . Obviamente, para los casos habituales, tomaremos el valor mayor, que es la intersección del rayo de proyección con el casquete superior (el valor más pequeño lo es con el casquete inferior). Una vez determinado este valor, las coordenadas de  $p'$  ( $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ) ya son inmediatas:

$$x'x = \frac{r'}{r}$$

$$y'y = \frac{r'}{r}$$

$$z'Rr' = -\sqrt{22}$$

Una vez que tenemos la malla plana proyectada sobre la esfera debemos hallar los puntos  $C$ , que estarán en un lugar intermedio de estos segmentos circulares cubiertos por un ángulo que llamamos  $i$  que serán datos importantes para el desarrollo de la geometría. Y es aquí donde planteamos una alternativa al sistema habitual (figura 164), planteando la posibilidad que el canto de la malla sea variable y así generar la curva geodésica de una geometría plegable (Escrig, F., 1984, 1988, 2012) (<https://es.scribd.com/>).



**FIGURA 164.** Por ende, el resultado de la geometría y la matemática nos desarrolla una geometría exacta de cómo se generará la construcción de una malla plegable y cuáles serán los ángulos críticos para la estructura. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2013d).

Posteriormente, se propone la malla en su posición final desplegada y por la condición de plegabilidad, sabemos que todos los  $K_i$  que concurren en un nudo  $i$  deben ser iguales, de modo que podemos plantear el sistema de ecuaciones:  $K_i = C_i + L_{i+1}$ , con tantas ecuaciones como segmentos  $K_i$  tengamos y tantas incógnitas  $L_i$  como vértices  $C_i$  tengamos. Resolveremos este sistema de ecuaciones si obtenemos los ángulos  $B_i$  correctos, esto nos dará los puntos de cruce  $C$  y con ellos la figura final de la geometría (Morales, C. C., 2013d) (Escrig, F., 1997, 2012) (Chilton, J. C., 1998) (<https://es.scribd.com/>).

### 3.9. ADECUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE CÚPULA DE MÓDULOS CUADRADOS

Esta adecuación tomará los parámetros antes comentados, pero solo se realizará por un método geométrico. Para ordenar esta malla, dicho proceso genérico es similar a los ya comentados, para este caso se desarrollará una malla cuadrada en la que se define el módulo a usar y se crea una retícula base sobre la esfera a cubrir con dicho módulo. Se realiza con una malla cuadrada geodésica una vez explicada de forma matemática su compatibilidad con la malla triangular, pero para este ejercicio es mejor la optimización de la adecuación en una malla cuadrada.

Para esta primera cúpula varía la forma de definir la retícula base. En vez de los típicos métodos de generar la retícula en un plano y proyectarla, se optó por un sistema que resultase muy sencillo constructivamente, en donde todas las barras de la estructura sean exactamente iguales (Escrig, F., 1984, 1988) (<https://es.scribd.com/>).

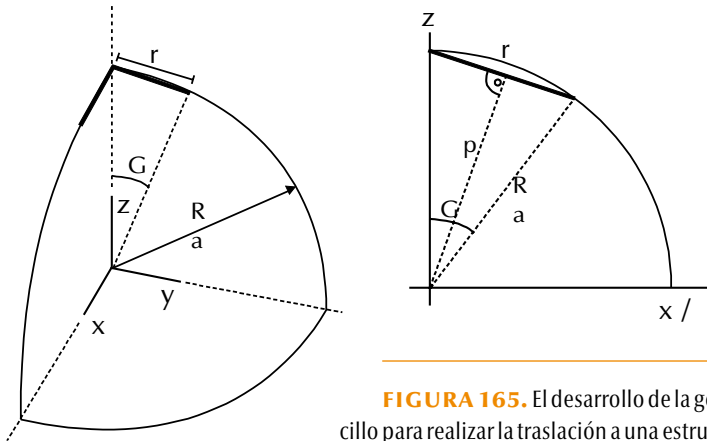
En este ejercicio se hace hincapié en que el método gráfico es el más adecuado para dicha compatibilidad y adecuación geométrica, dejando bajo la consideración la posibilidad de hacerse matemáticamente, pero es mucha carga de trabajo para su desarrollo. Se pretende hacer lo más sencillo posible, respetando la regla de modulación y estabilidad de su geometría.

Continuando con la explicación, este ejercicio es factible y relativamente sencillo, basta con conseguir que la retícula base trazada sobre la superficie esférica tenga todos los lados con módulos iguales.

El proceso consiste en partir de un punto (figura 165), que en nuestro caso es el polo, de allí disponer las barras de lados iguales hasta alcanzar el número de módulos deseado. Veamos el proceso para un cuarto de la cúpula, luego por simetría será fácil trazar el resto de la cúpula (Escrig, F., 1984) (<https://es.scribd.com/>).

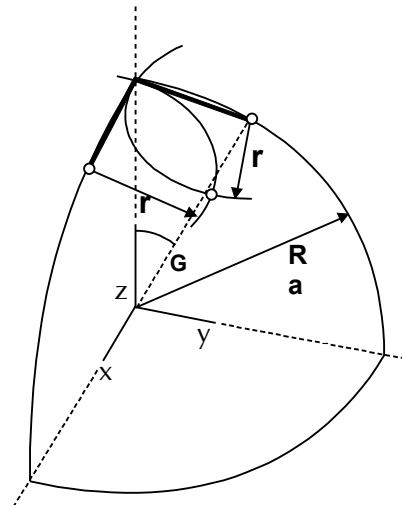
Si llamamos  $R_a$  al radio de la cúpula y  $r$  al lado constante de la malla base, a partir de estos es fácil determinar el ángulo de cobertura correspondiente  $G$ . Repitiendo este sobre los círculos máximos contenidos en los planos coordenados  $yz$  y  $xz$  ob-

tenemos de modo inmediato los vértices de la retícula para estos planos. Los puntos que entrañan mayor dificultad serán los intermedios. Para hallarlos (figura 166), geoméricamente bastaría con trazar a partir de dos puntos conocidos e inmediatos al buscado, dos circunferencias sobre la esfera, con centro en estos puntos y con radio  $r$ . La intersección de estas circunferencias nos daría dos puntos, uno ya conocido, y el otro es el punto buscado (Escrig, F., 1988) (<https://es.scribd.com/>).



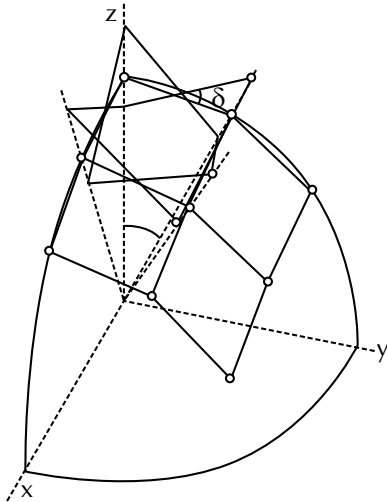
**FIGURA 165.** El desarrollo de la geometría debe ser básico y sencillo para realizar la traslación a una estructura que sea fácil de construir.  
Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2013d).

**FIGURA 166.** El siguiente paso importante para que sea modular dicha geometría es encontrar la intersección del punto de unión con la siguiente plegadura, ya que con ellos se repetirá el mismo movimiento para todas las "X" de la geometría. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2013d).



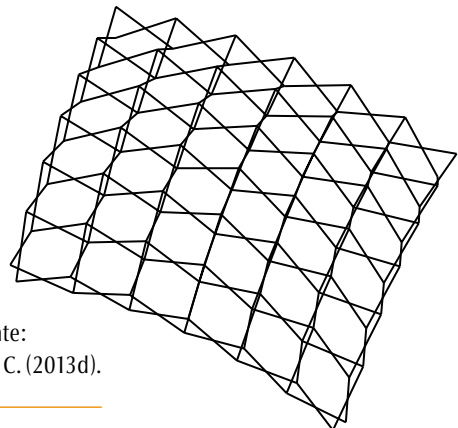
Geoméricamente, este desarrollo se traduce en hallar la intersección de tres esferas en el espacio: la esfera principal, de radio  $Ra$  y dos pequeñas de radio  $r$ . Repetimos este proceso sucesivamente hasta completar el tamaño de la malla deseada.

Este proceso nos garantiza efectivamente que todos los lados tienen la misma dimensión, pero presenta el inconveniente de que a medida que nos alejamos del polo y de los planos coordenados, los cuadrados se van deformando cada vez más (figura 167) dando lugar a rombos pronunciados, lo cual no resulta demasiado estético (Escrig, F., 1984) (<https://es.scribd.com/>).



**FIGURA 167.** En consecuencia, se desarrolló y localizan los rombos de unión que ayudarán a servir de eje para construir la cubierta plegable. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2013d).

A partir de aquí, el proceso ya es conocido, ya que el punto de cruce de las aspas siempre se podrá localizar gracias a la forma de la esfera que es modulable. Se define entonces el ángulo de apertura  $\alpha$  dimensional (figuras 168) y a partir del mismo se pueden hallar los nudos superiores e inferiores e ir trazando las aspas como en los métodos habituales. En las imágenes siguientes vemos el resultado de la generación para un cuarto de cúpula (Morales, C. C., 2013d) (<https://es.scribd.com/>).

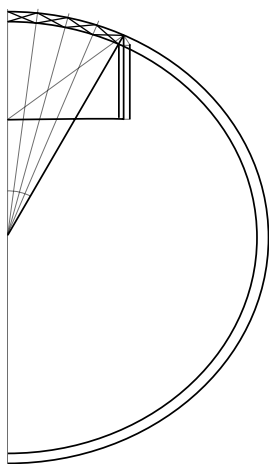


**FIGURAS 168.** La obtención de la geometría debería ser modular, solo se necesita una parte para que se pueda producir el desarrollo completo de la estructura. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2013d).

### 3.10. APLICACIÓN DE LA ADECUACIÓN GEOMÉTRICA A LOS MODELOS EXPERIMENTALES

De acuerdo con lo precedente, se ejecutan las adecuaciones geométricas de la estructura del ejercicio anterior, esta simulará la forma de un gran espacio industrial. Siguiendo con el mismo trazo radial de la circunferencia como en los casos anteriores, la geometría que la constituye es un círculo segmentado rebajado, pero la adecuación de esta forma ayuda a estandarizar la figura. En este proceso se grafica a partir de un punto de origen “O”; posteriormente, se segmenta la figura en radianes, después se traza el círculo con líneas de referencia, una vez dividida en varias iteraciones, se trazan las figuras “X” que apoyan a la geometría.

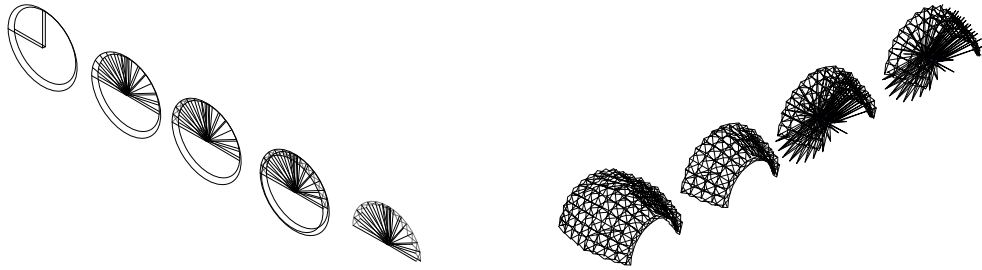
Continuando con la adecuación, estas se multiplican sobre el mismo punto de origen, con ciertos grados de inclinación hasta formar el cuerpo plegable del gusano (figura 169), después se interrelacionan los puntos para formar la armadura en tijeras de plano Y, donde se conectan por medio de los nodos de intersección. Terminada la nave central, se procede a formar el marco plegable triangular con ángulos de inclinación de  $49^\circ$ , estos marcos ayudarán a estabilizar la geometría de cúpula rebajada, la cual por sí misma funciona bidireccionalmente en sus dos planos.



**FIGURA 169.** La adecuación se basa del mismo desarrollo geométrico anterior y nos da la figura de nuestro modelo experimental. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

Este desarrollo también adecua la cúpula lateral rebajada que ayudará a absorber los esfuerzos espaciales de la nave central (figuras 170, 171), estos se desarrollan en el punto de origen del marco generando una línea de referencia en los planos Z, para formar los puntos de intersección de la cúpula, posteriormente se multiplican con diferentes ángulos de encuentros, que servirán de referencia para colocar los puntos de unión de los arrostamientos.



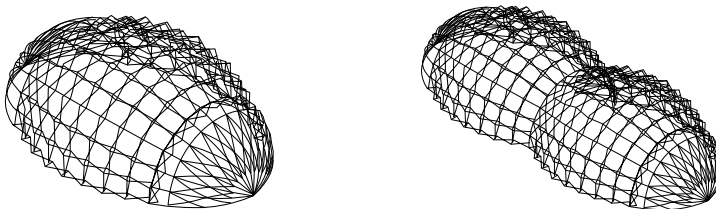


**FIGURAS 170,171.** Se superposiciona la geometría y se colocan los módulos hasta formar el cuerpo de la red plegable. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

Siguiendo con el proceso de adecuación, terminado los puntos y líneas de referencia se conectan los puntos con líneas que simulan los arrostramientos plegables, resultando una geometría geodésica rebajada compuesta por dos círculos circunscritos de dos radios diferentes que forman la figura final. En conclusión, la forma del modelo geométrico es solo una parte anillada de un gusano de seda, esta se puede multiplicar y formar un gran gusano flexible y adaptable a su entorno.

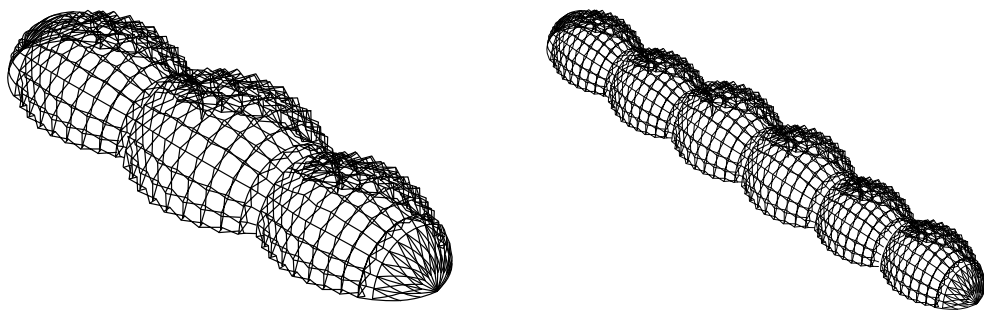
Para comprender su escala se ejecutan las segmentaciones de su geometría, lo que brindará las posibilidades de conexiones de la estructura y diferentes iteraciones que puede tener el modelo, ya que su principio es la integración de varias repeticiones de armaduras plegables en ambos sentidos.

La composición del modelo geométrico (figuras 172, 173) está concebida por marcos principales de alma abierta que se unen por tramas plegables, éstas sostienen las armaduras secundarias simples de la nave cuya iteración proporciona una gama de reproducciones hasta formar múltiples espacios; esto se obtiene por la reproducción de varios cuerpos en la estructura geométrica, unidos por anillos principales, que pueden tener una variedad de escalas y se sujetan por medio de armaduras que interactúan en toda su geometría.



**FIGURAS 172, 173.** La generación de la adecuación geométrica nos deja un panorama de cómo será la escala del modelo y cómo se puede combinar con diferentes segmentos y escalas de segmentos. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

La obtención de la geometría del modelo nos da pautas de diseño para generar la producción de los miembros, dado que su figura está realizada por medio de guías circulares (figuras 174, 175), sus partes pueden ser estandarizadas para una mejor adaptación al entorno; esto también nos proporciona una visualización de la escala del modelo y cómo conjugar sus diferentes figuras geométricas, gracias a la geometría descriptiva que ayudó a construir un modelo versátil, el cual puede ser grande y flexible para obtener diferentes formas en el contexto (Morales, C. C., 2009, 2013e).



**FIGURA 174, 175.** La experimentación nos ayudó a formar una geometría reticular plegable gracias a la adecuación geométrica simplificada que proponemos. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2009).

### 3.11. APROXIMACIONES DE DISEÑOS CONSTRUCTIVOS PLEGABLES

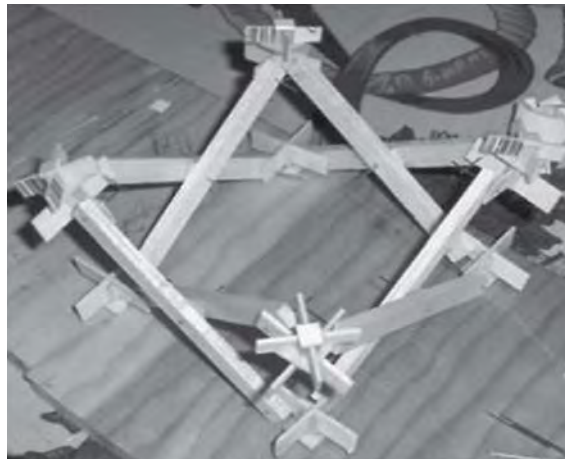
Para determinar el modelo metodológico final de todas estas experimentaciones geométricas, en este apartado se desarrolla la modelación de un sistema que se analizará en la siguiente etapa del estudio. En esta propuesta formal se aplicará toda la teoría expuesta anteriormente y ayudará a construir un sistema con mucha eficiencia estructural, cuya característica principal (la plegabilidad de sus miembros) permite deducir que el factor importante es crear un nodo que sea capaz de ayudar a plegar la estructura lo más sencillo posible, pero que también soporte el constante movimiento de dichos miembros que causan muchas tensiones externas a las contempladas.

Para solucionar esto, se experimenta el diseño del nodo, este debe ser lo más puntual posible, es decir, sus miembros no deben tener excentricidad a la hora de conectarse, ya que en cualquier desfase causaría que la geometría actúe de diferente manera a la que se ha proyectado en los anteriores ejemplos. La búsqueda de un diseño mejorado de uniones ayuda a crear un parteaguas de posibilidades tecnológicas, ya que las estructuras transformables son pocas veces efectuadas, su desven-

taja consiste en que son muy difíciles de manufacturar. En este proyecto se tratará de elaborar una unión más acorde y lo más sencilla posible para consumir dicho sistema, también se verán la conexión conceptual de la membrana textil dentro del modelado aproximado, para analizar el tipo de conexión que puede tener dicha membrana, aunque este no se profundizará mucho en este tema.

Para comenzar, se ejecuta el primer modelado experimental, este consiste en realizar nodos cuadrados con placas situadas en sus ejes simétricamente para formar una cruz perfecta (figuras 176, 177); la parte superior del nodo está constituida con otro accesorio que de igual manera está hecho con placas y forman una cruz, pero giradas a 45°; en la parte inferior el nodo es sencillo y sólo se utilizará para sostener y conectar los miembros en cruceta.

Es de mencionarse que el accesorio de la parte superior del nodo de arriba es a 45°, ya que se trata de una cúpula rebajada, esto quiere decir que sus cruces nodales pueden unirse en un punto que los converge, aunque no es del todo cierto ya que en el modelo se observó que gracias al pretensado de la unión se pudieron colocar los miembros, aun así existen algunas uniones que no empatan con la cara de la placa.



**FIGURAS 176, 177.** La experimentación nos ayuda a generar los parámetros de diseño, para construir el modelo correcto de la geometría plegable y este nos ayuda a verificar los errores. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C., 2010.

Siguiendo con el modelado, se unen los miembros de arrostramientos con un nodo de placas a ejes, formando una cruceta más sencilla, esta unión es importante ya que sostiene la estabilidad de la estructura en ambos sentidos y reparte la presiones

que puede tolerar la estructura; a esta conexión se le agregó experimentalmente una unión tipo paraguas, que le da mucha más versatilidad a la estructura y la estabiliza aún más. Pero esto solo se colocó para probar dicha experimentación y se dejará para otro tipo de proyectos, en este caso solo se usará la conexión de contraventeo a ejes para unión de los vanos que forma la cuadrícula geodésica esférica.

Posteriormente, se construye el marco de conexión, mismo que absorberá todos los esfuerzos producidos estáticamente en la estructura y éste lo compartirá hacia los apoyos, en este caso teóricamente están simplemente apoyados y articulados (figuras 178, 179) para que la estructura obtenga más movilidad.



---

**FIGURAS 178, 179.** El marco de alma abierta se elaboró con combinaciones de ángulos y nodos, este sería una conexión importante para el proyecto de investigación, ya que resuelve la estabilidad de la geometría. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

---

La teoría que se manejará en este modelo plegable es que esta funcionará como una cubierta de vigas de alma abierta y es más eficiente si sus nodos son rigidizados con la cubierta, pero antes de estudiar la cubierta, se dice que la viga de marco estructural estará compuesta por dos tipos de nodos, el de arriba es pequeño y está construido

con placas a ejes en sentido longitudinal y en el transversal por placas compuestas con ángulos de  $27^\circ$ .

Para que los miembros en cruceta puedan situarse en el ángulo correcto del plegado, en la parte inferior del marco el nodo es combinado con un miembro alargado longitudinal y transversalmente, con placas situadas de igual manera que las de arriba a  $27^\circ$ , con ello se forma la figura triangular que le da estabilidad propia al marco de alma abierta.

Por último, la cubierta es la composición de la primera etapa del modelo, solo se reproduce a lo largo de toda estructura y forma el casquete esférico de la nave (figura 180), las partes de este modelo se fueron probando paso a paso hasta que se observó que los nodos de contraventeo y sus conexiones con el nodo de arriba de la estructura no siempre coincidían en sus grados de unión, esto se debe tomar en cuenta para que el proyecto final no tenga los mismos problemas constructivos, el peligro sería que el miembro entrara en plastificación o ruptura, que sería lo más catastrófico.



**FIGURA 180.** La cubierta ya integrada con las conexiones necesarias funciona como una superficie activa de alma abierta y redistribuye perfectamente los esfuerzos en la estructura. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

En consecuencia, al unir estas dos partes de la cubierta, esta se equilibra perfectamente, pero lo más importante, se detectan posibles defectos que pueden llegar a afectar a la estructura. Podemos comprobar que se abre perfectamente bien cuando no tiene los marcos (figuras 181, 182), sin embargo, al conectar los arrostramientos no tiene la misma plegabilidad que antes. Esto se debe a que no se generó la geometría adecuadamente por la uniformidad de los miembros de arrostramientos que forman los marcos estabilizadores, dando como resultado un exceso de rigidización en los vanos de la estructura. Con estas experiencias, es posible desarrollar el modelo aproximado a escala 1:20, ya que dichas dimensiones de la estructura experimental final pueden ser de 25 m, de claro transversal y 27.5 m longitudinal (Morales, C. C., 2010).



**FIGURAS 181, 182.** La cubierta integrada con sus dos partes funciona establemente. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

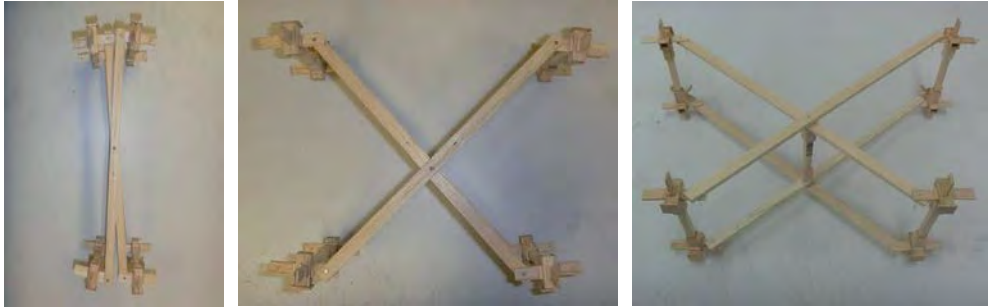
### 3.12. APROXIMACIÓN DE UN PROYECTO APLICADO

La aproximación anterior coadyuvó a crear un método geométrico para generar una propuesta más formal a una escala conveniente 1:20, donde se detectará si el nodo anterior realmente podrá servir para constituirse posteriormente en un prototipo 1:1 previamente calculado y analizado. Es aquí donde se elabora el proceso de la cubierta plegable y se deduce que para que se tuviera mayor control de retracción es necesario una cubierta cilíndrica plegable unidireccional curva, quiere decir, que se pliega circularmente solo en un sentido y en el otro se pliega linealmente, esto se contribuye para estandarizar el diseño de las conexiones y de los arrostramientos.

Para comenzar, se desarrolla un nodo con medidas reales a escala y se selecciona en teoría una dimensión de tubo OR cuadrado de 85 mm de perfil, que servirá como base para formar el nodo con placas simuladas y se interconectarán en esta pieza; el material que se utiliza es madera bálsamo para modelar en teoría dicha estructura.

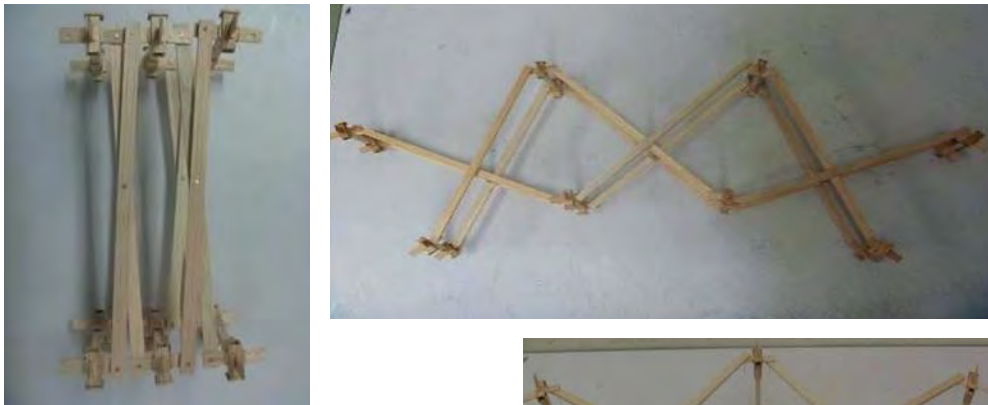
La conexión de la parte superior estará compuesta con otra placa de nodos para albergar la conexión de contraventeo, por ello se refuerza con placas el cruce (hechas de madera), para que no se despegue la pieza al conectar todos los miembros (figuras 183 a la 185). Dicho esto, todas las conexiones del modelo son casi iguales, excepto la conexión del marco que actúa como viga de alma abierta, por lo que se le refuerza con conexiones tubulares del mismo grosor, perfilado de 85 mm a escala 1:20, con esto la estructura se estabiliza y mejora su plegabilidad.



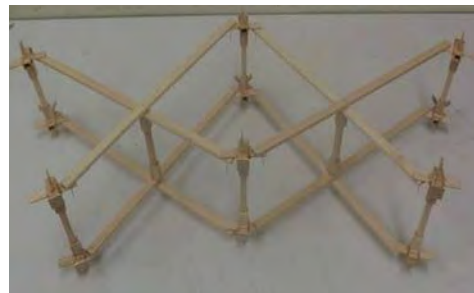


**FIGURAS 183 A LA 185.** El desarrollo de las conexiones de la cubierta se fue realizando paso a paso para que no hubiera ningún desfase que llegara a desequilibrar el sistema, de igual manera, se trató de manufacturar lo más preciso posible, para que todas las conexiones coincidieran eficazmente. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

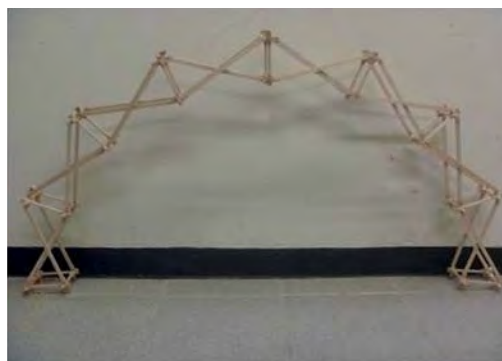
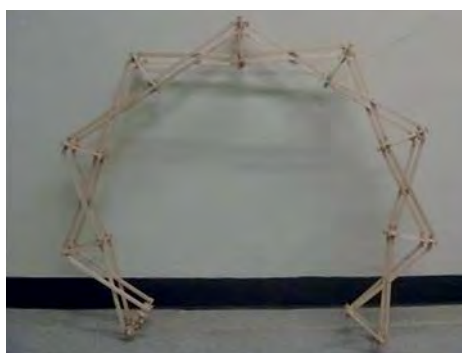
Por consiguiente, en ésta se va armando primeramente el marco, el cual estabilizará a toda la estructura plegable (figuras 186 a la 188). Es importante mencionar que las conexiones se hicieron a escala y tuvieron que colocarse clavos reforzados con una unión de placa de madera, este material ayudó mucho a la plegabilidad y la retracción de la estructura, para poder tener la certeza de que funcionaran idealmente para desplazarse y desplegarse (Morales, C. C., 2013e).



**FIGURAS 186 A LA 188.** Posteriormente, en las siguientes etapas, se ejecutaron paso a paso las pruebas de plegabilidad para cada miembro que se iba conectando. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).



Ya terminado el primer marco de la cubierta, se les hicieron pruebas de movilidad y plegabilidad (figuras 189 A 191), no funcionó el primer intento de armado de la cubierta, ya que esta tiene características que debe cumplir unidireccionalmente, donde las tijeretas para tener la habilidad de plegar deben tener una unión desfasada de su centro, porque eso permite que la unión del desfase pueda desplegarse en forma de arco. También debe obedecer la manera de conexión de las tijeretas, esto si por error se conectara alguna con el ángulo desfasado o con un larguero que no deba ir en la conexión, lo que causaría que la plegabilidad se deforme y por ende colapse la estructura.



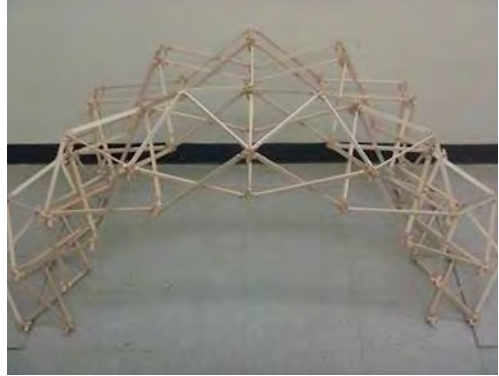

---

**FIGURAS 189 A LA 191.** El marco es una de las piezas fundamentales de la estabilidad del modelo, así que constantemente se vio que la plegabilidad de sus miembros y su forma fuese la correcta. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

---

Posteriormente, en el desarrollo del armado de la cubierta se fueron montando paso a paso las conexiones centrales de la estructura, probando poco a poco el plegado y desplegado de la cubierta (figuras 192, 193). Se notó que la plegabilidad de ciertos nodos no coincidían con el nodo de contraventeo, el problema consistió en que había cierta diferencia de distancias de los miembros de la tijera lineal a las tijeras de arco, arreglando estas diferencias se obtuvieron mejores ensambles.





**FIGURAS 192, 193.** El armado de los arrostros fue una de las conexiones clave para las cubiertas desplegables, ya que es la que estabiliza a cada módulo conectado entre sí. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

Con las correcciones realizadas, las uniones posteriores de la estructura no tuvieron ningún problema de conexión durante todo el proceso, en cada bloque armado se fue experimentado el plegado y desplegado del módulo en conjunto.

Una vez terminadas las conexiones de los módulos y los arrostros, se probó la plegabilidad en conjunto, la cual no tuvo mayor problema, solo se notó que el material ya no era el óptimo para trabajar, debido a que en el proceso de armado muchas piezas tronaron al probar la plegabilidad de la cubierta (figuras 194, 195).



**FIGURAS 194, 195.** Posteriormente, en el armado final de la cubierta, se analizó que todas las partes fuesen compatibles y no tuviera ningún error de conexión. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

En este paso se colocaron los rigidizadores verticales al contrario de los horizontales, los verticales facilitan la función de rigidizar la estructura e inmovilizarla para lograr mayor resistencia, pero también provoca que los esfuerzos se concentren en estos miembros y actúen en compresión pura y otros en tracción, esfuerzos que hacen daño a los nodos y provocan desgarramiento.

A pesar de ello, se pudo armar y rigidizar correctamente el modelo, con esto, el siguiente paso fue colocar una manta plastificada que simulara la membrana textil que se colocaría en la parte de inferior de la estructura (figuras 196, 197). Esta tiene la función estructural de rigidizar la estructura por medio del tensado que ayudará a estabilizarla, gracias a esa tracción. Podrá obtener la forma final del sistema, esto provee cómo sería la conexión de la membrana en la cubierta plegable y cómo se tendrían que teorizar sus conexiones dentro del sistema. La desventaja es que aumentan los esfuerzos considerablemente, ya que las presiones de aire incidirían con mayor fuerza en la superficie activa de la membrana. En conclusión, el modelo sirvió para tener un parámetro de diseño para este estudio.



**FIGURAS 196, 197.** La cubierta ya terminada tendrá el pretensado correcto para rigidizar la cubierta cilíndrica retráctil. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

La última etapa de este modelo se desarrolló en la generación de la cúpula geodésica rebajadas en los extremos, siguiendo el mismo tópico de diseño en el nodo, para no cambiar la estética del modelo se contempló también un nodo cuadrado y miembros rectangulares, con ello se verifica la estabilidad estructural del modelo.

Primeramente, esta geometría constituye tres tramos reticulares esféricos resueltos por medio de posiciones de los arrostramientos (figura 198), se notó que el modelo tenía cierta inestabilidad y se tuvo que colocar un arco en la parte posterior y una

sobreestructura para rigidizar la forma geométrica del modelo. Para concluir, la forma de la estructura se colocaron una serie de arcos que tienen la función de plegar el arco principal de la estructura ayudando a estabilizar la unión de la geodésica plegable.



**FIGURA 198.** La última etapa del modelo sirvió para comprobar la interacción de la geometría plegable de la geodésica con la cubierta, por lo cual nos deja conceptos de diseño para desarrollar la geometría plegable del modelo final. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2014a).

Con ello se resuelve el comportamiento de la geometría de la geodésicas en conjunto con la cubierta (figuras 199, 200). Uno de los problemas detectados en el modelo es que los miembros tienen que realizarse con tubos cilíndricos al igual que los nodos, ya que la unión de estos miembros con otros miembros tubulares con perfil rectangular o cuadrado generan mayor pandeo y radios de giros que la geometría de la cubierta se ve afectada en conjunto (Morales, C. C., 2014a, 2014e).



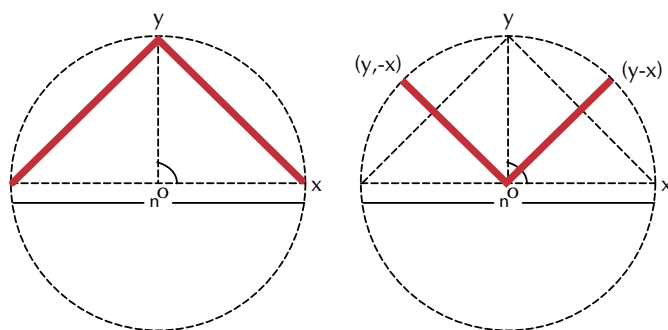
**FIGURAS 199, 200.** La geodésica se tuvo que rigidizar por medio de arcos y una sobreestructura ya que no tenía la estabilidad adecuada, también se remató con arco en el borde que ayudó a formar la figura final del modelo. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2014a).

## Adecuación geométrica del proyecto

Esta adecuación se desarrollará a profundidad con una metodología descriptiva gráfica, realizada anteriormente en este trabajo y donde se describieron sus parámetros para el desarrollo de este método, por lo cual nos da como razonamiento: entre más sencillo se realice la adecuación, más rápido se realizará la propuesta constructiva de la estructura. Para iniciar el desarrollo de la geometría de referencia, se toma de base el trazo cilíndrico esférico, porque brinda la mayor facilidad de formalizar la figura de la malla, y para reforzar dicha malla se triangulará con arrostramientos en sus espacios cuadrículados, pero como la malla es muy simple será fácil realizar modelos constructivos aproximados que sean un buen ejemplo de modelación constructiva.

Para lograr el diseño de esta estructura, se procede a analizar paso a paso la geometrización de referencia y observar detalladamente el procedimiento con el cual se generó cada punto de la estructura (que es algo compleja, pero de fácil entendimiento). El proceso de esta geometría comienza con la propuesta de una circunferencia de 25 m de diámetro. ¿Por qué de 25 m de diámetro? Porque ese será el claro que cubrirá los espacios de tipo industrial o exposiciones y la justificación es que este tipo de estructuras alcanza a cubrir grandes claros.

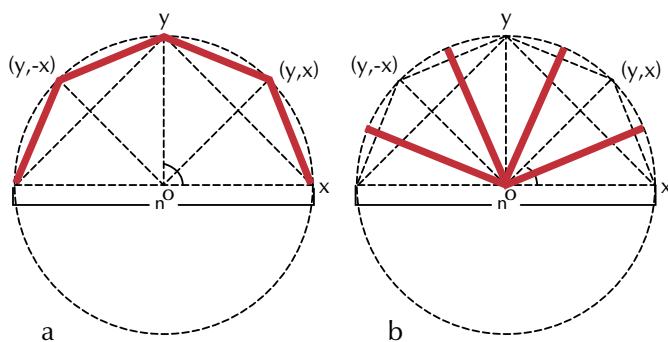
Para comenzar nuestro método, primeramente, se traza la circunferencia (figura 201), con una línea horizontal se traza el diámetro del círculo (línea de tierra) en el eje (X) del plano cartesiano, al centro de la línea de tierra o línea de diámetro del círculo se traza una línea a  $90^\circ$  hasta cortar la circunferencia obteniendo el eje (Y) del plano cartesiano.



**FIGURA 201.** La adecuación geométrica para la cubierta es de suma importancia para posteriormente calcularla, ya que define los puntos nodales. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

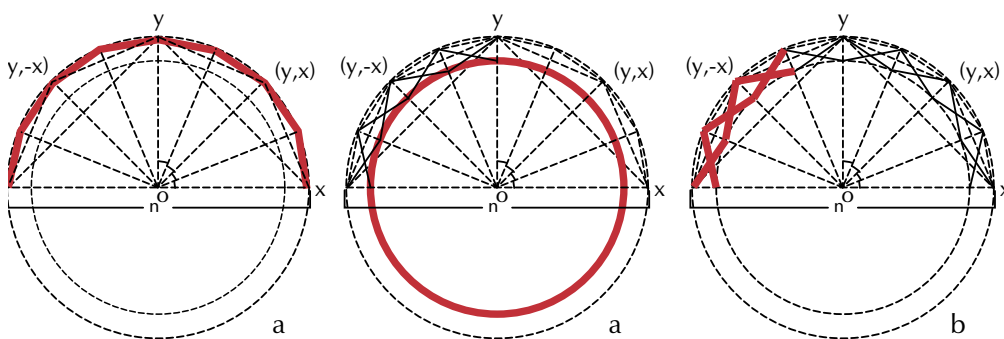
Después, se une el punto donde se cruza el eje (Y) a la circunferencia, hacia los dos puntos donde corta la línea de tierra a la circunferencia. Esas líneas trazadas tendrán el nombre  $(x-y)$ , las cuales estarán formando un triángulo como se muestra en la figura 202 inciso "a", por lo que se procede a hacer lo mismo hacia el otro lado, localizando el centro de la línea de tierra, trazando dos líneas a  $45^\circ$ , tomando como

punto de inicio el centro del círculo hasta interceptar justo por la mitad de la línea denominada “x-y”, ya que pasa por el eje horizontal “x” y el eje vertical “y”, como lo muestra la figura 202, inciso “b”.



**FIGURA 202.** El desarrollo de la graficación es sencillo y fácil para poder adecuarlos a una estructura. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

Una vez trazadas las líneas que forman los ángulos a  $45^\circ$  del centro de la circunferencia y “Y”, se tienen cinco puntos de intersección que cortan la circunferencia que se unirán trazando líneas entre ellas, como se muestra en la figura 203, inciso “a”. Después de unir las intersecciones, se volverá a realizar el mismo procedimiento que se utilizó al trazar las líneas a  $45^\circ$ , se generarán líneas tomando como punto de inicio el punto central de la circunferencia formando ángulos de  $22.5^\circ$ , estas líneas quedarán justamente a la mitad de las líneas de intersección a  $45^\circ$ , tal y como lo muestra en la figura 203, inciso “b”.

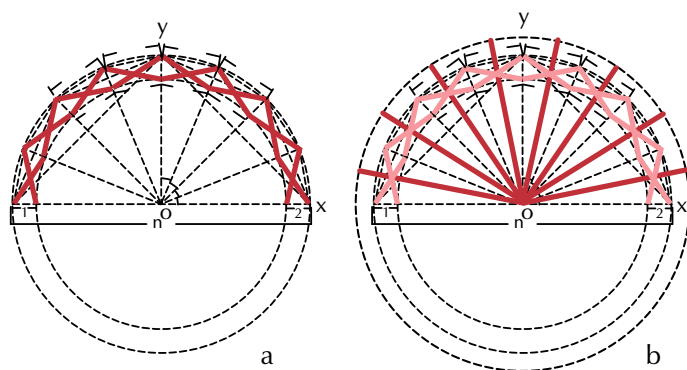


**FIGURA 203.** En esta fase se ve claro la creación del plano del marco estructural de la cubierta retráctil. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

Después se unen las nuevas intersecciones entre las líneas de los ángulos de  $22.5^\circ$  y los de  $45^\circ$  tal y como se muestra en la figura 204, inciso “a”, ya realizado esto, se generará otra circunferencia de 21 m de diámetro, la cual queda más pequeña que la primera circunferencia, para esta se tomará el mismo centro que la circunferencia anterior (figura 204a), el círculo interior surgió porque el peralte efectivo que se está tomando es de 2 m, muy sobrado pero se deja por el lado de la seguridad.

Ya con la circunferencia interior, se obtendrán nuevos puntos, con los cuales se localizarán líneas cruzadas otorgándoles el nombre de “X” o “tijeretas”. Para la realización de estas tijeras plegables, se unirán los puntos que interceptan las líneas de  $45^\circ$  y  $22.5^\circ$  con las dos circunferencias para obtener las “X”.

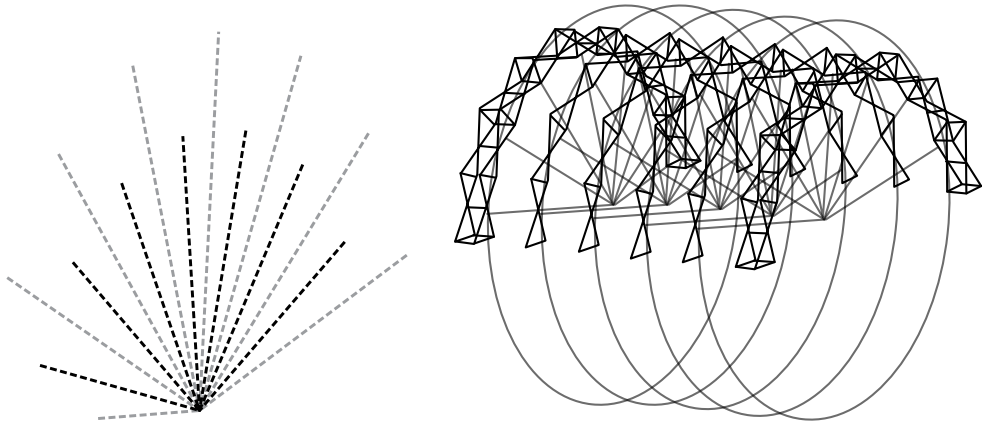
Por ejemplo: para realizar una de las tijeras, se unen uno de los puntos, en este caso, tomaremos el punto exterior izquierdo de la circunferencia (donde se une una de las líneas que forman los ángulos y la circunferencia exterior) con el punto interior derecho (donde se une una de las líneas que forman los ángulos y la circunferencia interior), ejecutando lo mismo, pero en el otro sentido. Se irán uniando los puntos en todo el contorno de la circunferencia (figura 204b) y de esta manera se obtienen las líneas cruzadas llamadas “X”.



**FIGURA 204.** La geometrización de la cubierta unidireccional es más sencilla por lo cual el número de pasos para realizarla no es complejo. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

Después de tener todas las líneas que forman las cruces, se reproducen siete vigas de tijereta en el plano Z: dos a 2 m de distancia y cuatro a 4.54 m de distancia, esta se contempló de la distancia equivalente de la tijereta en arco. Posteriormente, se traza otra circunferencia de 27 m de diámetro tomando el mismo centro de las circunferencias anteriores. Ya trazada la circunferencia exterior se trazarán bisectrices tomando como punto de inicio el centro de las circunferencias, hasta la intersección de cada una de las “X” antes trazadas, así como se muestra en las figuras 205, 206 (hasta la circunferencia exterior) (Morales, C. C., 2012a, 2013d, 2013e).

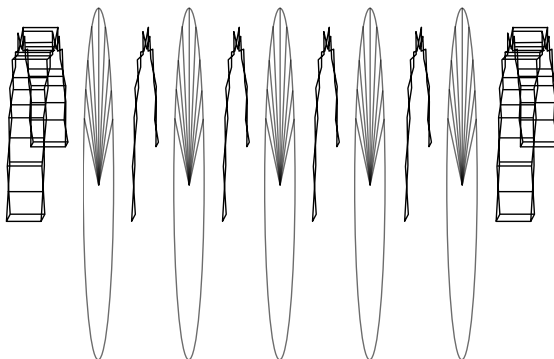




**FIGURAS 205, 206.** La segmentación de los arcos genera el distanciamiento lineal que va generar la forma final de la cubierta. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

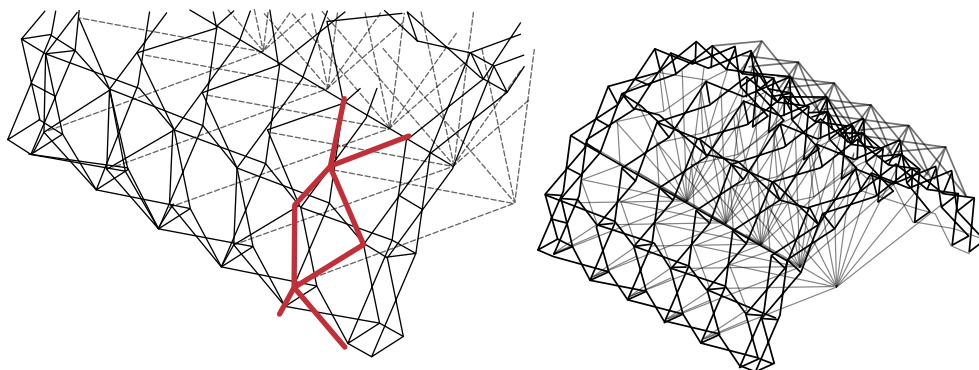
Estas últimas bisectrices trazadas y la circunferencia exterior servirán para proyectar los arrostramientos de la estructura. Los arrostramientos se realizarán en el plano (X, Y, Z). De acuerdo con esto se procede a dibujar el cuerpo de la nave con base en lo ya realizado.

Antes de la unión de los arrostramientos, primero se refuerza el marco colocado a 2 m de distancia uniéndolos con atiesadores horizontales para mantenerlo rígido y tenga espesor. Después se copia el marco a cada 4.54 m. Justo al centro, entre marco y marco, se colocan las bisectrices que interceptan cada "X" y las bisectrices que representan la separación de "x" a "x" (figura 207), estas bisectrices servirán para colocar los arrostramientos de la estructura. Obteniendo la estructura de esta manera, en el plano (X, Y, Z):



**FIGURA 207.** Las crucetas de contra-venteo ayudan a la geometría a estabilizarse estructuralmente, por consecuencia deben estar bien colocadas para que absorban los esfuerzos. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

Por último, se trazarán las líneas de los arrostros (líneas en rojo), uniéndolo los puntos de la parte exterior de cada "X" a la bisectriz o línea que pasa por la intersección el centro de las "X" (figura 208), se unirán así todos los puntos de la estructura hasta terminar, formando el cuerpo de la nave (figura 209). Con esto se concluye la graficación de la cubierta retráctil que servirá de referencia para el cálculo de la estructura plegable (Morales, C. C., 2012a, 2013d, 2013e).



**FIGURAS 208, 209.** Terminada la cubierta, que funciona tal cual como el modelo que se vaya a calcular, así que la selección de miembros estructurales es parte importante para esta estabilidad de la estructura. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2010).

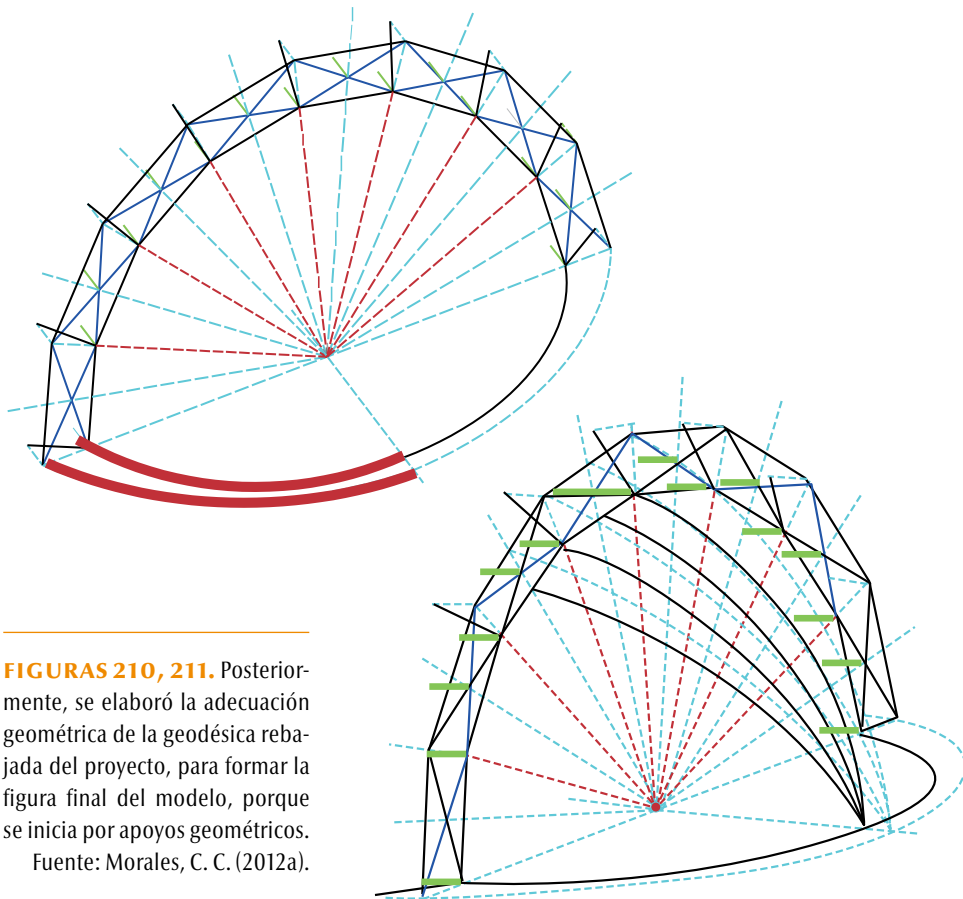
Al terminar el cuerpo de la estructura, se procede a construir la cúpula que irá en cada extremo de la nave, para obtener las circunferencias de base para la cúpula (figura 210). Para desarrollar las circunferencias de base, se traza una línea del centro del arco en el punto "C", a la distancia que se quiera, en este caso, se tomará a 10 m para la circunferencia interior y 11.90 m para la circunferencia exterior (línea azul). Se tomará un punto llamado ( $c'$ ) a 10 cm de la línea.

De esta línea trazada, se buscará el centro de la circunferencia que una el punto ( $a-c'$ ). El punto "a" es el primer punto interior del arco, como se muestra en la figura 210, después de hacer la circunferencia se ejecuta lo mismo hacia el otro lado del arco. Para la circunferencia exterior, se realiza el mismo procedimiento, pero en este caso se tomará el punto ( $a'-c''$ ). Con esto concluido, se obtiene el grosor base del arco. Ya obtenidas las circunferencias de base, se trazarán arcos de forma vertical para obtener el cuerpo de la cúpula.

Todos los arcos tendrán su punto de partida desde el punto ( $c'$  y  $c''$ ) de las circunferencias base, hacia cada uno de los puntos donde las bisectrices cortan el arco principal (figura 211), formando así las circunferencias verticales. Los arcos verticales



que parten desde el punto (c') se unirán en la parte inferior del arco principal y los arcos que parten del punto (c'') se unirán en la parte exterior del arco principal (Morales, C. C. 2012a, 2013d, 2013e).



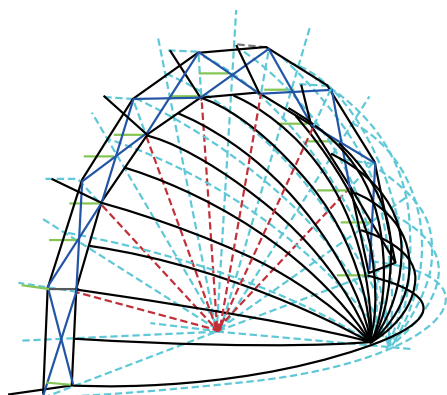
**FIGURAS 210, 211.** Posteriormente, se elaboró la adecuación geométrica de la geodésica rebajada del proyecto, para formar la figura final del modelo, porque se inicia por apoyos geométricos.

Fuente: Morales, C. C. (2012a).

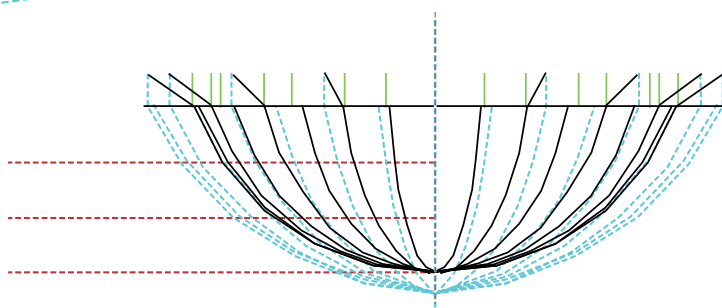
Las circunferencias de base son dos: exterior e interior. En cada una de estas se realizará el procedimiento para trazar las circunferencias de referencia. Las circunferencias verticales en la circunferencia interior irán desde el punto  $c'$  a cada uno de los puntos donde las bisectrices cortan el arco en el interior, tanto en las bisectrices que pasan por las esquinas de las "X" como en las bisectrices que pasan por el centro de las "X".

Se realiza lo mismo en la circunferencia exterior de base, pero ahora se toma la parte exterior del arco principal (figuras 212, 213), obteniendo así el grosor de la cubierta para la cúpula, que es la distancia entre la circunferencia base exterior e interior y las circunferencias verticales unidas al arco principal.

Al terminar de construir los arcos de referencia se tiene una estructura tal y como se muestra en la figura 212. Ya trazados todos los arcos de referencia, se procede a trazar en planta en el plano (X, Y), unas intersecciones que servirán para trazar los arrostramientos, estas se trazarán horizontal y verticalmente. Las intersecciones horizontales se harán tomando en cuenta el centro del arco hacia fuera a “X” distancia, pero horizontalmente se trazarán a 4 m, 2.5 m, 2.5 m, y 1.9 m como se muestra en la figura 213.

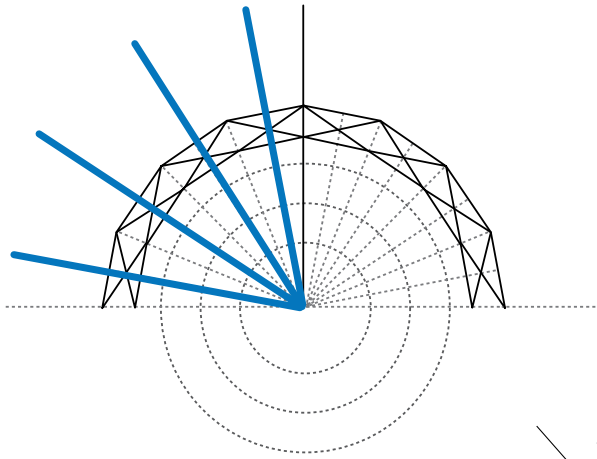


**FIGURAS 212, 213.** Estos apoyos geométricos generan una geometría de andamiaje para formar los puntos articulados, que serán posteriormente los nodos flexibles de la cubierta. Fuente: Morales, C. C. (2012a).

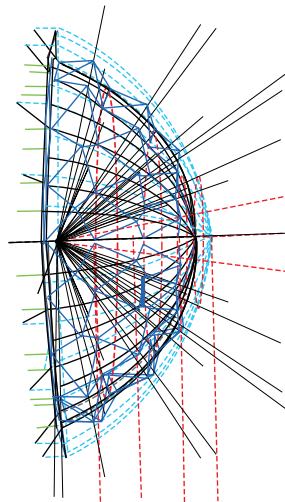
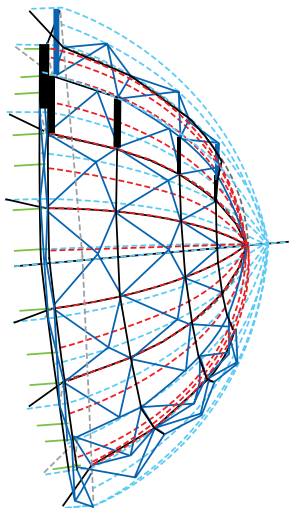
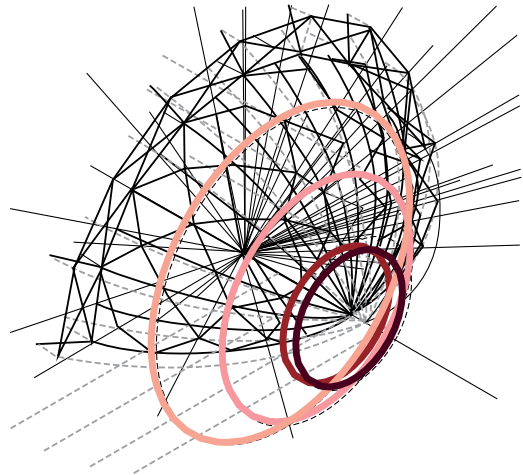


Se trazará en forma vertical, como se muestra en la figura. Las líneas azules son las intersecciones horizontales y las rojas son las intersecciones verticales. Posteriormente, desde el centro del arco principal, en forma vertical se trazarán bisectrices a diferentes grados, los cuales interceptarán las circunferencias de referencia.

Las bisectrices forman ángulos de 22.5 grados entre ellos. Las intersecciones verticales se repetirán por donde las bisectrices cortan las “x” (figuras 214, 215), al terminar de colocar todas las intersecciones en un lado, se realizará lo mismo hacia el otro lado del arco (figuras 216, 217). Se tienen que trazar en forma vertical circunferencias que están separadas a 4 m, 2.5 m, 2.5 m y 1.9 m. Estas circunferencias servirán para trazar los arrostramientos (Morales, C. C., 2012a).



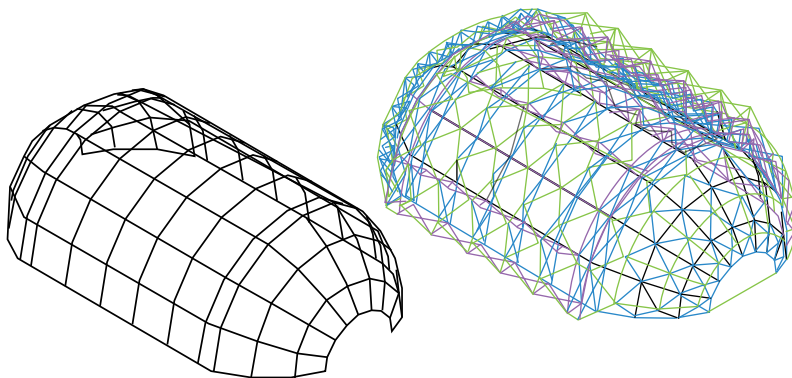
**FIGURAS 214, 215.** Generadas las geometrías de andamiaje, se procede a construir el entramado rector que guiará la colocación de los miembros en los puntos de intersección.  
Fuente: Morales, C. C. (2012a).



**FIGURAS 216, 217.** En consecuencia, la cubierta es geometrizada y desarrollada como una tela de alambre para crear los arrostramientos, que estabilizarán la geometría, e igualmente le dará la forma final al proyecto. Fuente: Morales, C. C. (2012a).

Una vez terminadas las intersecciones, se trazan los arrostramientos tomando como primer punto el (a) de la parte interior del arco principal, hacia la intersección que pasa por el centro de las “X”, tomando ese como punto central para unir los otros tres puntos. De ese modo se realizarán todos los arrostramientos hasta terminar la cúpula (Morales, C. C., 2012a).

Con esta serie de pasos se formó el cuerpo de la estructura, a base de proyecciones gráficas geométricas, de líneas y uniones. La estructura que se pretende hacer con estructuras de acero necesita de piezas que sirvan para unir las distintas partes de ésta, debe tener las características necesarias para cubrir un espacio grande y que pueda seguir comportándose de la misma manera. Con base en esta estructura (figura 218), se diseñará una pieza que permita dar movilidad a las partes y que, al mismo tiempo, las mantenga unidas sin que sufra deformaciones (Morales, C. C., 2015a, 2016d).



---

**FIGURA 218.** Observamos cómo la estructura portante es la que soportará el manto de la velaria. La tenso estructura es la que rigidizará todo el sistema transformable. Fuente: Morales, C. C. (2012a).

---

### 3.12.1. Simulación de la geometría en modelos constructivos

Para concluir la etapa de experimentación, trataremos de realizar modelos constructivos aproximados para una propuesta de diseño estructural de un sistema transformable, se presentan los siguientes modelos constructivos simulados por computadora, esto se realizó gracias a la geometrización anterior, ya que el programa ejecuta un cálculo de conexión y explora el diseño de una unión eficiente y funcionalmente estructural para poder distribuir los esfuerzos adecuadamente.

Por ello, se realizan dos aproximaciones diseño, para ver las cualidades de cada uno, sus ventajas y desventajas. Dichas conexiones fueron pensadas y elaboradas

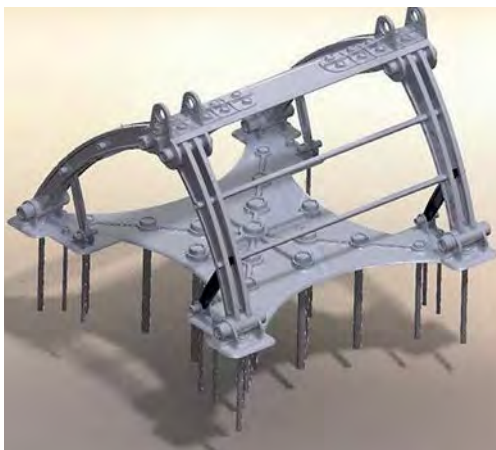
para fabricarse con acero estructural A36 o denominación europea S235, y con estos parámetros se diseñan los detalles básicos de unión.

Lo anterior ofrecerá los parámetros para procesar un pequeño prototipo a escala 1:1, en el que se verificarán cuestiones como el montaje y su comportamiento estructural en conjunto, por lo que es importante esta exploración de modelación de conexión. Las propiedades que debe tener esta unión mecánica son de concurrencia en las uniones, no debería tener excentricidades.

En el caso anterior se propusieron miembros cuadrados y rectangulares. En este caso se propondrán diferentes alternativas debido a que geométricamente el cuadrado y el rectángulo tienen mucho radio de giro y no puede haber una excentricidad adecuada a la hora de acomodar sus caras, es por ello que se propondrán otros tipos de miembros.

**PROPUESTA 1: *Estructura retráctil unidireccional compuesta de miembros y accesorios lineales sin nodos***

**Descripción.** La estructura está constituida por miembros tipo rectangular con uniones de placa de acero redondeado, sus conexiones están sujetas por bushing de articulación y un pasador de acero, lo que hace que la estructura pueda plegarse en un sentido, su sujeción está conectada con tubos de acero en posición horizontal, esto permite rigidizar la estructura en sentido longitudinal, su basamento está compuesto con miembros diseñados en posición curvada para absorber el esfuerzo que pueda llegar a tener dicha estructura (figuras 219, 220).



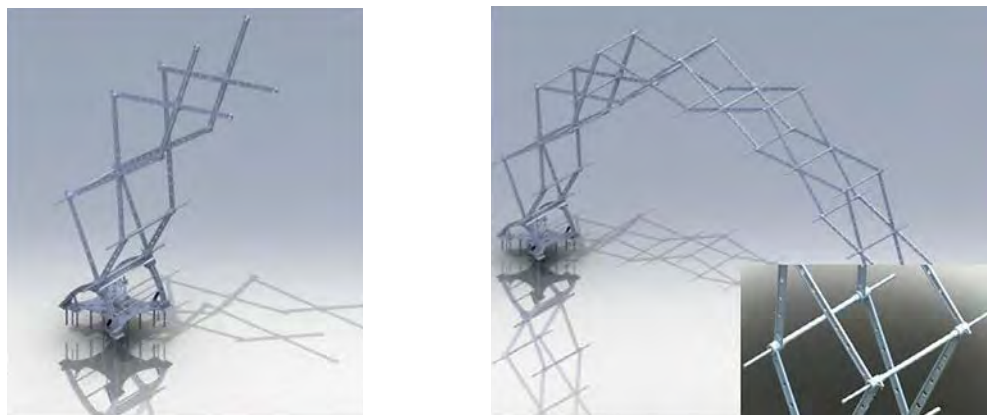
**FIGURAS 219, 220.** Propuesta experimental 1. Fuente: Morales, C. C. (2013a).

**Tipo y proceso de montaje.** Este tipo de diseño estructural permite instalar la cubierta con mayor velocidad, gracias a que su esbeltez permite que el movimiento de sus miembros sea más fácil de manipular, se tiene planeado que el proceso de construcción pueda ser ejecutado por medio de levantamiento con grúa o el armado por partes de los mismos miembros, aunque este proceso puede ser más tardado y lo que se busca es la velocidad de montaje en este tipo de sistemas.

Como característica principal este tipo de estructura se pensó con el uso de una conexión articulada en su basamento, para que éste absorbiera todo el esfuerzo provocado por el movimiento de la estructura, pero también pensado para resistir los empujes de la misma acción de cargas que estará expuesta el sistema estructural de la cubierta (Morales, C. C., 2013a) (Escofet, J., 2001).

**Ventajas.** La ligereza y esbeltez de esta propuesta hace que la construcción de la cubierta sea más rápida, y que no tengan rigidizadores verticales en sus uniones (figuras 221, 222); puede absorber y redistribuir con más facilidad las cargas horizontales del sistema al basamento, lo que ayuda a equilibrar toda la estructura; también tiene pocos accesorios de conexión, lo cual no hace tan complejo su construcción.

**Desventajas.** El material, aunque es resistente y entre comillas más ligero que otros, en conjunto (la suma de los demás miembros) puede tender a pesar mucho; la versatilidad de este sistema depende de qué tan fácilmente puede construirse, el diseño de los miembros es muy complejo y sus conexiones no están del todo excéntricas, lo que puede perjudicar teniendo que hacer un nuevo cálculo del armado de la estructura y rediseñar toda su geometría (Morales, C. C., 2013b).



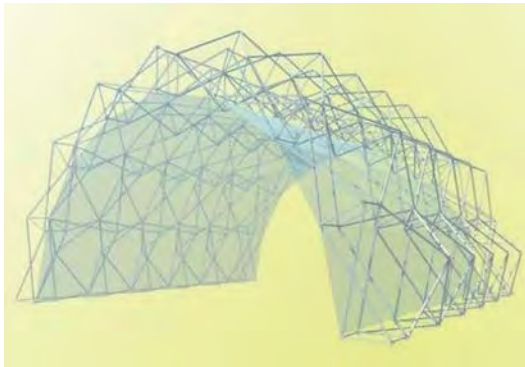
**FIGURAS 221, 222.** Desarrollo de la propuesta experimental 1. Fuente: Morales, C. C. (2013a).



**PROPUESTA 2:** *Cubierta retráctil unidireccional cilíndrica con nodos flexibles y articulados en sus extremos*

**Descripción.** La cubierta cilíndrica unidireccional está compuesta por nodos flexibles de acero, el nodo se diseñó de la forma más sencilla para poder hacer las conexiones lo más cercanamente posible a la unión y ésta se diseñó de forma tubular para que pudiera tener una mejor conexión con los miembros (figuras 223 a 225).

También se diseñaron otros nodos para cada conexión variable que tendrá la cubierta dando mayor versatilidad al sistema, por último, se agregó un nodo de anclaje para integrar la estructura en un solo sistema y no tuviese que desmontar nada por separado, mejorando el proceso constructivo de la cubierta transformable.



**FIGURAS 223 A LA 225.** Propuesta experimental 2. Fuente: Morales, C. C. (2013a).

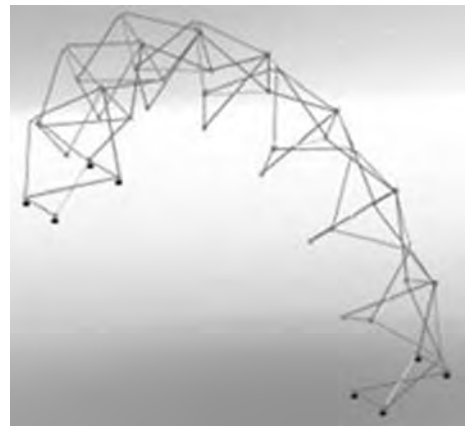
**Tipo y proceso de montaje.** El proceso constructivo de la estructura y su montaje es de fácil ejecución si se usa una grúa para desplegarla, también puede ser armada por partes ya que sus nodos articulados le dan esa flexibilidad. La estructura está

diseñada para transformarse las veces necesarias, ya que el nodo versátil que se ha diseñado se le pueden integrar infinidad de accesorios que permiten una ejecución exitosa.

Se procuró mejorar los miembros de la estructura en la que se propusieron tubos redondos, ya que el radio de giro de tubos redondos tiene una mejor excentricidad a la hora de colocar sus miembros en las conexiones; de igual manera, este nuevo diseño hace que concurran las fuerzas en la conexión, mejorando mucho la anterior propuesta, por ello, esta puede tener mucha mayor eficiencia estructural.

**Ventajas.** La utilización de nodos articulados y flexibles es una de las grandes ventajas de este sistema plegable, ya que con esto puede construirse la cubierta de forma más rápida y eficiente, porque sus conexiones son más sencillas y con accesorios más simples de manipular; es vital que su armado previo sea lo más rápido posible para que en el montaje sea lo más expedito para construirse (figuras 226, 227).

**Desventajas.** El problema que pudiera tener sería el peso propio de la estructura, ya que no sería tan fácil desplegarla, esto debido a que sus miembros de acero en su conjunto pueden alcanzar pesos demasiado grandes dificultando la maniobra de la construcción (Kronenburg, R., 2000, 2007) (Morales, C. C., 2015a).



**FIGURAS 226, 227.** Desarrollo de la propuesta experimental 2. Fuente: Morales, C. C. (2013a).



### 3.13. REFLEXIÓN SOBRE EL PROCESO DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS TRANSFORMABLES

El proceso de construcción de sistemas transformables en las cubiertas tensadas es muy poco estudiado, en esta exploración se ha tratado hasta el momento de desarrollar un método que sea viable, construible y posteriormente calculable; por ello, la etapa de experimentación para el diseño de sistemas plegables será una de las más importantes en ejecutar (figuras 228, 229), porque contribuye al análisis de ciertos factores característicos de estas estructuras y de cómo serían concebidas para poder confeccionar su sistema estructural.



**FIGURAS 228, 229.** La experimentación del modelado sirve para encontrar parámetros de diseño adecuados y generar una propuesta estructural. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2014a, 2013e).

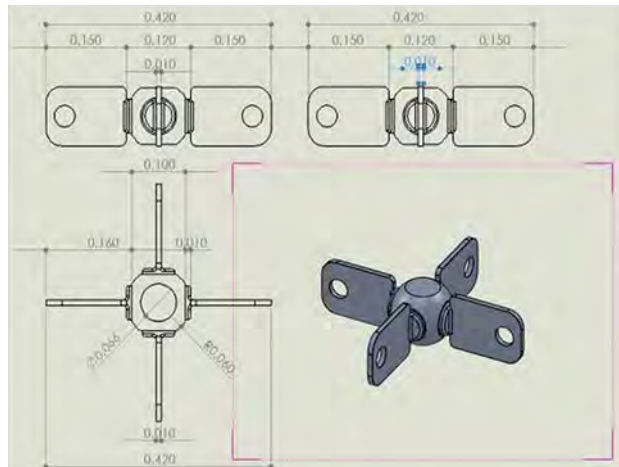
Por lo anterior, se probaron los modelos para comprender el mecanismo del desplegado. Se aclaró la movilidad y la transformación que podrían tener este tipo de sistemas, en las que se hicieron las adecuaciones geométricas, apoyadas con teorías matemáticas y gráficas para desarrollar más sencillamente la transición geométrica del modelo, con ello se obtienen parámetros gráficos que pudieran simplificar aún más el diseño de este tipo de cubiertas.

Se logró materializar una propuesta simulada y escalada de un sistema que pudiera ayudarnos a diseñar las conexiones de los sistemas flexibles, logrando un acercamiento de solución de un método de diseño. Con esto se pasó a crear opciones del proceso constructivo que perfeccionan el diseño del modelo propuesto (figuras 230, 231), ya que la ventaja de este sistema es que la adecuación geométrica es estrictamente respetada. Con un cambio o alargamiento del nodo se presentarían variaciones en la adecuación geométrica de la propuesta y esto haría más difícil el análisis de la estructura en su conjunto, pues el cálculo no sería confiable debido a

los desfases excéntricos del modelo, aunque cualquier tipo de estructura plegable tiene ese defecto, se tratará de realizar un nudo lo más eficiente posible (Morales, C. C., 2012a).



**FIGURAS 230, 231.** El modelo escalado a 1:20 ayudó a la elaboración del nudo constructivo, de igual manera la utilización de software especializado también ayudó a modelar con más eficiencia las conexiones que podría tener el sistema plegado de la cubierta. Fuente: Fotos Experimentales, Morales, C. C. (2014a).



Consecuentemente, esta experimentación generó un sistema geométrico-constructivo adecuado para posteriormente ejecutarlo en un proyecto, analizarlo y calcularlo en una estructura generada por este método desarrollado. Tomando en cuenta las conexiones nodales, al igual que la forma en que se transformará el sistema plegable, se puede hacer una propuesta más eficiente como la que aparece en las últimas páginas de este capítulo, que servirá para plantearse un prototipo que ayude a justificar el método de diseño y las conexiones constructivas de una cubierta plegable.

No se hizo mucha mención de la forma de la membrana, ya que estará solo representada en la forma final de la estructura transformable, siendo que ésta es también un parámetro importante, ya que le brinda la forma final estética a la estructura, mantendrá tensada el sistema y su peso es relativamente bajo, pero para nuestro estudio solo nos enfocaremos al diseño de un sistema plegable. Por último y como reflexión, este proceso creó una metodología constructiva de diseño de los sistemas plegables, que ocuparemos más adelante en el capítulo 4, por ello, la importancia de tener en claro la forma y los conceptos de diseño estructural bien definidos, ya que con esto se podrán plantear las herramientas metodológicas aquí comprobadas para desarrollar un sistema transformable (Morales, C. C., 2014a).

## Capítulo 4

# Simulación estructural y adecuación constructiva

### 4.1. ALTERNATIVA TECNOLÓGICA

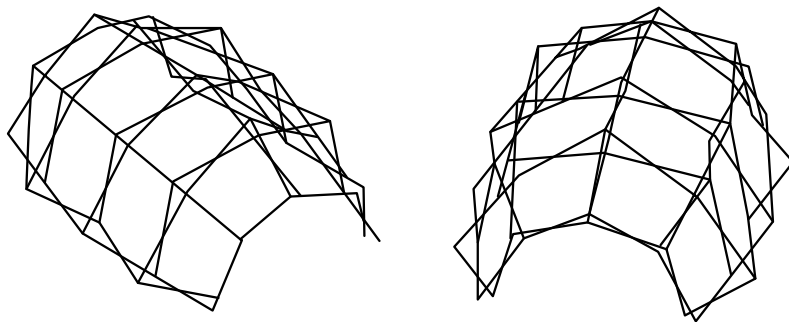
El descubrimiento de nuevas tecnologías para la arquitectura siempre ha sido una prioridad para el diseño de los espacios arquitectónicos, pero en el área del proceso de los sistemas transformables hay mucha más investigación que concebir, ya que estos sistemas responderían de manera más efectiva a los constantes cambios en la arquitectura.

En la actualidad, el tema de la arquitectura que caduca es más constante, no solamente en la función espacial, sino también en lo estético, esto nos obliga a regenerar constantemente nuestro entorno, que por lo regular siempre se destruye por el incesante cambio actual de usos del suelo.

Es aquí en donde la tecnología se tiene que desarrollar, para procurar un progreso no tan agresivo que ayude a mejorar este crecimiento con una calidad de adaptación al medio, y para poder desarrollar esto, se necesita tomar en cuenta los parámetros de las experimentaciones anteriores (figuras 232, 233). En la siguiente etapa del estudio (guía conceptual de la tabla 2.1) veremos la fase de análisis estructural donde desarrollaremos la simulación estructural de los modelos experimentales que pueden ser equilibrados, y posteriormente generar un diseño que demuestre y justifique nuestro desarrollo metodológico donde generemos los detalles estructurales finales. Es muy importante resaltar que para tal alcance se deberá analizar el sistema plegable y las características importantes de su flexibilidad, modulación (prefabricado) y su fácil transformación, teniendo estas tres virtudes, validaremos la teoría desarrollada anteriormente.

Por esta razón, esta etapa del estudio se dedicará a validar el diseño de un sistema estructural plegable, al que se le asignarán miembros y dimensiones bajo principios reglamentados y tipologías teóricas de las estructuras, que ayuden a comprender y simplificar el método de análisis de dicha cubierta. Lo que deja parámetros para desarrollar un prototipo adecuado a escala real, así como también para estudiar y analizar su comportamiento estructural, y poder detectar si la geometría propuesta es la adecuada para la elaboración del proceso constructivo.

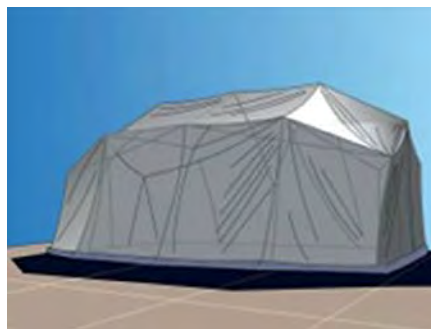
En consecuencia, en este tratado sólo se asignarán los detalles correspondientes de la estructura, que únicamente se hará hasta una etapa experimental, ya que la resolución de esta investigación está sometida a comprobar la factibilidad de diseñar y construir una cubierta ligera plegable tensada.



---

**FIGURAS 232, 233.** Proyecto de una cubierta desplegable de aspas para cubrir una piscina unifamiliar  $11 \times 7$  m. Sevilla, España. Dr. Félix Escrig. La aplicación de las estructuras transformables cambia drásticamente el paisaje urbano, ayudando a dar más de una función al espacio arquitectónico. Imagen extraída y redigitalizada. Fuente: Escrig, F. (1997, 2012), Morales, C. C. (2019).

---

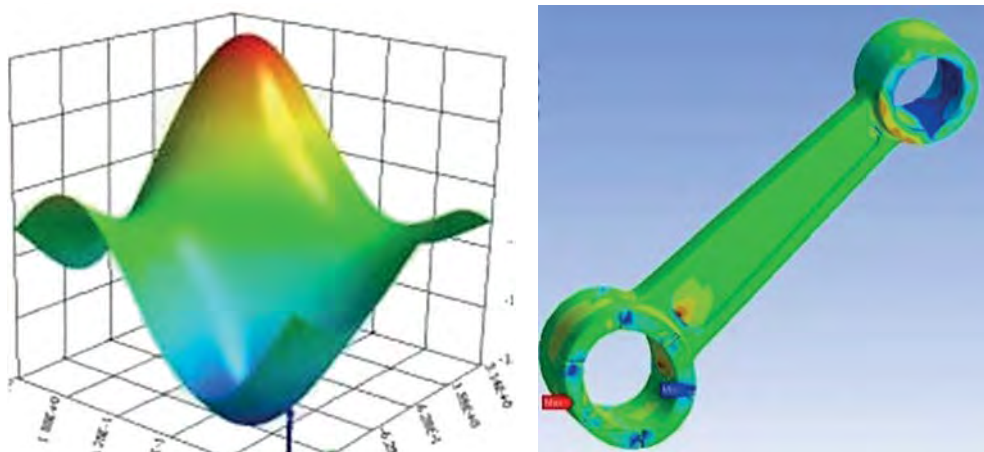


## 4.2. PREMISAS Y COTAS DE UNA CUBIERTA PLEGABLE

Para aterrizar los parámetros de una propuesta estructural con una geometría transformable, se definirán las premisas y cotas de la metodología a seguir, se analizarán cada una de las partes que se aplicarán en el modelo: la simulación estática estructural y la aplicación tecnológica constructiva. Estas dejarán una pauta marcada en la proyección de un modelo aproximado para reproducir un sistema estructural plegable y no desviarse de la aplicación de los conceptos principales de la propuesta.

La simulación estática estructural está sujeta a la adaptación del entorno del modelo, estos factores definirán el comportamiento de la cubierta, estas se analizan en un prototipo a escala, lo que permite ver la interacción de esfuerzos en el modelo. Lo anterior, servirá para predimensionar los miembros estructurales en la primera etapa de esta simulación, para empezar así a construir el modelo a escala del prototipo

(figuras 234, 235). Con el fin de adecuar los modelos a una producción real, se realiza el primer acercamiento el cual consiste en someter al modelo a cargas gravitatorias, accidentales, sismo y de vientos (Escrig, F., 1984, 1988) (Morales, C. C., 2013e, 2016b).



**FIGURAS 234, 235.** La simulación comprobará la interacción de cargas en el sistema estructural de los modelos para formar parámetros de seguridad dentro de la estructura. Fuente: Morales, C. C. (2012a, 2013e).

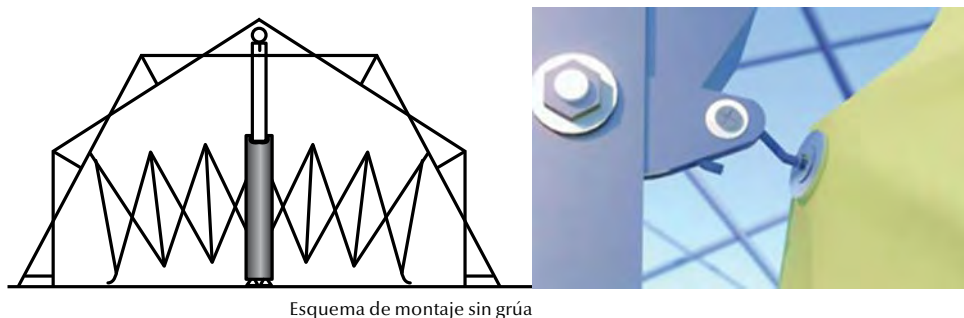
La jerarquía de seguridad de la simulación se genera por medio de un software (Win-Tess<sup>1</sup>), que facilita el diseño de los miembros estructurales. Para después, con estos datos se diseñan los detalles de unión de los modelos, tomando en cuenta los parámetros que arrojen sus gráficas de momentos, cortantes y respectivos esfuerzos interiores (Morales, C. C., 2013e, 2016b).

Por lo que en cada una de las etapas experimentales se construyó la metodología constructiva de esta propuesta, y con ella se tiene cómo verificar la tipología estructural en la que se desarrolló la geometría, esto cuando se aplique al modelo final al que se le someterá con la reglamentación vigente y adecuada.

En consecuencia, proveerán datos importantes de la tipología estructural como parámetros. Por lo que aplicaremos la geometría desarrollada en el capítulo 3 y solo validaremos el comportamiento físico y mecánico del modelo, y también su proceso de despliegue y en servicio. Esta etapa de creación es muy importante porque define las ventajas y desventajas que podría tener el sistema en un entorno real y las compli-

<sup>1</sup> Software de Análisis Estructural de Segundo Orden, manual: <http://tecno.upc.edu/wintess/manual/>

caciones que pudiera tener dicha propuesta, así como también para analizar la manufactura especial que tendrían las conexiones en un sistema plegable (figuras 236, 237).



Esquema de montaje sin grúa

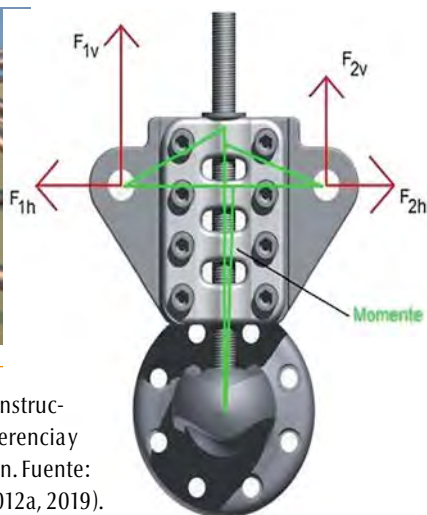
**FIGURAS 236, 237.** La tecnología se basará en crear un sistema versátil, fácil de montar y de transportar, y que sus espacios sean adaptables para varias funciones. La adecuación de la geometría es parte vital para la construcción de sistemas transformables. Fuente: <http://www.grupoestran.com> (2010), Morales, C. C. (2019).

De acuerdo con lo anterior se puede resolver los inconvenientes de construcción, dado que la adecuación y traslación de la simulación deben tener el mismo tipo de geometría en su análisis. En esta fase debemos tener en cuenta la interacción de la membrana textil ya que será un factor decisivo al realizar el montaje, en caso de una conexión irregular con el miembro, la membrana se arrugaría y la estructura tendría efectos de pandeo y excentricidad, lo que afectaría la interacción de los esfuerzos repartidos en el sistema, por lo que el análisis estructural debe tener en cuenta la forma final de la membrana puesta en izaje con la estructura, y verificar su comportamiento con la estructura plegable (aunque para este estudio no profundizaremos en el comportamiento de este tipo de estructura).

Entonces, si el proyecto lo amerita, se tendría que rectificar o revalorar el diseño de las conexiones, si ese fuese el caso (cabe mencionar que todo el sistema se mantendrá equilibrado por los nodos) y las conexiones llegasen a fallar, el sistema no funcionaría, como resultado no se mantendría el equilibrio de seguridad reglamentada. Por esto es importante la elaboración del prototipo, para que se justifique la adecuación geométrica que desarrollamos.

En cuanto a la aplicación del diseño final la Tecnológica constructiva (figuras 238, 239), esta fracción de la investigación se destina a proponer detalles constructivos de conexión del sistema plegable, ya que como anteriormente se mencionó, el nodo es la parte más importante del sistema transformable. Las conexiones deben cumplir con los parámetros establecidos.





**FIGURAS 238, 239.** La generación de los detalles constructivos en la construcción es parte importante para la transferencia y desarrollo de la tecnología estructural de la investigación. Fuente: Morales, C. C. (2012a, 2019).

En las conexiones articuladas (flexibles), su fijación debe conservar el equilibrio del sistema y la redistribución de los esfuerzos en toda la estructura, tanto al plegarse como en estado rígido (transformación). Por último, debe ser fácilmente manipulable y no tan complejo al utilizarse, es por ello que debe ser un nodo casi estandarizado (prefabricado).

Este concepto es importante para generar la tecnología adecuada. Se define la prefabricación a la habilitación de elementos fuera de obra, permitiendo que los tiempos de construcción se reduzcan por la habilitación simultánea de la construcción, sus piezas industrializadas optimizan el tiempo de ensamble, por lo que el diseño de las conexiones de la membrana en esta etapa definirá cómo el sistema plegable va a interactuar constructivamente con este material.

El montaje se controla por adosamiento y plegados, esto depende de la estructura que se utilice, otorgando la versatilidad de acoplarse a ella o erigirse más rápido en su montaje, teniendo estos factores, en la propuesta de este estudio se contemplarán todas estas premisas y cotas puntuales al momento de construir el diseño de la cubierta ligera plegable tensada (Morales, C. C., 2013e, 2016b).

#### **4.3. PARÁMETROS DE DISEÑO: PREDIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA PLEGABLE**

Se realizará la aplicación de recomendaciones encontradas de algunos manuales y reglamentos para predimensionar la estructura plegable y darle hipótesis de cargas para una primera fase análisis estructural. Se ejecuta el primer paso de la premisa,



el predimensionado aplicando a las recomendaciones del ICT (Instituto de la Construcción Tubular).

Se simula que la estructura plegable es una armadura semicircular de 25 m de largo transversalmente y 12.5 m de altura, y obtenemos que la separación de los nodos de la armadura principal será de  $4.2773 < 6$  metros, que es el mínimo especificado.

Para pandeo de rigidizadores verticales  $B = 1$  tanto en XY y XZ.

Para pandeo de las diagonales será  $B = .75$  o  $1$ , sea en el caso del lado de la seguridad, tanto para XY y XZ, esto será para marcos principales como secundarios. Para el caso de los marcos estabilizadores de la cubierta, allí se consideran los cordones superiores e inferiores, teniendo en cuenta esto, el largo del cordón superior tiene 4.877 m y el cordón inferior 4.096 m, y por lo tanto:

Cordón superior

$$XZ = L_p = B_x = .9$$

$$XY = L_p = 4.877 \times .9 = 4.39 \text{ de longitud efectiva ante pandeo}$$

Cordón inferior

$$XZ = L_p = B_x = .9$$

$XY = L_p = 4.098 \times .9 = 3.681$  de longitud efectiva ante pandeo, en este caso, se toma la misma coordenada ya que tendrá el mismo sentido de la inercia que el cordón superior.

Desarrollada dicha recomendación, tenemos las características geométricas deseadas, aunque anteriormente en el proceso de adecuación de la geometría se determinó que el peralte de la cubierta sería de 2 m. Sin embargo, el predimensionado hace efectivo el peralte propuesto, es en gran medida sobrado, pero para cuestiones de investigación y comprobación de este sistema, se utilizará esta medida, ya que ofrece mayor confiabilidad, este predimensionado también servirá para las simulaciones estructurales de las tres diferentes propuestas en el que se realizarán el cálculo estructural (Villasuso, B. M., 1994) (<http://www.ictubular.es>).

El análisis estructural de nuestro estudio se basa en el rango de factor de seguridad por resistencia y desplazamiento, el código de referencia será con base en el LRFD<sup>2</sup>, que adopta un rango de seguridad para los miembros estructurales de 1 a 1.05 de resistencia del material (acero). Por lo que se consideran los siguientes requerimientos

<sup>2</sup> McCormac, *Diseño de Estructuras de Acero, Método LRFD*. (2000), 2a. edición. Alfaomega.

de rendimiento para materiales isotrópicos; coeficiente de número de poisson para el acero: .27 para diseñar, para más rigidez .30. Para determinar las cargas se basará en las normas de construcción de la Ciudad de México, por lo que se seleccionan las cargas recomendadas en dicha norma para cubiertas no transitables. Dichos parámetros de carga son los siguientes: Carga muerta: 30 kg/m<sup>2</sup>, Carga viva máxima: 40 kg/m<sup>2</sup>, Carga viva accidental: 20 kg/m<sup>2</sup>. En la tabla 4.11 se desglosa la combinación de cargas que tendrá en la simulación estructural de la estructura, que afecta solo a las cubiertas no transitables (McCormac, 2000) (Morales, C. C., 2013e, 2016b) (Rodríguez, N., 2007) (<http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario>) (<https://www.tdx.cat>).

**TABLA 4.11.** COMBINACIÓN DE CARGAS POR EL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL D. F.

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))
Onceava combinación	(CM (1.1) + CVA (1.1) – VX (1.1))
Doceava combinación	(CM (1.1) + CVA (1.1) + VZ (1.1))
Treceava combinación	(CM (1.1) + CVA (1.1) – VZ (1.1))

Fuente: Morales, 2015a.

Así con una relación de esbeltez  $KL/r$  de 240 en elementos principales y de 300 en miembros secundarios y de arrostramientos; de igual manera la combinación de carga para el sistema se manejará por el mismo código de resistencia y estabilidad. También se considera el desplazamiento horizontal y vertical para que no exceda el

límite de servicio de la estructura establecido en el reglamento del Distrito Federal. Adicionalmente, se verán todos los gráficos de tensión para verificar en dónde hay mayores esfuerzos y cómo éstos interactúan dentro de la estructura.

Posteriormente, con esta información se desarrollarán las uniones adecuadas para resistir estos esfuerzos en sus nodos.

Para determinar cómo se resolverá la estabilidad de la estructura, se plantea un ejemplo de traslación geométrica y se analiza la geometría establecida, por medio de la simulación estática, para generar los primeros vestigios de tecnología estructural.

Para este ejemplo, se accede a la última adecuación geométrica de los ejercicios anteriores del capítulo 3. Esta geometría es la menos compleja de realizar en este análisis, pues el sistema está constituido por una serie de marcos plegados en forma de “X”, gracias a esta figura geométrica se equilibra y sustenta debido a su misma forma (Morales, C. C., 2013e, 2016b, 2018a).

Para esta simulación, se especifica que el material sería un acero A36 con un módulo de elasticidad de  $2530 \text{ kg/cm}^2$  y un factor de Poisson<sup>3</sup> de 0.3 con densidad de  $7.83847 \text{ Mton/m}$ , las piezas seleccionadas son de tubos OCXE100<sup>4</sup> para miembros de unión principal, los atezadores están conformados por la misma denominación, al igual que para las armaduras plegables en el espacio grande, donde se propusieron las mismas piezas tubulares; para no complicar tanto el análisis, ya que los miembros circulares tienen un radio de giro mayor y su excentricidad es óptima para el diseño de este tipo de estructuras (Morales, C. C., 2014c).

El resultado será una guía para el comportamiento de los esfuerzos en la estructura, en la que la simulación estática, brinda una visión más clara de la dimensión que pueden llegar a conformar estas adecuaciones geométricas y cuáles serán sus límites de claro a cubrir en un espacio determinado.

Cabe hacer mención que se considerarán las cargas propuestas por el reglamento y el material escogido para dicho desarrollo experimental. Este estudio no destina ninguna función espacial a la estructura, ya que el modelo no cuenta con ninguna funcionalidad en específico. Estos parámetros se toman en cuenta dependiendo de la localización del proyecto, en este caso se utilizará para la localización en Poza Rica, Ver., con una función espacial de nave industrial, con los siguientes parámetros.

---

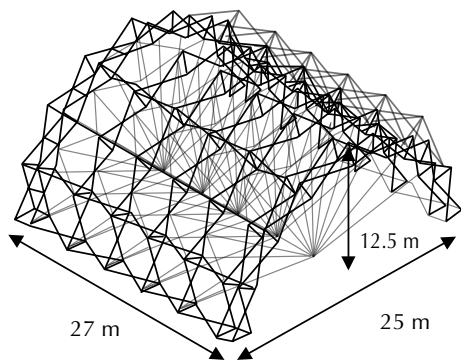
<sup>3</sup> El coeficiente de Poisson se define como una *constante elástica* del material que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. Segui, W. (2000), Morales, C. C. (2013e, 2016b, 2018a).

<sup>4</sup> Miembros tubulares estándar con nomenclatura OCXXE de acero son fabricadas en México, para distintas aplicaciones en la construcción de estructuras metálicas. Imca (2005), Morales, C. C. (2013e, 2016b, 2018a).

Recordando el reglamento de NCRDF, las cargas asignadas para cubiertas no transitables son: carga muerta: 30 kg/m<sup>2</sup>, carga viva máxima: 40 kg/m<sup>2</sup>, carga viva accidental: 20 kg/m<sup>2</sup>. Para determinar las cargas horizontales que afectan a la estructura, se consideran vientos teorizados de los mapas de valores aproximados que en el proyecto serán aplicados. Para este ejercicio se aplica la fórmula que dicta el reglamento de la CFE<sup>5</sup>, siendo así la determinación de la velocidad del viento en una edificación, que según el reglamento será: (Segui, W., 2000; <http://cgsestados.df.gob.mx>; Morales, C. C., 2013e, 2015a, 2016b, 2018a).

### 4.3.1. Descripción

Primeramente, se determinan las presiones de diseño producidas por el viento sobre una cubierta plegable industrial con forma cilíndrica, que se ubica en la ciudad de Poza Rica, Veracruz, y se encuentra a 50 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura media de 24.4° aproximadamente. La nave se localiza en una zona urbana con obstrucciones de edificios entre 3 a 5 m de altura (figura 240), su geometría y dimensiones se muestran en la figura. Los recubrimientos de la estructura son de membrana Precontraint y estructura tubular de acero con perfil OC, su longitud se define por:  $L = \pi(25) / 2 = 39.27 \text{ m}$  (<http://ciczac.org/>).



**FIGURA 240.** Es importante tener bien descrita la geometría de la cubierta, ya que de ella depende cómo se colocarán las cargas y demás consideraciones para su diseño. Fuente: Morales, C. C., 2015a.

### 4.3.2. Procedimiento

Por su importancia (inciso 4.1.3, del *Manual de Procedimientos Constructivos de CFE*), la estructura pertenece al Grupo B.

<sup>5</sup> Comisión Federal de Electricidad, es el manual más utilizado para diseñar las estructuras por vientos dentro del país. <http://cgsestados.df.gob.mx/prontuario/vigente/385.htm>

### 4.3.3. Determinación de la velocidad de diseño

La velocidad de diseño se determina con base en el *Manual de Procedimientos Constructivos de CFE* (inciso 4.2.). Dado que esta velocidad depende de varios parámetros, estos se calcularán como a continuación se indica (<http://ciczac.org/>).

#### CATEGORÍA DE TERRENO

De acuerdo con las características del terreno mencionado, se clasifica dentro de la Categoría 3 (tabla 4.2.1, inciso 4.2.1. del *Manual de Procedimientos Constructivos de CFE*). Es de suponer que la rugosidad del terreno de los alrededores es uniforme, más allá de las longitudes mínimas establecidas en la misma tabla.

#### VELOCIDAD REGIONAL

Considerando la región en donde se desplantará la nave, que pertenece al Grupo B, se obtiene del mapa de isotacas, para un periodo de retorno de 50 años:

$V_R = 150 \text{ km/h}$ , se optará la velocidad regional de Tuxpan ya que es la que genera más afectaciones y solo se encuentra a una hora de ciudad de Poza Rica.

#### FACTOR DE EXPOSICIÓN

El factor de exposición,  $FR_Z$ , es mayor de 10 metros dado que la altura del punto foco es de 12.5 metros; se realizará el cálculo de acuerdo al inciso 4.2.3 del *Manual de Procedimientos Constructivos de CFE*. Por tanto, este factor vale:

Para encontrar:  $F_\alpha = F_c \times Fr_z$ , se encuentra en la tabla 4.2.3 en el Manual de la CFE, por lo que

$$Fr_z = 1.56 \left[ \frac{z}{\delta} \right]^\alpha \text{ si } 10 < z < \delta \text{ por lo tanto } Fr_z = .91$$

#### FACTOR DE TOPOGRAFÍA

Puesto que la nave industrial se desplantará en terreno prácticamente plano, el factor de topografía local (inciso 4.2.4. del *Manual de Procedimientos Constructivos de CFE*), le corresponde a:

$$F_T = 0.9$$

### VELOCIDAD DE DISEÑO

La velocidad de diseño, que en este caso resulta constante en todo lo alto de la estructura, es (inciso 4.2 del *Manual de Procedimientos Constructivos de CFE*):

$$VD = 0.9 (0.86) (150) = \underline{116.1 \text{ km/h}}$$

### PRESIÓN DINÁMICA DE BASE

Dado que el sitio en donde la estructura se desplantará está prácticamente al nivel del mar, la presión barométrica que le corresponde es de 760 mm de Hg (tabla 4.2.5. del *Manual de Procedimientos Constructivos de CFE*). Además, la temperatura anual media en este sitio es de 24.4 °C. Por tanto, el factor G vale:

$$G = 0.392 / 273 + \delta$$

$\Omega$  = presión barométrica en mm de Hg (tabla 1.7. del *Manual de Procedimientos Constructivos de CFE*)

$\xi$  = la temperatura anual en C° (se obtiene en usar las tablas de medida de C°)

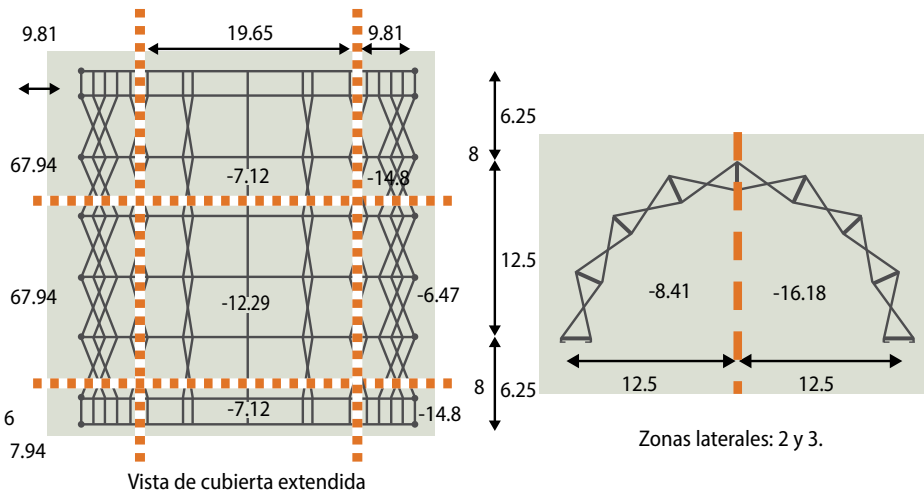
$$G = .392 (760) / 273 + (24.4) = 297.92 / 297.4 = 1$$

Puesto que la altura de la estructura es menor de 10 m, la presión dinámica de base es constante en toda su altura. Así, según el inciso 4.2.5 del *Manual de Procedimientos Constructivos de CFE*:

$$qz = 0.0048 (1.0) (115.1)^2 = 64.7 \text{ kg/m}^2$$

Obviamos todo el desarrollo de análisis de viento en cuanto sus zonas de presión, ya que el software solo necesita la velocidad de diseño y la presión dinámica de base, en la figura 241 se muestran las presiones de diseño de la estructura principal para el caso en que el viento es normal a las generatrices. Con esto, (cada tabla y figura con inciso se tomó del Manual de vientos de la CFE, el cual contiene los datos más exactos para calcular el diseño de vientos) se determinan las presiones que tendrá la cubierta en su estructura para el análisis de la estructura plegable (<http://ciczac.org/>) (<https://es.scribd.com/>).

En cuanto a las cargas horizontales por sismo, son estructuras que les afecta poco la carga sísmica, gracias a que sus conexiones nodales son altamente flexibles y puede mitigar este tipo de esfuerzos, sin embargo, para tener en orden la aplicación de las normas, se estableció aplicar la carga sísmica al proyecto.



**FIGURA 241.** Se presenta el previo de presiones de viento que tendrá estructura y cómo será su distribución en sus respectivas caras del modelo de la cubierta. Fuente: Morales, C. C. (2015a).

Teóricamente, la edificación se encuentra localizada en Poza Rica, Veracruz, dentro de este estado hay dos tipos de zonas: la B y C, la estructura estará ubicada en la zona B. Ya definida la zona sísmica de ubicación, se aplicará el método de análisis estático sísmico simplificado, establecido en las normas complementarias del RCDF, en los que se deben cumplir los requisitos establecidos en la sección 2.2. Para calcular las fuerzas cortantes a diferentes niveles de una estructura, se supondrá un conjunto de fuerzas horizontales actuando sobre cada uno de los puntos en el supuesto concentradas las masas.

Cada una de estas fuerzas será equivalente al peso de la masa que corresponde, multiplicado por un coeficiente proporcional a  $h$ , siendo  $h$  la altura de la masa en cuestión sobre el desplante (o nivel a partir del cual las deformaciones estructurales pueden ser apreciables). El coeficiente aplicará de tal manera que la relación  $V_o / W_o$  sea igual a  $c / Q'$  pero no menor que  $a_o$ , donde  $a_o$  es la ordenada espectral que corresponde a  $T = 0$  y  $c$  el coeficiente sísmico.  $a_o$  y  $c$  se señalan en la tabla 3.1. de las normas complementarias RCDF (Morales, C.C., 2014c), (<http://ciczac.org/>).

De acuerdo con este requisito, la fuerza lateral que actúa en el  $i$ -ésimo nivel,  $F_i$ , resulta ser:

$$F_i = \frac{c}{Q'} W_i h_i \frac{\sum W_i h_i}{\sum W_i h_i}; \frac{c}{Q'} \geq a_o$$



Donde:

- $W_i$  peso de la  $i$ -ésima masa; y  
 $h_i$  altura de la  $i$ -ésima masa sobre el desplante.

Para cumplir con la fórmula anterior, se buscará el comportamiento sísmico  $Q$  de la norma, se adoptarán los valores especificados en alguna de las secciones siguientes, según se cumplan los requisitos en ellas indicados.

Se usará  $Q=1.5$  ya que la estructura es resistente a las fuerzas laterales, gracias a las articulaciones que disipan la carga horizontal de efectos sísmicos, también se consideró el efecto del material también resistente a las torsiones y giros por los efectos de cargas horizontales.

Teniendo los parámetros anteriores, se procede a realizar el cálculo sísmico en la estructura, detectando sus cortantes críticos, que tendrán interacción con la estructura; por consiguiente, se analiza la estructura (esta solo tendrá un solo nivel de piso) mediante la factorización necesaria.

- $c/Q > a_0 = .21/2 > 0.06$  por lo tanto  $.105 > .06$ , posteriormente, se junta con la fórmula sísmica estática.
- $F_i = c/Q \times W_i = .105 \times (36.871) = 3.87$  Ton, la cortante sísmica se distribuirá en los nodos que tengan la afectación más directa.

El desarrollo simplificado del análisis sísmico ayudó a verificar cuánta carga horizontal se vería sometida a la estructura plegable. Como punto especial, se deben verificar los desplazamientos dentro de la estructura, donde sus límites de servicios no deben exceder de lo permitido en la reglamentación RCDF<sup>6</sup> (Morales, C. C., 2014c).

La normatividad de los desplazamientos en el reglamento menciona que para los desplazamientos en vertical es  $L/240$  (donde  $L$  es el claro del miembro) y el horizontal es  $(H \times .012) \times 100 + .5$  (donde  $H$  es la altura del nodo), con esto se obtendrán los parámetros de desplazamiento permisible en el modelo.

Este solamente será una guía para verificar si los desplazamientos en el programa son iguales que en los mencionados en el reglamento. Posteriormente, ya definidas las premisas y parámetros anteriormente mencionados, se consideran qué datos se colocarán en la simulación, para que los resultados sean lo más cercanos posible a la realidad. Es por ello que se tomaron muy en cuenta las recomendaciones de la

<sup>6</sup> Reglamento de Construcción del Distrito Federal, este es un parámetro de diseño y seguridad que se debe seguir dentro del país. Fuente: Morales, C. C. (2013e, 2016b), <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/385.htm>

reglamentación de las estructuras metálicas, ya que para la República Mexicana es un campo novedoso a explorar, por esto los datos se consideraron para la siguiente simulación estática (Morales, C. C., 2015a, 2016c).

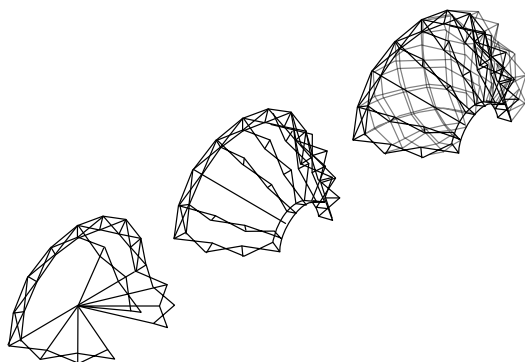
#### 4.4. ANÁLISIS DE SIMULACIÓN CON MEMBRANA

En todo el proceso de este estudio se ha analizado el efecto de la geometría y sus partes constructivas en la cubierta de un sistema plegable, gracias a la realización del prototipo anterior. Por experiencia se dice que la membrana textil es un factor importante para mantener estable la estructura y su forma final, sin embargo, a pesar de todo lo realizado anteriormente aún se tenían problemas con la geometría, por lo que se optó por unificar las geodésicas con la cubierta central, lo que da como resultado una estructura más unificada y estable (figura 242) (Morales, C. C., 2013e, 2016b).



**FIGURA 242.** La unificación de la cubierta plegable se adecua gracias a que se simplifica la forma geométrica de las aspas, dando como resultado una figura óptima y eficiente. Fuente: Morales, C. C. (2015a).

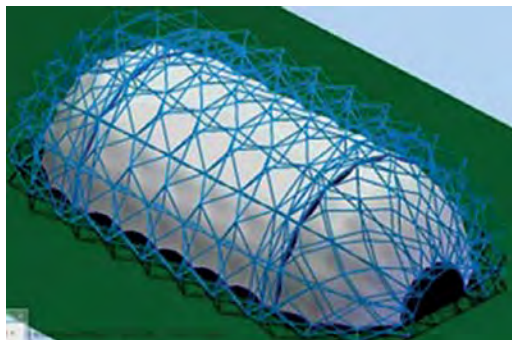
Incluyendo esta estrategia, se construyó de manera uniforme el despliegue de la cubierta completa en un modelo donde las aspas son generadas con el mismo procedimiento geométrico que la cubierta central; posteriormente, se hace la adecuación geométrica que unifica la cubierta con la geodésica plegable (figura 243). Esto se genera a partir del marco plegable de la bóveda semicircular, se toman los mismos ángulos de la bóveda semicircular en los extremos generando una cúpula esférica de tres aspas, que después se sujetan con aspas de contraventeo para formar la estabilidad estructural de la geodésica plegable.



**FIGURA 243.** La adecuación de la geometría es más simple en la nueva propuesta, ya que los ángulos de sus aspas de contraventeo tienen mayor control a la hora de desplegarse, con ello se facilita la construcción de la cubierta. Fuente: Morales, C. C (2015a).

Esta geometría se sujeta a un marco rigidizado por medio de tubos de fijación que ayudan a mantener la forma geodésica de los extremos de la cubierta, por último, se realiza un render de la forma final de la estructura antes de trasladar la geometría de la cubierta plegable al programa WinTess (figura 244). Con esta geometría se realizará la colocación de la membrana textil de forma virtual para que se pueda calcular las presiones del viento en la estructura.

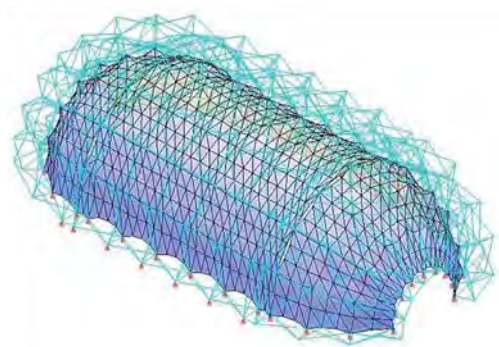
**FIGURA 244.** La búsqueda de la forma, también llamado en inglés Form Finding, es parte importante para la investigación, ya que ayuda a formar la figura final de la velaria de la estructura plegable. Fuente: Morales, C. C. (2015a).



Con esta finalidad se unificó toda la geometría en una sola, para realizar el despliegue de una sola etapa. Esto se debería tomar en cuenta desde un principio al proyectar un sistema transformable, ya que un sistema plegable debe ser lo más sencillo posible y tener un material textil ligero que ayude a integrarse a estos tipos de sistemas plegables. Por ello, antes de modelar los detalles tecnológicos y constructivos de la cubierta, se hará una pauta para diseñar la cubierta textil.

En esta etapa, la membrana juega un papel importante para dar la rigidez adecuada a la estructura. Hay varios métodos para hacerlo, en este caso será por el método virtual, donde se obtendrá la forma. Para ello se apoya con el uso de un software institucional elaborado por el Dr. Ramón Sastre Sastres, profesor de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Catalunya.

Dicho software se llama WinTess versión 3.11<sup>7</sup>, realiza el método virtual por densidades de fuerza. Este método genera una relajación en la membrana para obtener la forma deseada de la cubierta textil (figuras 245), en la que primeramente se genera una malla rectangular de 35 m de ancho, que sería la longitud que tendría si fuese una cubierta rígida curva, y 27 m de largo que tiene la cubierta en su dirección lineal (Morales, C. C., 2013e, 2016b).



**FIGURA 245.** La búsqueda de la forma, también llamado en inglés Form Finding, es parte importante para la investigación, ya que el programa proporcionó la rapidez necesaria para terminar las dimensiones exactas de la membrana. Fuente: Morales, C. C. (2015a).

Se elabora otra malla de 27 m de largo y 9.5 m de ancho con la cual se generan los puntos de anclaje en ambos casos para la geodésica plegable de los costados. Una vez realizada la malla se genera el cálculo para la obtención de la forma por densidad de fuerza y relajación, obteniendo la forma que tendrá esta cuando sea pretensada (Morales, C. C., 2013e, 2016b).

Se selecciona de la combinación de cargas anteriores la que más afectó a la estructura calculada por el programa WinTess. Dicho software hace operaciones de iteración por combinaciones de carga, que posteriormente se pueden combinar o analizar una por una, dando como resultados las afectaciones más solicitadas por las sobrecargas en el sistema estructural, en consecuencia, quedaría así las cargas máximas propuestas para dicho programa (tabla 4.12).

Posteriormente, se realiza el proceso de cálculo de iteración. Este proceso realiza una matriz de nodos por fuerzas desequilibrantes, el programa hace un número de iteraciones hasta lograr que la estructura este equilibrada; el número de iteraciones puede variar, dependiendo de la forma compleja de la estructura. Lo importante de este cálculo es que se obtiene la dimensión real de los miembros de la estructura,

<sup>7</sup> WinTess 4.2 es la última versión del software que fue creado como eje de la tesis doctoral del Dr. Ramón Sastre Sastre, quien implementa el método matricial y de relajación para obtener la forma de cubiertas textiles, calcularlas y generar su patronaje. Fuente: Morles, C. C. (2016b), <http://tecnologico.upc.edu/win-tess/manual/>

los esfuerzos que actuarán en la misma, las dimensiones de los cables y las deformaciones que pueden tener ya incluida la membrana.

**TABLA 4.12.** COMBINACIÓN MÁS AFECTADA PARA CALCULARSE EN EL PROGRAMA WINTESS

WinTess		
Combinación de carga: 1.1 + 1.1 + SISY + 1.1 VIEN X + .33 VIEN Y		
Sobrecarga = 20 kg/m <sup>2</sup> + Carga accidental: 40 kg/m <sup>2</sup>		
Viento X = 116.1 km/h	Viento Y = 64.7 km/h	Viento total = 132.9109 km/h
Tipo de edificio = Abierto (3) > Sin c=0		
Pretensado de la membrana = 0.08/0.08%		
Peso de los cables = 780.8 kg		
Peso de los tubos = 70989.1 kg		
Peso de la membrana = 1464.4 kg (1394.70 m <sup>2</sup> )		

Fuente: Morales, C. C. (2013e, 2015a, 2016b).

Para este caso, se seleccionó una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002, con una resistencia de RK(daN/5cm) 420/420, y unos tubos circulares de 150 mm de diámetro y 5 mm de espesor de acero con denominación europea S235, cables de acero galvanizado de 18 mm de espesor. Ya realizado el cálculo sobre estas especificaciones, se verifican los datos arrojados del programa, la verificación de los miembros fue realizados por la NCRDF, esto no ocasiona ningún problema, pues los valores que maneja en factores de seguridad son casi iguales que los del manual de acero del LRFD.

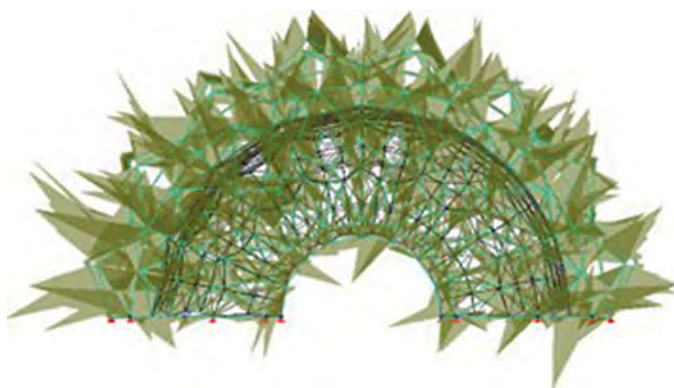
En la tabla 4.13 se observa que todas las barras con mayor esfuerzo de momento y tensión no superan el ratio de seguridad establecido a la unidad (1), se menciona que, para el tipo de estructura, la comprobación sigue siendo la unidad, pero por comprobación de seguridad es de 1.65 en los tubos, ya que este tipo de estructura no es transitable y esto genera mucha controversia (Morales, C.C., 2013e, 2016b).

**TABLA 4.13.** ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

DATOS BARRAS RÍGIDAS							
Barra	Axial	Torsor	M.max	C.max	Tensión	Ratio	Miembro tubular
	T	Tm	Tm	T	kg/cm <sup>2</sup>		
1977	-15.190	0.028	0.180	0.013	-776.2	0.89	Ø150·5_S235
1985	14.149	0.015	0.224	0.018	1267.6	0.89	Ø150·5_S235
1993	-20.120	0.026	0.233	0.014	-1047.9	1.16	Ø150·5_S235
2066	15.497	0.015	0.214	0.026	1349.6	0.95	Ø150·5_S235
2067	-9.990	0.017	0.282	0.017	-332.3	0.71	Ø150·5_S235
2074	-16.809	0.026	0.211	0.004	-845.1	0.99	Ø150·5_S235
2090	-14.778	0.028	0.174	0.005	-754.5	0.86	Ø150·5_S235
2175	6.870	0.003	0.948	0.082	1292.9	0.91	Ø150·5_S235
2184	6.857	0.003	0.936	0.081	1281.5	0.90	Ø150·5_S235
2454	-17.473	0.000	0.181	0.074	-933.2	0.98	Ø150·5_S235
2462	19.036	0.002	0.252	0.123	1371.3	0.96	Ø150·5_S235
2467	16.540	0.003	0.189	0.077	1373.9	0.96	Ø150·5_S235
2469	-16.634	0.007	0.253	0.123	-646.4	0.89	Ø150·5_S235
2474	-19.051	0.007	0.250	0.122	-779.4	0.99	Ø150·5_S235
2475	-18.894	0.024	0.108	0.009	-945.4	0.86	Ø150·5_S235
2485	-16.843	0.009	0.266	0.129	-651.0	0.90	Ø150·5_S235
2502	16.507	0.004	0.194	0.079	1373.5	0.96	Ø150·5_S235
2505	-17.294	0.000	0.175	0.072	-925.2	0.97	Ø150·5_S235
2507	13.091	0.018	0.260	0.028	1205.2	0.85	Ø150·5_S235
2509	-18.468	0.008	0.265	0.129	-738.6	0.97	Ø150·5_S235
2512	18.782	0.005	0.216	0.105	1324.0	0.93	Ø150·5_S235
2513	16.938	0.033	0.177	0.086	1223.9	0.86	Ø150·5_S235

Fuente: Morales, C. C. (2015a).

Especialistas como el Dr. Ramón Sastre Sastre y el Dr. José Ignacio Llorens Duran están redactando reglamentaciones para este tipo de estructuras en Europa y han comprobado que dichas estructuras son factibles con un factor de seguridad de 1,65. Es posible para considerar la aleatoriedad en las cargas y en las incertidumbres del modelo de análisis en relación con la geometría real, sin embargo, en este ejercicio, el ratio se dejó a la unidad porque se manejan factores parciales para cargas y resistencias por la falta de información de este tipo de estructuras transformables, y en nuestro caso, la geometría debe tener rigidez a la hora de estar completamente desplegada y mantenerse en la misma posición para estar en el rango de la seguridad (figura 246) (Morales, C.C., 2013e, 2016b).



**FIGURA 246.** Los momentos en la cubierta son muy bajos gracias a la disposición de los miembros, ya que la figura de la tijereta funciona como celosía. Fuente: Morales, C. C. (2015a).

Los momentos en la cubierta son bajos, ya que la tensión domina axialmente a la estructura, pues su configuración estructural actúa como vigas en celosía, y esto hace que solo actúen los miembros diagonalmente en su máxima capacidad, y que funcione mucho mejor el sistema estructural, aunque nótese que los axiles aumentaron por la misma presión del viento, esto por la colocación de la membrana, con ello mantuvo al límite la dimensión de las barras.

Siguiendo con los resultados de los análisis del programa podemos verificar también la seguridad estructural del cable y de la membrana textil, este tipo de miembros trabajan solo a tracción. Se debe tener cuidado para saber cuánta tensión pueden soportar, por esto la importancia de conocer las propiedades de los materiales y su módulo de elasticidad (tabla 4.14).

Anteriormente se había propuesto un cable de 18 mm, obteniendo valores sobrados. Para este ejercicio se usarán los mismos valores, después de esto se proponen los detalles constructivos de las conexiones de la cubierta, ya que de esas conexiones depende la viabilidad del proyecto experimental. La membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002 resistió perfectamente las deformaciones que tuvo por las presiones



de viento, por empuje y succión. Con estos referentes se puede comenzar a diseñar las conexiones reales de la cubierta plegable y mejorar en todos los sentidos sus uniones y detalles de fijación (figura 247).

TABLA 4.14. DISEÑO DE LA MEMBRANA Y EL CABLE

TRACCIÓN MÁXIMA EN LA MEMBRANA				
Barra	Nudos	T/metro	kg/5cm	Ratio
1728	487-519	1.470	73.5	0.90
TRACCIÓN EN LOS CABLES DE RELINGA				
Cable	T	Ratio	Barra	
1	2.860	0.75	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15WS-2-(18mm)Galv	
2	2.857	0.89	45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56WS-2-(18mm)Galv	
3	1.593	0.65	65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100Inox	

Fuente: Morales, C. C. (2013e, 2015a, 2016b).

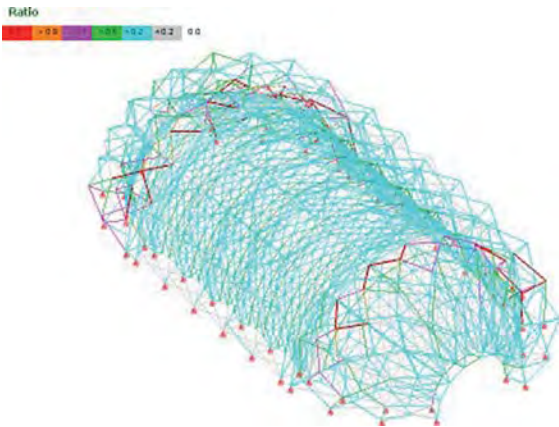


FIGURA 247. Se observa que el ratio de seguridad que está dentro de los miembros y la membrana de la estructura no sobrepasa de lo permitido, gracias a ello se puede dar una propuesta de diseño para las conexiones de la estructura. Fuente: Morales, C. C. (2015a).

Para tener una mayor confiabilidad de los resultados, se puede observar en la imagen los ratio de los tubos, cables y membranas interactuando entre sí, y que ninguno se excedió del factor de seguridad (color rojo), pero en ese caso, la mayor solicitud

la tuvieron las de color naranja, así que la estructura está en el rango de seguridad. (Williams, Ch., 2000), (Villasuso, B., 1994) (Morales, C. C., 2015a, 2016d).

#### 4.5. PROPUESTAS CONSTRUCTIVAS EXPERIMENTALES

En esta fase de estudio pasamos a las propuestas constructivas, con base en los resultados del análisis estructural anterior. Esto nos llevará a la realización de prototipos para verificar si el sistema calculado es factible para construir y pasar a la etapa de diseño final de esta investigación. Antes de generar nuestro primer prototipo, en este apartado se ha realizado un modelado de nodo para construir posteriormente el módulo de la cubierta ligera tensada. El material que se utiliza es un acero A36, con el que se elaborará el modelo del nodo, en este caso, para el diseño del nodo se utilizó el programa Solid Works<sup>8</sup>.

Se tomaron los esfuerzos de la simulación estructural anterior para diseñar en este programa el modelado y cálculo por elemento finito<sup>9</sup>, esto es necesario para el desarrollo efectivo las conexiones. Como el reglamento de construcción del D. F. no indica cómo realizar las conexiones de seguridad, en este ejemplo se realizan por medio de los parámetros establecidos por el manual del LRFD.

De igual manera el reglamento menciona que en caso de no haber información en el reglamento, se puede remitir a los manuales guías por las que se realizaron, en este caso, solo nos evocamos a su factor de seguridad, que es el 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 debe revisar la tensión de la pieza y su desplazamiento dentro de ella.

En cuanto a su tensión, esta no debe de rebasar lo ya establecido, en este caso un  $F_y$ : 250, 000,000.00 N/m<sup>2</sup>. Los criterios de tensión serán establecidos por la teoría de Von Mises<sup>10</sup>, que arrojará la tensión-deformación necesaria para el modelo y también el desplazamiento (Morales, C. C., 2012a, 2013e).

---

<sup>8</sup> Solid Works es un programa que realiza modelados industriales en 3D y tiene una paquetería completa sobre análisis de diseño determinante para generación de conexiones complejas. Fuente: <http://www.solidworks.com/>

<sup>9</sup> El método de los elementos finitos (MEF en español o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Fuente: Morales, C. C. (2016b).

<sup>10</sup> La tensión de Von Mises y el criterio de fallo elástico asociado debe su nombre a Richard Edler von Mises (1913), quien propuso que un material dúctil sufría fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebasaba cierto valor. También se le llama teoría de fallo elástico, basada en la tensión de Von Mises como teoría de Maxwell-Huber-Hencky-von Mises y también teoría de fallo  $J_2$ . Fuente: Morales, C. C. (2016b).

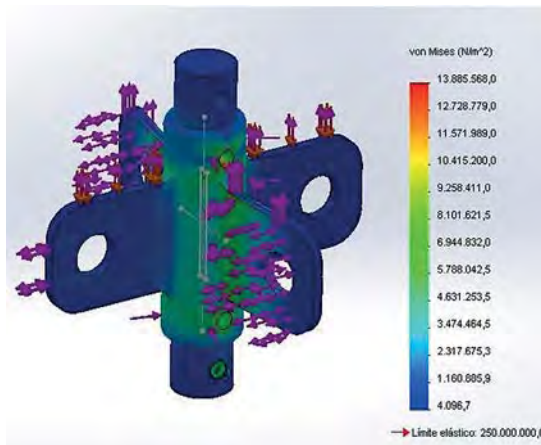
Para este tipo de verificación, se tomará del programa un desplazamiento de 50 mm en ambas direcciones, que es lo que dicta el reglamento en cuanto deformación global del acero. Para comprender mejor el método que se utilizará, se despliega un esquema de trabajo del método de cálculo aplicado, que se resume a continuación:

1. En primer lugar, se crea un modelo tridimensional de la unión, que dará la precisión geométrica que requiere, en general, el nodo puede ser tan complejo como se desee, pero sería muy elevado el número de nudos y elementos que tendría que determinar la computadora para generar la malla de cálculo por elemento finito. Esto para obtener una solución precisa en un lapso de tiempo razonable. Se usará un mallado menos denso en las zonas de menor concentración de tensiones, en nuestro caso, no se tendrán problemas con el modelo sólido en 3D, ya que es muy sencilla su forma.
2. Se analizan los esfuerzos obtenidos en el cálculo del nodo metálico que se realizó con anterioridad al abordar el cálculo de sus uniones. Para el nudo considerado, se seleccionan las hipótesis más desfavorables, introduciendo los esfuerzos al modelo de elementos finitos en las secciones correspondientes que conforman la unión.
3. Para cada conjunto de esfuerzos se realiza un cálculo no lineal del estado, representado por dos tipos de no-linealidades:
  - No-linealidad del material acero, cuya curva tensión-deformación se introduce con una rama elástica y otra plástica, según sea el caso, para este será la elástica.
  - No-linealidad de los elementos que modelizan el contacto entre superficies de chapas, perfiles atornillados. En este ejercicio la selección del tornillo será posterior al resultado arrojado por el análisis del elemento finito.
4. Finalmente, se analizan para cada estado los resultados obtenidos, comprobando que las tensiones o fuerzas calculadas no superen los máximos admisibles, aquí las anteriormente mencionadas.

Teniendo en claro los pasos a seguir en el análisis, se prosigue con el modelado del nodo; este es de una figura muy básica para no complicar la construcción del prototipo (figura 248). Este modelo está diseñado con un tubo de 89 mm de espesor y placas 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 (Morales, C. C., 2012a, 2013e, 2016b).

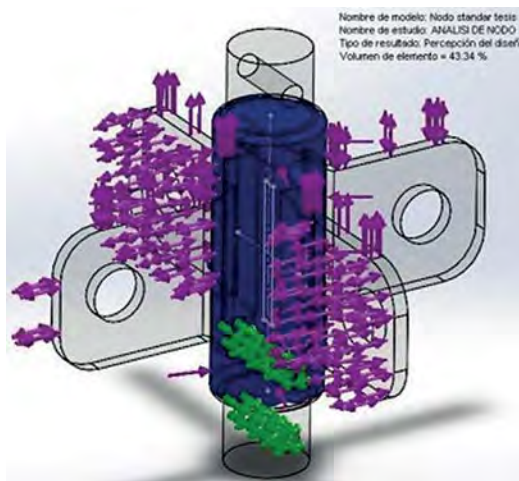


Colocadas las cargas teóricamente en el nodo, se procede a analizar esta hipótesis, pero antes de ello, se colocan las fijaciones teóricas que el nodo tendrá en las uniones de la base y las perforaciones de las conexiones. Después se procede a ejecutar el análisis obteniendo el primer resultado que son las tensiones (figura 250). En la imagen se observa que el límite de tensión en el nodo no sobrepasa el límite elástico, esta tiene apenas 13,885,588 N/m<sup>2</sup> y el límite elástico es de 250,000,000 N/m<sup>2</sup>.



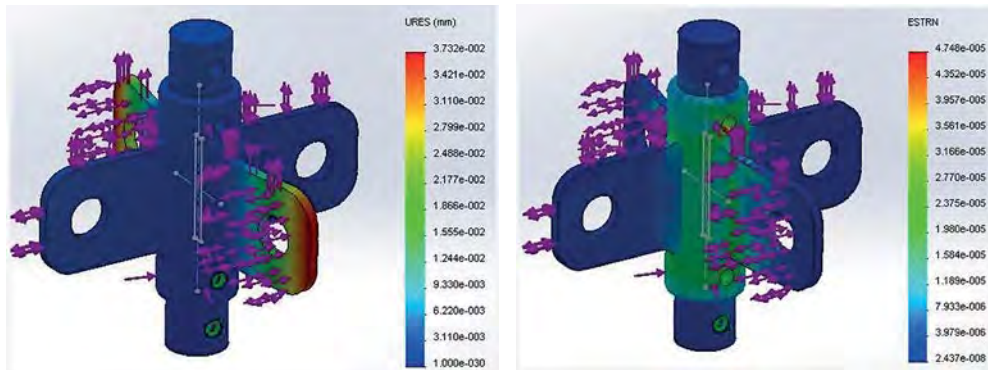
**FIGURA 250.** Las tensiones encontradas en el modelo nos permiten tener un parámetro de seguridad estructural para la construcción del prototipo de la cubierta. Fuente: Morales, C. C. (2013a).

Por lo anterior, el diseño del nodo tal como está no tiene ningún problema (figura 251). En la imagen se verifican las partes en las que fluyen más la carga en el nodo y se comprueba que es su núcleo tubular, esta es la zona donde recibirá todo el esfuerzo interno; sin embargo, esa misma tensión se redistribuirá cuando se conecten todos sus miembros, pero en este caso se obtendrá el nodo comprobado a tensión.



**FIGURA 251.** Se observan las áreas donde existe más trabajo que otras, apenas un 43.3% del material se utiliza, así que estamos en exceso de seguridad. Fuente: Morales, C. C. (2013a).

Continuando con los resultados analizados del nodo, se descubre que las deformaciones y los desplazamientos internos son pequeños; los desplazamientos de acuerdo con el reglamento dados por seguridad son de 50 mm y la deformación de 65 mm. Con esto indicado se puede observar en las figuras 252 y 253 que los desplazamientos son de .0037mm y las deformaciones de .000047 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 y deformaciones tan grandes.



**FIGURAS 252, 253.** Se observan las deformaciones y desplazamientos que puede tener el nodo de la cubierta y notamos que son muy bajas para considerarlas como afectaciones. Serán más fuertes cuando después sean conectadas con la velaria, pero en este caso solo se realizará el prototipo sin la membrana, para verificar su manufacturado y montaje constructivo. Fuente: Morales, C. C. (2013a).

Aunado a lo anterior, la hipótesis de cálculo coadyuvó a obtener el parámetro de seguridad necesario para la construcción del modelo. En cuanto a los tornillos, se escogieron de  $\frac{1}{2}$ ". A continuación, se buscará la resistencia nominal a cortante, el cual se obtiene mediante la Ec. (9.60) del manual del LRFD, por lo tanto:

- Área bruta del tornillo,  $A_b = p/4(1.27)^2 = 1.267 \text{ cm}^2$
- Esfuerzo nominal a cortante,  $F_{nv} = 1897 \text{ kg/cm}^2$  (se obtuvo de la tabla 9.8 para tornillo A307 con  $d = 12.7 \text{ mm}$ )
- Ec. (9.60) (Manual de Acero del LRFD):  $P_n = 1.267 \times (1897) = 2403.499 \text{ kg}$
- De la tabla 9.8 para cortante:  $W = 2.4; f = 0.65$
- LRFD:  $P_u = 0.65 \times (2403.499) = 1562.274 \text{ kg/tornillo}$



Recordemos que la tensión en el nodo es de 138.85 kg/m, se utiliza esta dimensión de tornillo porque con uno menor, quedaría fuera del parámetro de seguridad holgada. Por ser la primera vez que se realiza en el estado un sistema como este, es mejor tener un margen suficiente de seguridad para determinar su resistencia (Segui, W., 2000) (Morales, C. C., 2015a, 2016d).

#### 4.6. DESARROLLO DEL DISEÑO DEL NODO TIPO

El siguiente paso determina la ejecución de un modelo a escala 1:1. Primeramente, para fabricar el nodo se realizó un modelo a escala con papel batería, para fabricar un aproximado del nodo tipo del prototipo de cubierta, esto para verificar que el nodo sea apropiado y que no tendrá ningún inconveniente en las conexiones.

Posteriormente, se modela el nodo primario (figura 254), el cual se envió a fabricar, utilizando los servicios de un técnico experimentado quien confeccionó el modelo a la misma escala, con tubería de acero de 89 mm y placas de  $\frac{1}{2}$ " para resistir las tensiones en sus extremos (Morales, C. C., 2014c).



**FIGURA 254.** Evidencia fotográfica del prototipo: desarrollo del modelo experimental en sus primeras fases de diseño, posteriormente se elaboró en acero. Fuente: Morales, C. C. (2012a, 2014c).

La fabricación del nodo fue artesanal, por lo que se tuvo que considerar el armado por medio de soldadura, utilizando un electrodo E60XX con resistencia de



4230.4 kg  $\times$  cm<sup>2</sup>, altamente resistente, para que dicho modelo no falle por cortante y no haya algún cambio drástico del análisis anterior y se acerque lo más posible a las tensiones encontradas.

Este primer modelo sirve de guía para la producción en serie de los 8 módulos de la cubierta ligera plegable, en esta etapa se hicieron las correcciones pertinentes para la fabricación del nodo tipo, que contendrá el módulo fraccionado de la cubierta, se encontraron dos cosas muy importantes (Morales, C. C., 2014c).

La primera es que el módulo tendrá que ser compuesto, con la particularidad de transformarse para adaptarse en el espacio y con ello estructuralmente ser más eficiente, ya que la estructura en sí entraría en una etapa elástica de últimas resistencias pero sin sobrepasarlas. Esto quiere decir que las estructuras son sistemas de segundo orden, porque la rigidizan membranas y cables, por esto los esfuerzos de compresión y tracción son vitales para mantenerla estable (véase en el análisis por simulación estructural anterior, ya que de los resultados de los esfuerzos de dicho sistema se elaboró el nodo y su cálculo estructural). Después se agregarán unos accesorios para colocarlos por debajo de la cubierta, para simular su rigidización, ya que la membrana sirve de arrostramiento (Morales, C. C., 2014c).

La segunda observación es que el diseño del modelo del nodo tipo tendrá que construirse por el momento con varias piezas, siendo lo más viable que fuese en un vaciado monolítico de la pieza, pero la falta del recurso llevó a fabricarlo con base en piezas compuestas de tubos y placas.

Con esto se termina la etapa de prediseño del modelado del nodo tipo, esto prevé las estrategias que se deberán seguir para construcción del nodo estándar compuesto (Morales, C. C., 2014c).

El siguiente paso fue la fabricación de los nodos en acero, el análisis estructural arrojó miembros de A36 de OCE 150 mm con una tensión aceptable para manufacturar y así mantener la resistencia y estabilidad estructural (pero para nuestro caso se utilizó un OCE 100 mm por falta de recursos financieros).

Este nodo se fabricó por medio de armado de pieza, en el caso anterior fue más estético que en el nuevo a manufacturar, esto sucedió por el excesivo costo de fabricación. Se tuvieron que volver a hacer los cambios pertinentes, con el modelo más recomendable, aun así se decidió que todos fueran elaborados con un tubo de acero OCE 89mm, con placas de 1/2", estos se soldaron con electrodos E60XX para darle homogeneidad a los nodos.

Esta misma naturaleza se dio a la fabricación de los miembros tubulares que forman la tijereta, construida por tubos OCE 100 y placas de 1/2" (figuras 255 a 260), explicado esto, se realizó el concepto de producción industrial; para armar el nodo estándar se colocaron las medidas exactas para su producción (Morales, C. C., 2013e, 2014c, 2016b).



**FIGURA 255 A LA 260.** Evidencia fotográfica del manufacturado del prototipo: se desarrolló una base de armado industrial para construir el nodo de la forma más sencilla posible y que no costara demasiado en esta etapa de pruebas constructivas. Fuente: Morales, C. C. (2012a).

Para hacer esto, se confeccionó un molde en donde se colocarán los componentes unidos con soldadura. En seguida, el nodo principal se tuvo que integrar por varias piezas, ya que el nodo estándar cuenta con conexiones hacia los arrostramientos y el rigidizador principal, por lo que se le instaló un cinturón de refuerzo soldado, para que el nodo se mantuviera firme durante el ensamblaje y no se moviera, con esto se lograron armar los nodos que compondrán las uniones de la cubierta (Morales, C. C., 2014c).

Por otra parte, el nodo de contraventeo que unirá dichos miembros se fabricó en una sola pieza para este prototipo, con ángulos de  $100^\circ$  en la parte más abierta del módulo y  $80^\circ$  en la parte más cerrada. Su manufactura no se logró terminar satisfactoriamente como el del nodo principal, pero lo importante de esta práctica de fabricación es el montar la cubierta plegable. Para comenzar a ver sus ventajas y desventajas constructivas, con esta última pieza elaborada se pudo obtener el cierre de distribución que va a interactuar en la estructura.

Por último, la construcción de los miembros que estarán conectados entre los nodos, como las tijeras plegables que forman el arco, las tijeretas plegables lineales y los miembros de contraventeo, fueron fabricados con tubo de OCE 100 y placas de  $\frac{1}{2}$ " (figuras 261 a 263). Estas placas fueron colocadas en los extremos de los tubos, en la parte tangencial de la circunferencia tubular del miembro, con esto hay mayor facilidad de ensamble con las otras piezas (Morales, C. C., 2014c).



**FIGURA 261 A LA 263.** Evidencia fotográfica del manufacturado del prototipo: los miembros se realizaron con piezas compuestas sencillas para que el armado y montaje de la cubierta fuese más fácil de construir. Fuente: Morales, C. C. (2012a).

En la parte de los miembros de tijeras, exactamente en las uniones de pliegue, se unieron dos placas de ángulo para que la cara de los tubos fuera más exacta a la hora de operar. La retracción de la estructura, los pernos y tuercas de sujeción son de  $3/8''$  ya que el esfuerzo más fuerte se presenta en las conexiones del nodo, pero en este caso, se les colocaron con medida de  $1/2''$ , así se mantendrán fijas las uniones de la cubierta cuando se realice el montaje de prueba de los módulos (Nonnas, R., 2003) (Morales, C. C., 2014c, 2015, 2016b).

## 4.7. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

### 4.7.1. Primera prueba de conexiones

La primera prueba de montaje se realizó para ver si las uniones y los miembros empalmaban perfectamente con la geometría deseada y calculada, ya que esto serviría para corregir cualquier percance o imperfección de la geometría.

Al principio, se aplicó una capa de Primer a los miembros y nodos para la adherencia de la pintura epóxica, lo que ayudará a que la estructura no se oxide, pues la

estructura se armará a la intemperie, debido a que la humedad relativa en la región tiene una saturación aproximada del 65 al 85%, y por la presencia de contaminantes como el salitre y componentes químicos por ser una zona petrolera (figuras 264 a la 269).



**FIGURAS 264 A LA 269.** Evidencia fotográfica del prototipo: esta primera parte del armado sirvió para colocarle una capa de Primer y pintura anticorrosiva para que en el armado del sistema no se fuese a oxidar. Fuente: Morales, C. C. (2012a).

Posteriormente, se forja la estrategia del armado con los miembros plegables, estos se colocan de tal manera que los nodos superior e inferior estén de primera mano, ya sujetos por los rigidizadores se unen con tuercas y tornillos de  $1/2"$ , para ayudar a estabilizar el módulo temporalmente (Morales, C. C., 2014c).

Continuando con el armado se colocan las tijeretas en posición de arco y se atornillan a los nodos con sus sujeciones; después de haberlos colocado, se junta el módulo con las tijeras lineales para formar la figura del módulo cuadrícula, todas estas sujeciones con tornillos de  $1/2"$ . Después de haber formado el módulo, se montaron sobre unas tarimas al centro, para que se colocaran los miembros de arrostramientos en sus cuatro vértices; estos se sujetaron con el nodo de contraventeo, unidos con tornillos del mismo calibre que los demás, ya fijado por peso propio, la figura del módulo se estabiliza temporalmente.

Siguiendo con el izamiento de la estructura, se arman de manera independiente los ocho módulos, para observar si hay errores en la fabricación y su posterior corrección. Para el armado de los demás módulos, se colocaron también tarimas que generan la contra flecha para sostener la estructura temporalmente, estas se ensamblaron en par de dos módulos (figuras 270 a 277).

Para generar la curvatura circular, se realiza la misma operación de montaje y se usan los mismos accesorios de conexión, formado la figura curva que tiene la estructura y para observar si la flecha se va generando, donde se notó que no hubo algún problema.

El premontaje del prototipo ayudó a asegurar que el método de montaje debía ser con andamios, ya que inicialmente se levantaría con una grúa ya armada, sin embargo, la falta de espacio para armar y desplegar el prototipo propició que el ensamblado sea por medio de dos andamios en la parte central del módulo desplegable. Los andamios servirán de apoyo provisional para que se unan los demás miembros, por lo cual se crearon nuevas estrategias de construcción para ofrecer una mejor estabilidad estructural. Los accesorios de conexión fueron cables que ayudarían a arriostrar el módulo, colocándolos en la parte inferior de la estructura (Morales, C. C., 2014c).

También se corrigieron algunos defectos de construcción para lograr mayor estabilidad. Se colocaron accesorios al nodo para el cable y simular la membrana, asimismo se decidió colocar unos basamentos de concreto para nivelar y soportar los extremos de la cubierta, con dimensiones de  $.50 \times .50 \times .60$  m de profundidad y armado con varillas de  $3/8"$ . Se menciona esto empíricamente, ya que la velocidad del proyecto constructivo rebasó en tiempo y el montaje, por lo que se tomó una decisión rápida para no tardar más tiempo en ensamblarlos.

Posteriormente, el armado se hará por andamiaje y secciones, para ensamblar la estructura completa, aunque falta hacer algunas correcciones, la geometría sigue siendo de ayuda para que el sistema estructural se mantenga estable (Morales, C. C., 2015a, 2014c, 2016d).





**FIGURA 270 A LA 277.** Evidencia fotográfica del prototipo: se desarrolló el armado de la estructura para verificar si ensamblan todas las piezas, esto ayudó a corregir algunos errores y desarrollar una estrategia constructiva de armado. Fuente: Morales, C. C. (2012a, 2014c).

### 4.7.2. Segunda prueba de montaje

Esta segunda parte del montaje del prototipo es para armar el arco completo con todas sus conexiones ya fijas y atornilladas. El método constructivo que se usará es por armado de conexiones rígidas. La falta del presupuesto no dio oportunidad de probar la plegabilidad de las tijeras y se tuvieron que fijar las tijeretas y nodos. Por todo ello se prefirió armar como piezas espaciales, aun así, se evitó utilizar una grúa (lo que era deseable para su armado final), ya que el arco tiene una contra flecha de 12.5 m en su parte inferior y en la punta más alta 14.5 m, una altura algo considerable para poder armarla solo por andamiaje (figuras 278 al 283).



**FIGURA 278 A LA 283.** Evidencia fotográfica del prototipo: el segundo ensamble se realiza para formar el arco de la cubierta retráctil, éste contará con 8 módulos conectados para comprobar fallas geométricas y constructivas del mismo sistema. Fuente: Morales, C. C. (2012a).



Así que la propuesta es armar 5 módulos en serie ya conectados para formar un solo prisma y otros dos en las dos partes extremas del arco. Se levantará el prisma de los 5 módulos y se conectará al primer extremo del arco y posteriormente se integrará el último módulo de tijeretas para unir los 6 módulos interconectados con el módulo del extremo, esto último para completar el arco de tijeretas de ocho módulos que tendrá la cubierta cilíndrica plegable.

En teoría es lo que se llevaría a cabo, ya que solo se teníamos armados los 5 módulos conectados entre sí en serie y los dos del extremo del arco, por la falta de presupuesto no se completó el arco. Además de surgir imprevistos al no estar arriostrada la parte de inferior de la estructura, ésta empezó a pfectarse en sus extremos y con tendencia a abrirse, en respuesta a ello se arriostró con cables para lograr un prisma perfecto, lo que ayudará a sostener la estructura en el proceso de izaje.

Con la experiencia obtenida al realizar el prototipo a escala real, surgieron tres cosas a 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. Dos, que el diseño del nodo tiene que cambiar porque se tuvo problemas de excentricidad en las uniones conectadas. No se tuvo plastificaciones, pero no todas las caras de la estructura quedaron exactas. Por último, que la colocación de la membrana es importante para el arriostramiento de la parte inferior, lo cual resolvería una de las preguntas iniciales. La colocación de la membrana en la parte inferior haría que la estructura se arriostrara completamente. Estas recomendaciones deben atenderse para poder dar una mejor aplicación tecnológica constructiva (Morales, C. C., 2015a, 2016d).

## **4.8. PROPUESTAS DE DETALLES CONSTRUCTIVOS, MEJORAMIENTO DE LAS UNIONES**

### **4.8.1. Primera propuesta constructiva**

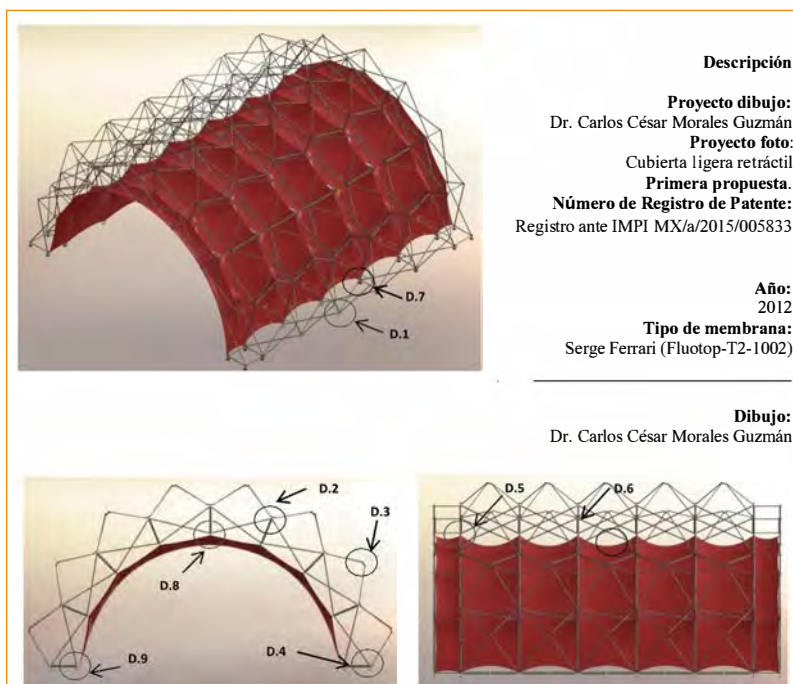
El fruto de todo el estudio, análisis de modelos anteriores y simulaciones estructurales, culmina con una primera propuesta aproximada de los detalles constructivos de una cubierta plegable tensada (primera fase de diseño final de la investigación). A su vez tendrá dos propuestas de las cuales se obtendrá un bagaje de posibilidades sobre cómo construir el sistema que logrará la capacidad de transformarse en diferentes sitios, así como cubrir grandes claros.

Por lo tanto, en la siguiente descripción de dibujos se desarrolla el detallado de las uniones de la cubierta que pueden mejorar una propuesta de diseño de una cubierta plegable en el último apartado de este documento. Para comenzar, se propone solo la cubierta central plegable ya que en una primera etapa del estudio no

se había definido toda la geometría, lo cual queda más explícito en los dibujos estructurales de la cubierta ligera que se presentan a continuación. En primer lugar, se presenta el esquema general de la cubierta tensada, donde se destaca que es de gran envergadura, y puede cubrir un claro transversal de 25 m por 27 m de longitud, con un peralte efectivo de 2 metros, que trabaja como una armadura de alma abierta circular y se fabrica con un Acero A36 en su denominación Europea Acero S235, cuyos nodos están hechos de acero forjado de la misma denominación.

Cuenta con una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002, tiene una resistencia de RK (daN/5cm) 420/420, módulo de Elasticidad (t/m) 50/50. Este proyecto se completa con dos grandes cúpulas a sus costados que se verán más adelante en la siguiente propuesta. La membrana textil le da una característica especial, de tal forma que el sistema se pueda montar con dicha membrana integrada (tabla 4.15), esto gracias a su ligereza en peso, que a su vez contribuye a que se integre en el sistema (Morales, C. C., 2013e, 2014c, 2016b).

**TABLA 4.15. MODELO EN 3D DE LA PRIMERA PROPUESTA**





El desarrollo de dicha estructura se llevó a cabo por la adecuación geométrica de una forma orgánica, resultando una geometría orgánica flexible, ya que en la naturaleza existen estructuras versátiles que se adaptan a su contexto, tal concepto se materia-

liza en esta estructura. Su referente tecnológico directo es el teatro ambulante del Arq. Emilio Pérez Piñero basado en una estructura retráctil.

Este prototipo mejora su eficiencia por la unión de los arrostramientos en un mismo nodo, flexible y articulado, que ayuda a absorber la presión y succión del viento en ambas caras de la estructura, donde esta última tendrá como utilidad varias funciones arquitectónicas como: exposiciones, eventos de distintas índoles, etc. (tabla 4.16).

Cubre un claro transversal de 25 m por 27 m de longitud, tiene un peralte efectivo de 2 metros, que trabaja como una armadura de alma abierta circular, se elabora con un Acero A36 en su denominación Acero s235, sus nodos están hechos de acero forjado de la misma denominación, tiene una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002, con una resistencia de RK(daN/5cm) 420/420, módulo de Elasticidad (t/m) 50/50 (Morales, C. C., 2013e, 2016b).

**TABLA 4.16.** DETALLES CONSTRUCTIVOS Y DESCRIPCIONES DE FUNCIONAMIENTO

	<p><b>Detalle central de unión de base con nodo y contraventeo (D.1):</b></p> <p>El nodo exterior de borde de la cubierta une a las tijeras plegables en la parte superior, donde los nodos flexibles de contraventeo se fijan con un enroscado nivelador, este ayuda a que tengan cierta libertad de movimiento. Los miembros de los arrostramientos se unen con los nodos principales y sujetan con la articulación por medio de un bushing, este ayuda a que puede articularse y absorbe esfuerzos que llegan a la base.</p> <p>La tuerca de fijación y prensillas ayudan a rigidizar la estructura en su posición final, está calculada para tensiones máximas que se encontraron en la estructura que es del orden 2.02 t/m<sup>2</sup> y momentos máximos de .349 t/m<sup>2</sup>.</p>
	<p><b>Detalle central de nodo y contraventeo (D.2):</b></p> <p>El nodo de contraventeo está constituido por una forma esférica para ofrecer más flexibilidad en sus ejes. Sus ángulos de apertura son de 100° en dirección longitudinal y 80° en dirección transversal, ya que los miembros de contraventeos no deben de ir forzados a esta unión, sino articulados para que puedan distribuir sus esfuerzos a las uniones de apoyo de la cubierta. La función principal es distribuir la presión del viento a la base de la estructura.</p> <p>Las placas con uniones articuladas al nodo esférico están unidas con un perno nivelador que hace de tope, para que no se salga el miembro del contraventeo. Está calculada para soportar tensiones del orden de 1.39 t/m<sup>2</sup>, y momentos de .305 t/m<sup>2</sup>, esta unión es vital, en ella distribuyen la presión del viento a la estructura.</p>



#### **Detalle de nodo de arrostramientos (D.3):**

El nodo de arrostramientos se encarga de conectar en su punto más alto los miembros que distribuyen la presión del viento a los nodos principales de la cubierta; tienen ángulos de  $90^\circ$  en ambas direcciones y están articulados en sus ejes para adaptarse a la forma final de la estructura.

Está constituida de forma esférica, ya que como tiene que ser articulada en varias direcciones; permite generar conexiones flexibles, unidas con un perno nivelador que hace la función de sujetar los cabezales de los miembros que van a los nodos principales. Todo el elemento está calculado para soportar tensiones de  $1.05 \text{ t/m}^2$  y momentos de  $.490 \text{ t/m}^2$ .



#### **Detalle de base con borde de nodo en marco y arrostramiento (D.4):**

El nodo que conecta al marco estructural de la cubierta es una de las uniones más importantes, ya que da la estabilidad al sistema; son conexiones de borde y base, en donde se encuentra un nodo de arrostramiento que también es esférico pero configurado para una sola conexión.

Su tuercas y uniones están calculadas para soportar tensiones de  $1.650 \text{ t/m}^2$  y momentos de  $.150 \text{ t/m}^2$ , aquí el momento es menor ya que, aunque está empotrada en la base, teóricamente las uniones son articuladas y la barra metálica es la que realmente absorbe el momento generado en la estructura. En cambio, en tensión es mayor, ya que hay una reacción por parte de la base que redistribuye los esfuerzos en la cubierta.



#### **Detalle de nodo central de marco con arrostramiento (D.5):**

El nodo central conectado al marco está constituido por un nodo de arrostramiento de borde, este ayuda a que se distribuya la presión del viento en marco principal de la estructura, el marco es el que equilibra y rigidiza los empujes del viento en la estructura.

De igual manera el nodo de arrostramiento está conformado de forma esférica, esto ayuda a constituir las conexiones flexibles, está unida con un perno nivelador que hace la función de sujetar los cabezales de los miembros que van a los nodos principales. Todo el elemento está calculado para soportar tensiones de  $1.24 \text{ t/m}^2$  y momentos de  $.590 \text{ t/m}^2$ .

**Detalle de manto central (D.6):**

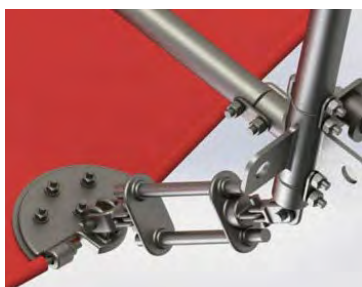
La unión del nodo inferior con el manto de la membrana se resolvió con antecedentes previos de otra construcción, pero se calculó a las tensiones que se encuentran en el manto de la velaria que es del orden de .750 t/m en dirección X y .790 t/m en dirección en Y, como es simétrico dicha tensión de esfuerzo, la placa circular metálica es suficiente para absorber tales esfuerzos.

El detalle está constituido por placas de acero con cilindros reguladores para el pretensado de la cubierta, también se diseñó un dispositivo biarticulado en la cabeza del plato metálico, para poder adaptarse a la forma final de la cubierta retráctil y también poder ir acoplándose a las dilataciones que pueda sufrir por cambios de temperatura.

**Detalle de manto de borde central (D.7):**

La unión del nodo inferior con la conexión del manto en el borde es uno de los detalles más complicados ya que no es excéntrica al nodo, pero se diseñó para que solo tuviera un regulador y coincidiera sobre el eje de la geométrica de la estructura, ya que las conexiones deben ir al par con las tensiones del manto. La flexibilidad de este detalle nace en el cabezal biarticulado que contribuye a que pueda llegar a tener cierto movimiento con la vela.

El nodo está biarticulado, sus uniones hacen que el sistema se equilibre en los empujes del viento, esto hace que se pueda regular el manto; el elemento está calculado para soportar tensiones en X de .650 t/m y en dirección Y de .570 t/m.

**Detalle de manto central de borde de marco (D.8):**

La unión del nodo de borde de marco superior con el manto de la vela se diseñó basado en las tensiones que se encontraron en la velaria, que es del orden de .675 t/m en dirección X y .585 t/m en dirección Y. Como es una conexión de borde superior al marco estructural, la misma velaria no permite que quede a eje, la conexión está biarticulada tanto en la base del nodo principal como en la placa de sujeción que agarra el manto.

El detalle está constituido por placas de acero con cilindros reguladores para el pretensado de la cubierta, conectado y articulado en ambos lados, también se diseñó un dispositivo biarticulado en la cabeza del plato metálico, para poder adaptarse a la forma final de la cubierta retráctil.

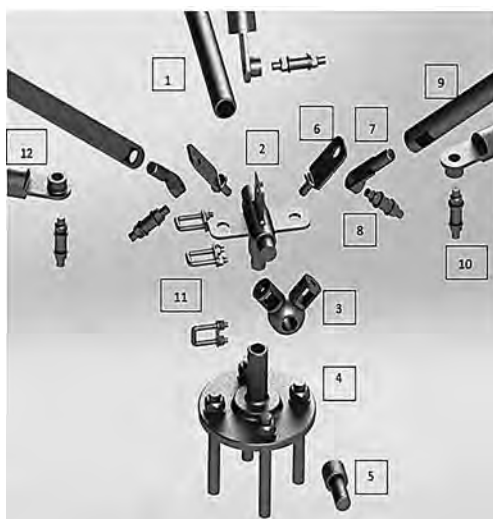




### Detalle de manto de esquina (D.9):

La unión de esquina es uno de los detalles muy complicados de diseñar, ya que estas placas metálicas deben tener libertades de movimiento, con esto podrá absorber las tensiones que se generan en las direcciones longitudinal y transversal. Las tensiones que se encuentran en estos extremos son del orden de .657 t/m en dirección X y .480 t/m en dirección Y. La unión de este detalle con los nodos principales está hecha por medio de conexiones biarticuladas, donde se encuentran reguladores de pretensado. Dichos forjados también están biarticulados en la unión del nodo principal, esto para poder adaptarse a la esquina de la cubierta.

De igual manera, el regulador central del accesorio puede corregirse para darle el pretensado correcto en los bordes de esquina del manto.



### Despiece central de unión de base con nodo y arrostramiento (D.1):

1. Atiezador vertical.
2. Nodo para apoyo.
3. Nodo de borde de arrostramiento.
4. Base de cubierta con pernos y tuercas 1" 1/2.
5. Sujetador de nodo de arrostramiento.
6. Placas articuladoras para arrostramiento, con tope rigidizador.
7. Cabezal articulado con tope rigidizador.
8. Unión de Bushing con tuercas de sujeción para contraventeo de 1".
9. Barra de contraventeo.
10. Unión de Bushig con tuercas de sujeción para tijeras retráctil de 1".
11. Sujetadores para nodos uniones de nodo principal y base.
12. Barra de tijera retráctil.



### Despiece central de nodo y arrostramiento (D.2):

1. Barra de arrostramiento.
2. Cabezal articulado con tope rigidizador.
3. Placas articuladoras para contraventeo con tope rigidizador.
4. Nodo central de arrostramiento.
5. Sujetadores para nodos, uniones de nodo principal.
6. Nodo estándar principal.
7. Atiezador vertical.
8. Unión de Bushing con tuercas de sujeción para contraventeo de 1".
9. Unión de Bushig con tuercas de sujeción para tijeras retráctil de 1".
10. Sujetador de nodo de arrostramiento.
11. Barra de tijera plegable unidireccional.

**Despiece de nodo de arrostramiento (D.3):**

1. Barra de arrostramiento.
2. Unión de Bushing con tuercas de sujeción para arrostramiento de 1".
3. Cabezal articulado con tope rigidizador.
4. Placas articuladoras para arrostramiento con tope rigidizador.
5. Nodo de estabilizador central de arrostramiento.

**Despiece de base con borde de nodo en marco y arrostramiento (D.4):**

1. Barra de tijera plegable unidireccional.
2. Unión de Bushing con tuercas de sujeción para tijeras retráctil de 1".
3. Nodo para apoyo.
4. Nodo de esquina de marco estructural.
5. Sujetador de nodo de arrostramiento.
6. Base de cubierta con pernos y tuercas 1" ½.
7. Barra de tijera plegable.
8. Unión de Bushing con tuercas de sujeción para arrostramiento de 1".
9. Barra de arrostramiento.
10. Cabezal articulado con tope rigidizador.
11. Placas articuladoras para contra venteo, con tope rigidizador.
12. Atiezador vertical.
13. Sujetadores para nodos uniones de nodo principal y base.
14. Atiezador horizontal.

**Despiece de nodo central de marco con arrostramiento (D.5):**

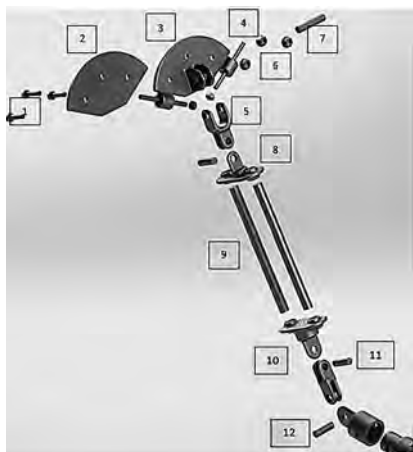
1. Atiezador vertical.
2. Sujetadores para nodos uniones de nodo principal y base.
3. Nodo marco estructural.
4. Sujetador de nodo de arrostramiento.
5. Nodo de borde de marco con arrostramiento.
6. Placas articuladoras para arrostramiento, con tope rigidizador.
7. Unión de Bushing con tuercas de sujeción para arrostramiento de 1".
8. Barra de arrostramiento.
9. Cabezal articulado con tope rigidizador.
10. Unión de Bushing con tuercas de sujeción para tijeras.





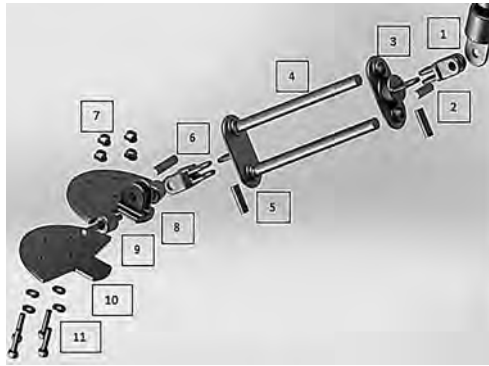
#### Despiece de manto central (D.6):

1. Nodo estándar principal.
2. Barra de tijera plegable unidireccional.
3. Unión de Bushig con tuercas de sujeción para tijeras plegable de 1".
4. Sujetadores para nodos uniones de nodo principal y base.
5. Sujetador de nodo con cilindro regulador.
6. Barra reguladora de 1".
7. Cilindro regular de articulado.
8. Col roll para sujeción articulada.
9. Nodo biarticulado.
10. Arandelas y tuercas de 1/2" para fijación de manto.
11. Col roll para sujeción articulada.
12. Placa metálica forjada.
13. Placa metálica de agarre.
14. Tornillos de sujeción de 1/2".



#### Despiece de manto de borde central (D.7):

1. Tornillos de sujeción de 1/2".
2. Placa metálica de agarre.
3. Placa metálica forjada.
4. Relinga con cable de 14 mm.
5. Nodo biarticulado.
6. Arandelas y tuercas de 1/2" para fijación de manto.
7. Col roll para sujeción articulada.
8. Accesorio de conexión de regulación.
9. Barras reguladoras de 1".
10. Accesorio de regulación y fijación al nodo principal.
11. Nodo biarticulado para nodo principal.
12. Accesorio de anclaje para nodo principal.

**Despiece de manto de borde central de marco (D.8):**

1. Accesorio de anclaje para nodo principal.
2. Nodo biarticulado para nodo principal con col roll.
3. Accesorio de regulación y fijación al nodo principal.
4. Barras reguladoras de 1".
5. Accesorio de conexión de regulación.
6. Nodo biarticulado.
7. Arandelas y tuercas de 1/2" para fijación de manto.
8. Placa metálica forjada.
9. Relinga con cable de 14 mm.
10. Placa metálica de agarre.
11. Tornillos de sujeción de 1/2".

**Despiece de manto de esquina (D.9):**

1. Tornillos de sujeción de 1/2".
2. Placa metálica de agarre.
3. Relinga con cable de 14 mm.
4. Placa metálica forjada.
5. Arandelas y tuercas de 1/2" para fijación de manto.
6. Nodo biarticulado.
7. Accesorio de conexión de regulación.
8. Arandelas y tuercas de 1/2" para fijación de manto.
9. Barras reguladoras de 1".
10. Accesorio de regulación y fijación al nodo principal.
11. Nodo biarticulado para nodo principal con col roll.
12. Accesorio de anclaje para nodo principal.

**Detalle de manto de esquina geodésica plegable: (D.-19)**

La unión de esquina es uno de los detalles muy complicados de diseñar, ya que estas placas metálicas deben tener libertad de movimiento, con esto podrá absorber las tensiones que se generan en las direcciones longitudinal y transversal. Las tensiones que se encuentran en estos extremos son del orden de .657 t/m en dirección X y .480 t/m en dirección Y. La unión de este detalle con los nodos principales está hecha por medio de conexiones esféricas para que tenga varios grados de libertad, con ello se le implementa un regulador de pretensado, dichos forjados también están triarticulados en la unión del nodo principal, para poder adaptarse a la esquina de la cubierta.

De igual manera, el regulador central del accesorio puede corregirse para darle el pretensado correcto en los bordes de esquina del manto.

### ***Ventajas***

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

Y así el nodo pueda trabajar correctamente y mitigar los esfuerzos que se pueden encontrar en la estructura. Este modelo deja parámetros de diseño constructivo muy interesantes ya que el modelo se pudo realizar a escala 1:1 y verificar algunos errores que puede tener este tipo de conexiones.

### ***Desventajas***

Una de las desventajas de dicha propuesta es el mismo diseño del nodo, no mantiene la excentricidad de los esfuerzos, al estar armados con placas tienden al pandeo, de igual forma los mismos miembros pueden llegar a pfectar como sucedió en el modelo escala 1:1 solo con su propio peso, el cual nos ayudó a contemplar parámetros de reconfiguración de la siguiente propuesta experimental.

Por último, los detalles de la membrana no quedaron bien resueltos en los bordes y esquina, ya que por la conexión de placa genera arrugas por mala conexión, al no ser paralelo al esfuerzo se produce en la membrana momentos en sistemas que solo deben actuar a tracción (Morales, C. C., 2015a, 2016d, 2016a).

## **4.8.2. Segunda propuesta constructiva**

La segunda propuesta es la evolución de la primera, se mejoraron las conexiones articuladas que ayudan a construir geometrías más optimas que los modelos anteriores, se realizó una propuesta aproximada de los detalles constructivos de una cubierta plegable tensada con dos geodésicas rebajadas en los extremos, de las cuales se obtendrá un bagaje de posibilidades sobre cómo construir el sistema plegable, lo cual le dará viabilidad de transformarse en diferente sitios y también cubrir grandes claros. Por ello, es importante la aportación de este nuevo diseño de conexiones articuladas en la cubierta transformable.

Para comenzar, se propone la cubierta central plegable con dos geodésicas plegables en los extremos. Esta define la figura de la geometría en los dibujos estructurales de la cubierta transformable que se presenta a continuación, que es de gran envergadura y puede cubrir un claro transversal de 25 m por 42 m de longitud, tiene un peralte efectivo de 2 metros, trabaja como una armadura de alma abierta circular,

se fabrica con Acero A36 (en su denominación europea Acero s235), sus nodos están hechos de acero forjado de la misma denominación.

Cuenta con una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002, con una resistencia de RK (daN/5cm) 420/420, módulo de Elasticidad (t/m) 50/50; este proyecto sí completa las dos grandes cúpulas a sus costados, lo que aumenta considerablemente el detalle de la cubierta, la velaria le da una característica especial, de tal manera de que el sistema se pueda montar en dos etapas. La dificultad de la geometría son las geodésicas (tabla 4.17), ya que genera un poco de complejidad en el sistema de plegado (Morales, C. C., 2014c, 2015a).

**TABLA 4.17.** SEGUNDA PROPUESTA EN 3D

	<p><b>Descripción</b></p> <p><b>Proyecto dibujo:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p> <p><b>Proyecto foto:</b> Sistema Transformable</p> <p><b>Arquitecto:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p> <p><b>Ingeniería:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p> <p><b>Segunda propuesta.</b> <b>Número de Registro de Patente:</b> Registro ante IMPI MX/a/2015/005834</p> <p><b>Año:</b> 2013</p> <p><b>Tipo de membrana:</b> Serge Ferrari (Fluotop-T2-1002)</p>
	<p><b>Dibujo:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p>

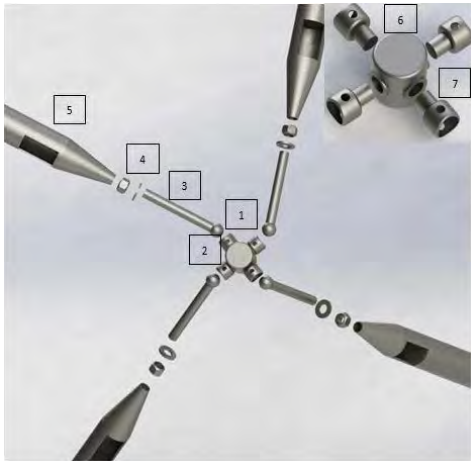
Fuente: Morales, C. C. (2013a).

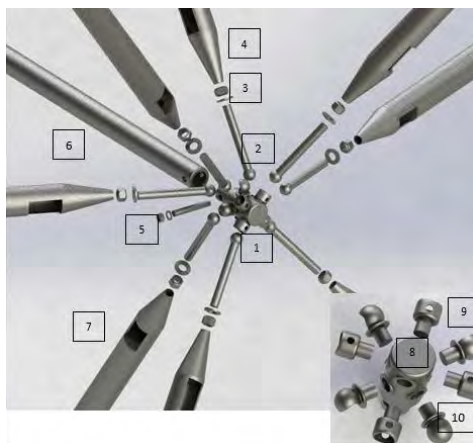
El desarrollo de dicha estructura se realizó producto del estudio de una geometría plegable, por consecuencia se construyó un sistema transformable, ya que existen estructuras versátiles que se adaptan a su contexto en el mundo, pero este concepto trata de mejorar tales sistemas, sus referentes tecnológicos directos son los desarrollos tecnológicos del Arq. Emilio Pérez Piñero, que se basa en una estructura plegable, pero este prototipo mejora su eficiencia en las conexiones del nodo, gracias a esto es más flexible y articulado, ayuda a absorber la presión y succión del viento en ambas caras de la estructura (Morales, C. C., 2013e, 2014c).

Dicha estructura tendrá como utilidad varias funciones arquitectónicas, como exposiciones, eventos de distintas índoles, etc., cubre un claro transversal de 25 m por 42 m de longitud, tiene un peralte efectivo de 2 metros, que trabaja como una armadura de alma abierta circular, se realiza con Acero A36 en su denominación Acero s235.

Sus nodos están hechos de acero forjado de la misma denominación, tiene una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002, con una resistencia de RK (daN/5cm) 420/420, módulo de Elasticidad (t/m) 50/50, este proyecto se completa con dos grandes cúpulas a sus costados realizadas con el mismo material (tabla 4.18), también sus nodos son flexibles y articulados y puede ser plegados para su fácil transportación (Morales, C. C. 2013e, 2014c, 2015a, 2016b, 2016d).

**TABLA 4.18.** DESCRIPCIÓN DE DETALLES CONSTRUCTIVOS DE ARMADO  
Y DESPIECE DE CADA COMPONENTE Y LAS MEJORAS A LA ANTERIOR PROPUESTA

	<p><b>Despiece de detalle de arrojamiento: (D-1)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nodo de arrojamiento.</li> <li>2. Conexión enroscada para bastón esférico.</li> <li>3. Bastón esférico.</li> <li>4. Tuerca y arandela de 1".</li> <li>5. Miembro tubular de 100 mm de espesor.</li> <li>6. Nodo tubular de contraventeo hecho de tubo de 89 mm.</li> <li>7. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico.</li> </ol>
---	---

**Despiece de detalle central de la cubierta: (D.-2)**

1. Nodo tubular estándar de cubierta plegable.
2. Bastón esférico.
3. Tuerca y arandela de 1".
4. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
5. Col roll sujetador con tuercas y arandelas de 3/4".
6. Atiezador vertical de 100 mm de espesor.
7. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
8. Nodo tubular estándar de 100 mm.
9. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico.
10. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar bastón esférico de tijera.

**Despiece de detalle central de la cubierta lateral: (D.-3)**

1. Nodo tubular estándar de cubierta plegable lateral.
2. Tapón enroscado para secciones del nodo que no se utilizan de 3/4".
3. Col roll sujetador con tuercas y arandelas de 3/4".
4. Bastón esférico.
5. Tuerca y arandela de 1".
6. Atiezador horizontal de 74 mm de espesor.
7. Tuerca y arandelas de 1 1/2" con bastones sujetadores.
8. Base de cimiento de acero con placa de 1".
9. Atiezador vertical de 100 mm de espesor.
10. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
11. Nodo tubular estándar de 89 mm.
12. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico.
13. Cabezal enroscado.





#### Despiece de detalle de conexión de la cubierta con marco y base: (D.-4)

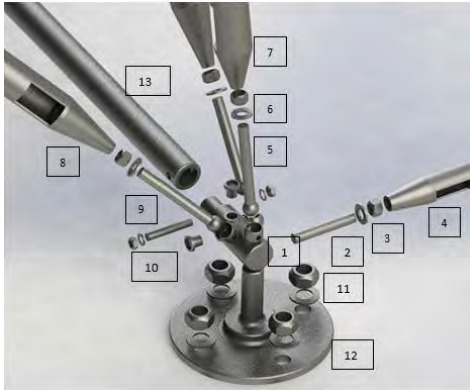
1. Nodo tubular estándar de cubierta plegable con conexión al marco.
2. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico.
3. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico de tijera.
4. Bastón esférico.
5. Tuerca y arandela de 1".
6. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
7. Tuerca y arandelas de 1 1/2" con bastones sujetadores.
8. Base de cemento de acero con placa de 1".
9. Tapón enroscable para secciones del nodo que no se utilizan de 3/4".
10. Col roll sujetador con tuercas y arandelas de 3/4".
11. Atiezador vertical de 100 mm de espesor.
12. Miembro tubular de 100 mm.



#### Despiece de detalle de conexión de la cubierta central con marco: (D.-5)

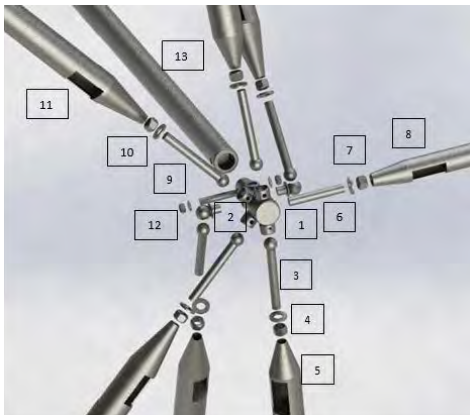
1. Nodo tubular estándar de cubierta plegable con conexión al marco.
2. Col roll de 1".
3. Tuerca y arandelas de 1".
4. Atiezador horizontal de 74 mm.
5. Bastón esférico.
6. Tuerca y arandelas de 1".
7. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
8. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
9. Atiezador vertical de 100 mm de espesor.





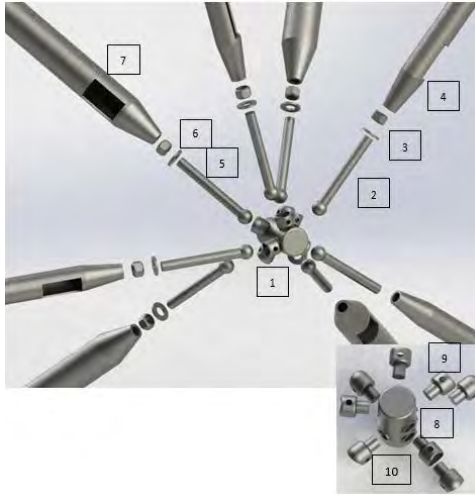
#### Despiece de detalle de conexión del marco geodésico y base: (D.- 6)

1. Nodo tubular estándar de marco plegable con conexión a geodésica.
2. Col roll de 1".
3. Tuerca y arandelas de 1".
4. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
5. Bastón esférico.
6. Tuerca y arandelas de 1".
7. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
8. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
9. Col roll sujetador con tuercas y arandelas de 3/4".
10. Tapón enroscable para secciones del nodo que no se utilizan de 3/4".
11. Tuerca y arandelas de 1 1/2" con bastones sujetadores.
12. Base de cimiento de acero con placa de 1".
13. Atiezador vertical de 100 mm de espesor.



#### Despiece de detalle de conexión marco geodésica: (D.-7)

1. Nodo tubular estándar de marco plegable con conexión a geodésica.
2. Accesorios enroscables para miembros plegables.
3. Bastón esférico.
4. Tuerca y arandelas de 1".
5. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
6. Col roll de 1".
7. Tuerca y arandelas de 1".
8. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
9. Bastón esférico.
10. Tuerca y arandelas de 1".
11. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
12. Col roll sujetador con tuercas y arandelas de 3/4".
13. Atiezador vertical de 100 mm de espesor.



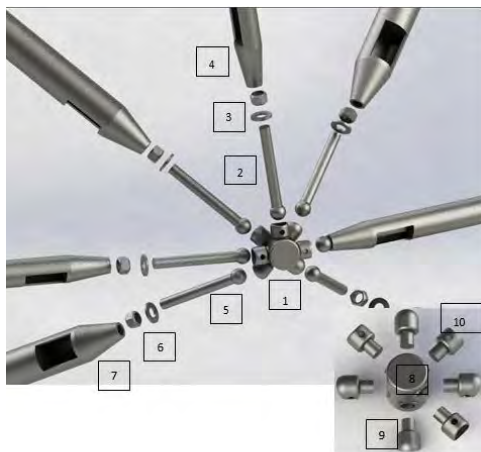
#### Despiece de detalle de conexión geodésica primera fila lateral: (D.-8)

1. Nodo tubular geodésico compuesto.
2. Bastón esférico.
3. Tuerca y arandelas de 1".
4. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
5. Bastón esférico.
6. Tuerca y arandelas de 1".
7. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
8. Nodo tubular estándar de 89 mm.
9. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico.
10. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico de miembro plegable.



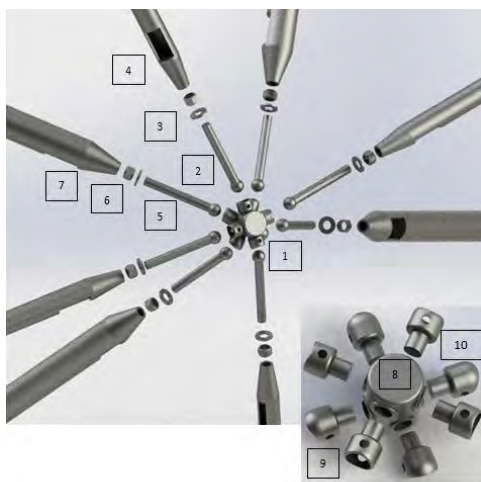
#### Despiece de detalle de conexión geodésica primer fila central: (D.-9)

1. Nodo tubular geodésico compuesto.
2. Bastón esférico.
3. Tuerca y arandelas de 1".
4. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
5. Bastón esférico.
6. Tuerca y arandelas de 1".
7. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
8. Nodo tubular estándar de 100 mm.
9. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar bastón esférico de miembro plegable.
10. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico.



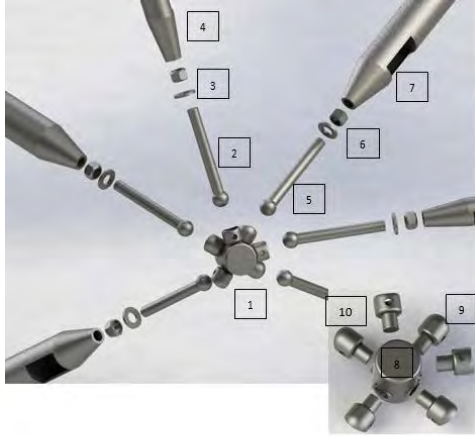
**Despiece de detalle de conexión geodésica  
segunda fila lateral: (D.-10)**

1. Nodo tubular geodésico compuesto.
2. Bastón esférico.
3. Tuerca y arandelas de 1".
4. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
5. Bastón esférico.
6. Tuerca y arandelas de 1".
7. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
8. Nodo tubular estándar de 89 mm.
9. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar bastón esférico de miembro plegable.
10. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico.



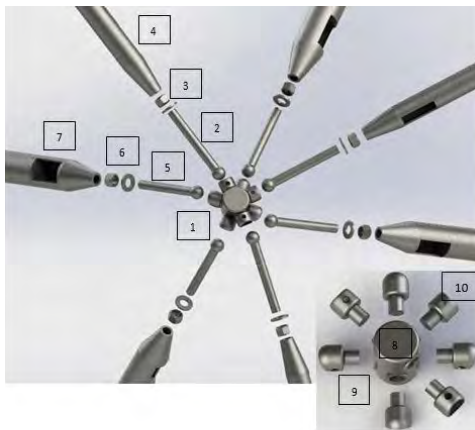
**Despiece de detalle de conexión geodésica  
segunda fila central: (D.-11)**

1. Nodo tubular geodésico compuesto.
2. Bastón esférico.
3. Tuerca y arandelas de 1".
4. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
5. Bastón esférico.
6. Tuerca y arandelas de 1".
7. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
8. Nodo tubular estándar de 100 mm.
9. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar bastón esférico de miembro plegable.
10. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico.



### Despiece de detalle de conexión geodésica tercera fila lateral: (D.-12)

1. Nodo tubular geodésico compuesto.
2. Bastón esférico.
3. Tuerca y arandelas de 1".
4. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
5. Bastón esférico.
6. Tuerca y arandelas de 1".
7. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
8. Nodo tubular estándar de 100 mm.
9. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar bastón esférico de miembro plegable.
10. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico.



### Despiece de detalle de conexión geodésica tercera fila central: (D.-13)

1. Nodo tubular geodésico compuesto.
2. Bastón esférico.
3. Tuerca y arandelas de 1".
4. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
5. Bastón esférico.
6. Tuerca y arandelas de 1".
7. Miembro tubular de 100 mm de espesor.
8. Nodo tubular estándar de 100 mm.
9. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar bastón esférico de miembro plegable.
10. Cabezal enroscado con junta enroscable o (soldada) para encajar el bastón esférico.



Fuente: Morales, C. C. (2013a).

### ***Ventajas***

El nuevo nodo presenta características más estéticas que la primera propuesta y tiene una conexión más excéntrica que ayuda a mantener en equilibrio la geometría de la estructura, de igual manera con el mismo nodo se desarrolló la geodésica plegable que va en los extremos de la cubierta central, la innovación en este nuevo nodo son sus accesorios enroscables y fácil de armar.

Así facilita el transporte de la estructura en cuestión y puede desplegarse en el sitio para ser colocada en un emplazamiento arquitectónico de gran envergadura. Otra propiedad es que los volúmenes de dicha estructura pueden estar por separado y funcionar para diferentes funciones arquitectónicas, esto se pudo lograr gracias a que las conexiones de estos accesorios tienen un bastón regulador esférico que se conecta con una rosca de pretensado y hace que se ajusten a los ángulos adecuados del proyecto. Por último, se dimensionaron los miembros a un diámetro de 150 mm con 5 mm de espesor para mantener más rígida la estructura y no preflexarse como la anterior, ya que la unión no tiene orejas de conexión y se colocan accesorios de enrosque para unir y articular.

### ***Desventajas***

La desventaja del sistema nuevo es el exceso de nodos de conexión, hay 8 nodos diferentes para toda la estructura sumándole 6 accesorios enroscables diferentes y mucha tornillería. Al momento de armar la estructura plegable para su transportación, tomaría mucho tiempo, el bastón esférico que ayuda a mantener en forma la estructura puede llegar a producir inestabilidad en la geometría, ya que está en exceso articulado en tres direcciones, por lo que tiende a moverse demasiado y no podrá mantener la forma por la deformación del material propuesto que es el acero.

Por otra parte, la manufactura no es tan barata ya que son demasiadas conexiones esféricas que tendría que pretensar en los miembros de aspas, lo que resultaría muy costoso; de igual manera la geodésicas de los extremos aún no están del todo resueltas, ya que no se pliega de manera correcta y se tiene que manejar como otro sistema estructural aparte de la cubierta central, por lo cual encarecería la construcción de la estructura y no justificaría la rapidez que presumen dichos sistemas.

El resultado de estas comprobaciones nos da la pauta de diseño para construir el modelo final de este estudio, considerando todos los esfuerzos que se pueden encontrar en el nodo. Con la cubierta plegable ya izada, vale la pena mencionar que en el desplegado de la estructura se utilizaran 9 nodos centrales de la parte superior de la cubierta plegable, en donde se sujetaran los amarres de la grúa para levantar el sistema estructural y desplegar las aspas de la cubierta. Esta ejecución se deberá hacer con un viento calmado para que reparta el peso total de la cubierta de manera equitativa. Estos nodos tendrán una carga puntual por nodo de 9.90 toneladas, por lo que cada nodo axialmente tendría que soportar dichas toneladas de izaje y cada nodo está diseñado para aguantar hasta 16 toneladas, así que 9 nodos son los óptimos para conectar y aguantar el esfuerzo del despliegue (Morales, C. C., 2015a, 2016d).



#### 4.9. METODOLOGÍA DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA MEJORAR EL DISEÑO FINAL

Para poder describir el procedimiento constructivo en teoría y desarrollar un esquema práctico para llevar a la realidad el izaje de la cubierta plegable, se buscan referencias constructivas de sistemas transformables realizadas en el mundo. Para contemplar cuál estrategia se abordará en la construcción de la cubierta plegable, se presentarán varios proyectos que tienen ciertas similitudes en el tema de investigación desarrollado.

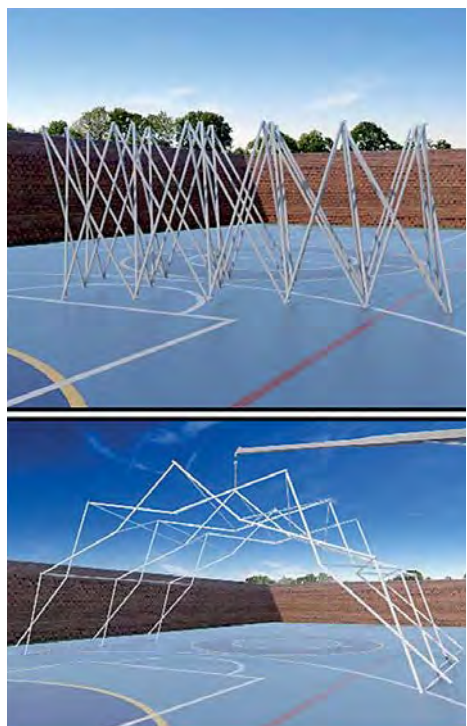
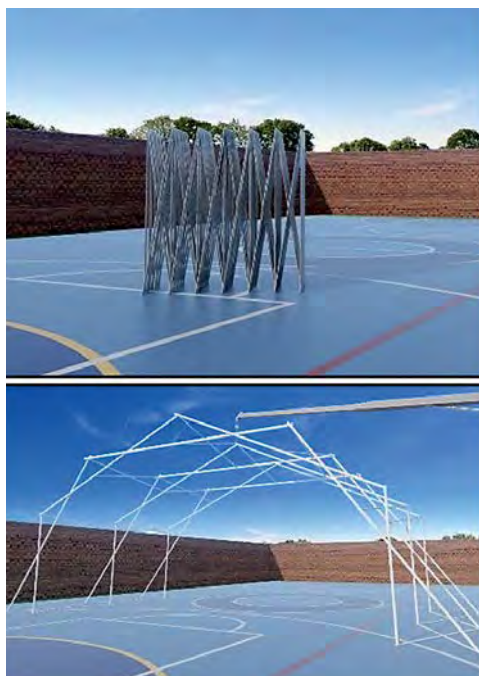
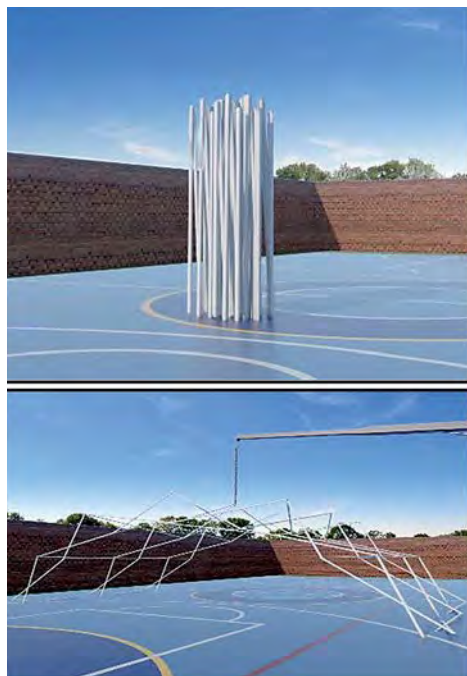
El procedimiento del despliegue de la estructura es una de las etapas más importantes de la construcción de la estructura plegable, por lo que se realiza la siguiente explicación bajo el referente de un módulo experimental que desarrolló el Grupo ESTRAN, del Dr. Carlos Hernández de Venezuela, donde el sistema se desarrolló por medio de la simplificación constructiva de las uniones como la que se hizo en el siguiente prototipo, ya que solo eran unos pasadores que conectaban a los miembros tubulares y formaban el módulo de aspas (figuras 284, 285) (Morales, C. C. 2015a, 2016d).



**FIGURAS 284, 285.** Se observa cómo transportar una estructura transformable en un sitio, aunque es una estructura pequeña el concepto de su transportación debe tener la misma facilidad que esta cubierta. Imagen extraída y redigitalizada. Fuente: [www.grupoestran.com](http://www.grupoestran.com), 2015, Morales, C. C. (2018).

La transportación es vital, ya que la cubierta debe estar empaquetada y plegada para poder ser transportadas en un vehículo, otro aditamento constructivo es colocar una placa en los nodos donde se sostendrá el amarre de la grúa (figuras 286 a 291). Serán 9 nodos de soporte en donde se agarra el nodo en la grúa, este se alzará y bajará las aspas por gravedad, con guías de soga se desplegarán las aspas de manera más segura, y así se extenderá por completo.





---

**FIGURAS 286 A LA 291.** Esquema de izaje de una estructura plegable. Podemos observar cómo será el proceso constructivo de nuestra estructura ya armada con todas las conexiones y accesorios, al igual que este sistema se alzará con una grúa. Imagen extraída y redigitalizada. Fuente: [www.grupoestran.com](http://www.grupoestran.com), 2015, Morales, C. C. (2018).

---

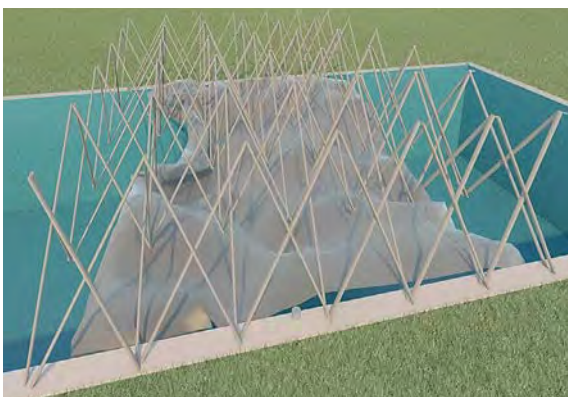
Por último, este proceso constructivo se tiene que respaldar con un izaje de pre-montaje, para verificar la resistencia del nodo cuando se despliegue, esto debe resistir la repartición de la carga en 8 nodos que resistirán el peso total de la estructura. Con este parámetro se puede tener en cuenta que la grúa es un buen método de desplegado para la cubierta (Morales, C. C., 2015a, 2018) (<http://www.grupoestran.com>).

Un ejemplo muy útil que tomamos como referente constructivo de montaje es el desarrollo del despliegue de la cubierta del polideportivo de San Pablo en Sevilla, España, realizado por el Dr. Félix Escrig Pallares y el Dr. José Sánchez Sánchez. La construcción de esta estructura se llevó a cabo desde sus inicios por medio de modelados (maquetas), que sirvieron para desarrollar la configuración del sistema plegable de cubierta. Uno de los primeros análisis que se observan en el montaje de la cubierta se ve reflejado en la manera de transportar el sistema estructural al sitio (figuras 292, 293).



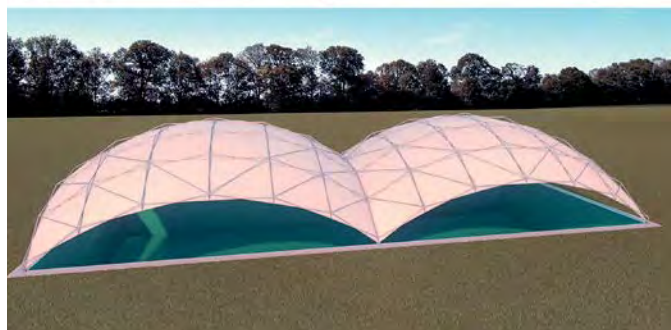
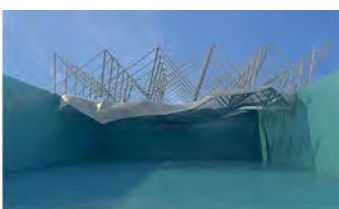
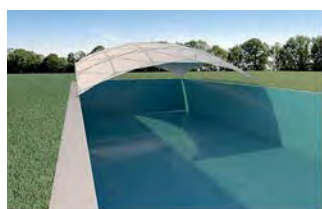
**FIGURAS 292, 293.** Esquema de carga de la cubierta plegable al camión. Es importante comentar que la facilidad de transporte del sistema ayuda a mejorar la velocidad de construcción de la cubierta en el sitio. Imagen extraída y redigitalizada. Fuente: Escrig, F. (1997), Morales, C. C. (2018).

Se observa que la estructura es un empaquetado plegado que se amarra para que no se abra y se coloca en un camión para poder ser transportado, ya en el sitio se sujeta en una grúa en ocho puntos de la cubierta y se despliega en el suelo rasante para chequear si la membrana o la estructura está en buen estado (figuras 294, 295).



**FIGURAS 294, 295.** Esquema de izaje de una estructura plegable. Podemos observar cómo será el proceso constructivo de nuestra estructura ya armada con todas las conexiones y accesorios, al igual que este sistema se alzará con una grúa. Imagen extraída y redigitalizada. Fuente: Escrig, F. (1997), Morales, C. C. (2018).

Posteriormente, se despliega la estructura con la grúa, y se fijan las uniones inferiores a sus soportes para contener los miembros estructurales. Después se conecta la membrana en sus esquinas y se arriostran los vanos con un contraventeo tubular para mantener rígida la cubierta (figuras 296 a 298), en conciencia esta forma de ejecutar un despliegue de estructura plegable es la óptima para desarrollar en nuestra propuesta final de investigación (Morales, C. C., 2015a, 2018) (Escrig, F., 2012).



**FIGURAS 296 A LA 298.** Una vez situada en la posición del desplegado, posteriormente es fácil de desplegar la estructura con su membrana y colocarla en su sitio por medio de una grúa conectada en ocho puntos para anclarse a los soportes. Imagen extraída y redigitalizada. Fuente: Escrig, F. (1997), Morales, C. C. (2018).

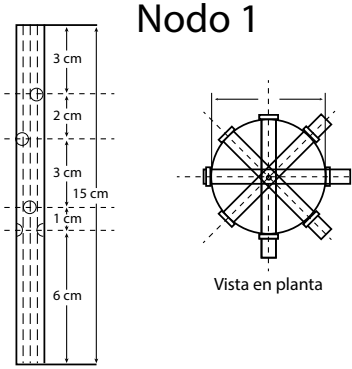

4.10. MODELADO CONSTRUCTIVO DE LA PROPUESTA FINAL

Para adecuar y rectificar la geometría anteriormente descrita se realizará un modelo con base en la geometría de referencia que se obtuvo de los modelos aproximados del capítulo 3 y 4, el cual concretará la cubierta final de este estudio.

A continuación, se formará un nuevo modelo mejorado y ajustado a la nueva condición constructiva de los referentes encontrados. Para este caso se realizará un empaquetado plegable de toda la cubierta, para que solo sean dos tipos de nodos y se estandarice constructivamente el proyecto final. Con base en estos parámetros, se resolverá la estructura plegable. Para ello, se trabajó con el diseño de los nodos, sistema de sujeción con tubo galvanizado que es fácil de manufacturar y realizar los cortes para dicho prototipo experimental.

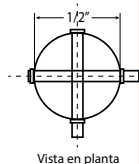
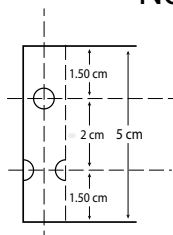
Para el desarrollo de la cubierta plegable se realiza un pequeño prototipo a escala (1:4) con material a base de acero galvanizado, el cual tiene la función de ayudar a entender el proceso de empaquetado y desplegado de una cubierta transformable. Posteriormente, se realiza la construcción de la cubierta plegable que se describirá en el siguiente cuadro (tabla. 4.19), donde se proporciona la función y el material con que se realizaron, cada elemento que compone la cubierta transformable y la función que tiene para estabilizar el sistema plegable de la estructura.

TABLA. 4.19. MODELO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN: FUNCIÓN Y MATERIAL

ELEMENTO		DESCRIPCIÓN
<div><div><p>Nodo 1</p></div><div></div></div>		<p><b>Función:</b> une los contravientos y las tijeras. Permite expandir la estructura rotando en su propio eje.</p> <p><b>Material:</b> tubo conduit galvanizado tipo ligero, pared delgada 16 (1/2), tornillos, rondanas para tornillos de 10 mm y tuercas de 10 mm.</p>



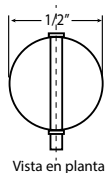
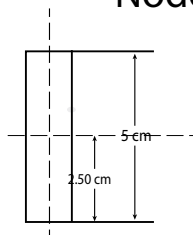
### Nodo 2



**Función:** une los dos tipos de tijeras y tiene dirección cruzada a 45° y se ubica en la parte inferior de la estructura.

**Material:** tubo conduit galvanizado tipo ligero, pared delgada 16 (1/2), tornillos, rondanas para tornillos de 10 mm y tuercas de 10 mm.

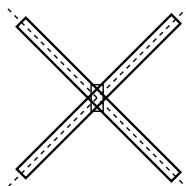
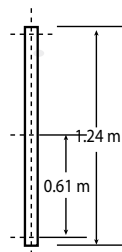
### Nodo 3



**Función:** forma a las tijeras en su eje.

**Material:** tubo conduit galvanizado tipo ligero, pared delgada 16 (1/2), tornillos, rondanas para tornillos de 10 mm y tuercas de 10 mm.

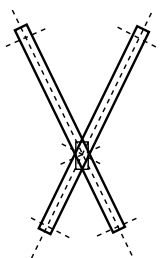
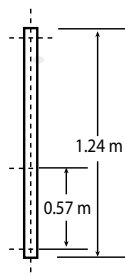
### Tijera 1



**Función:** esta tijera cumple la función de estabilizar a la estructura.

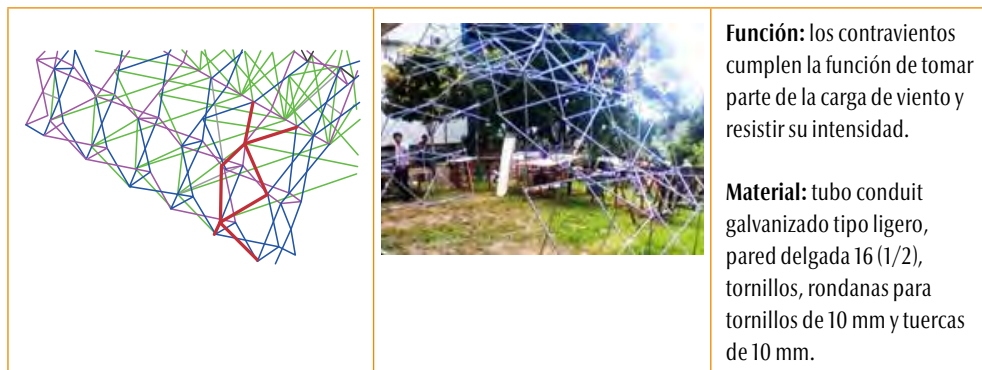
**Material:** tubo conduit galvanizado tipo ligero, pared delgada 16 (1/2), tornillos, rondanas para tornillos de 10 mm y tuercas de 10 mm.

### Tijera 2



**Función:** este tipo de tijera tiene la función de generar la curva de la estructura transformable unidireccional.

**Material:** tubo conduit galvanizado tipo ligero, pared delgada 16 (1/2), tornillos, rondanas para tornillos de 10 mm y tuercas de 10 mm.



Fuente: Morales, C. C. (2015a).

El siguiente paso es el armado del modelo, este se desarrolló bajo las especificaciones y descripciones de la tabla 4.19, con estas contemplaciones se realizó el modelo de la cubierta plegable (figuras 299, 300).



**FIGURAS 299, 300.** Una vez construido el paquete de aspas, se realizará el despliegado de la estructura en el sitio para comprobar sus despliegado y plegado de la cubierta transformable. Fuente: Morales, C. C. (2015a).

Una vez conectadas las piezas de la cubierta plegable se sometieron 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 tiene problemas estructurales por los esfuerzos que se llegan a suscitar a la hora del alzado (figuras 301 a 304).



**FIGURAS 301 A LA 304.** El proceso de alzado ayuda a determinar cómo se comportaría el modelo en la construcción y cómo serían sus deformaciones en algunas partes de la cubierta, también se comprobó que se puede unificar el sistema transformable, ya que anteriormente está separada por la cubierta plegable y la geodésica como dos sistemas independientes, con esta práctica determinamos que pueden estar unidas. Fuente: Morales, C. C. (2015a).

En esta fase se desarrollan fuerzas dinámicas al realizar el despliegado, esto por la ejecución del despliegue por medio de un jalón, este desarrollo generó esfuerzos en las aspas de la base de la estructura, por ello se tendrá que hacer con mucho cuidado el despliegue. Una de las principales características del modelo después del despliegue es que se equilibrará por su geometría. Para llegar a esto, se contempla que la estructura debe estar correctamente transformada, ya que los arrostramientos o contraventeos ayudan a rigidizar la cubierta si está completamente erguida, así la dirección de los esfuerzos llega a hacia las bases del sistema plegable.



Otro factor que se tiene que tomar en cuenta es que el sitio debe estar nivelado, ya que para este modelo no se realizaron los basamentos de nivelación que ayudan a la cubierta adaptarse al terreno. En este ejemplo se nota que la estructura en diferentes escalas a partir del 1:4 puede llegar a tener diferentes utilidades, aunque esté analizada para claros más grandes, ya que su facilidad constructiva le ayuda a su instalación si se tiene contemplado el claro que el usuario quiera cubrir, pues de ello depende el uso de la herramienta que se vaya a utilizar en cada caso constructivo.

Por último, esta práctica de modelaje constructivo aproximado sirve para un modelo final de la investigación. También sirvió para comprobar qué tipo de unión se puede desarrollar y sea más simplificado, asimismo como sería la ejecución constructiva en un sitio controlado y nivelado.

Otro elemento que ayudó en esta práctica fue detectar cómo se iban a generar las deformaciones no controladas en la estructura a la hora de hacer el alzado, ya que se comprobó que las aspas de las bases, solo las de los extremos de cada esquina, se deformaban un poco al momento de conectarse a la base del nivel del suelo, por ello se optará por aumentar un poco el perfil en esas partes. Para concluir se demostró que la geometría unificada, tanto de la nave circular como las geodésicas plegables, se pueden desplegar en una sola estructura sin tener que realizar dos alzados diferentes, esto definió que la cubierta es viable para ser ejecutada en construcción con un solo paquete (Morales, C. C., 2017, 2018).

#### **4.11. PROPUESTA FINAL**

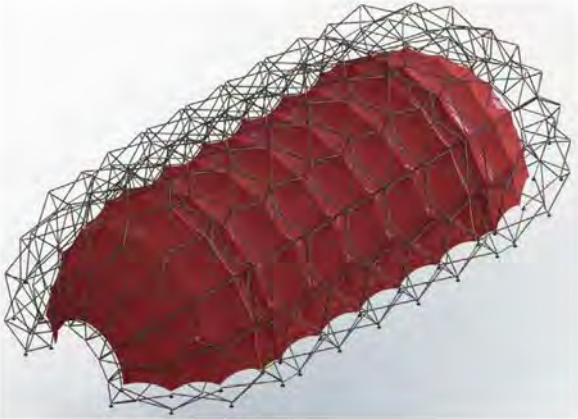
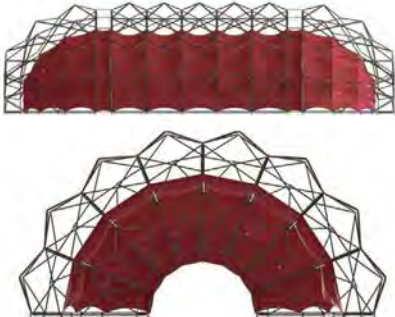
Esta última propuesta se mejora gracias a la experimentación anterior y el diseño de propuestas constructivas de unión, los cálculos ayudan a definir dimensiones adecuadas para las aspas y a formar accesorios y nodos adecuados para un sistema transformable más adecuado. En este capítulo la simulación de la estructura con WinTess es la misma que las anteriores, pero se mejora la propuesta final, la geometría unifica las aspas de la cubierta central con la geodésicas de los extremos, formando una sola estructura que se puede izar en un despliegue y no en dos como en la propuesta anterior, el beneficio es que la construcción sea armada en un solo día.

Por último, la estructura se simplifica con un nodo más simple, se generan dos tipos de nodos y dos tipos de accesorios de conexión: una de contraventeo y la otra para la cubierta plegable, logrando una estética simplificada constructiva. También se simplifican los detalles de conexión de nodo con la membrana, haciendo que la regulación de la cubierta sea más simple y pueda darle la rapidez que debe tener el

desplegado de la estructura, en consecuencia, esto mejora el rendimiento y costo de la construcción.

El material de la membrana ayuda a mejorar la utilización de esta cubierta, porque puede ser blanca, azul, roja, verde, ya que la membrana textil que se utilizará tiene la capacidad de dejar pasar la luz del sol y un poco la sensación térmica, por lo cual se seleccionó un Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002, con una resistencia de RK (daN/5cm) 420/420, módulo de Elasticidad (t/m) 50/50. El material de los tubos, nodos y accesorios se realizarán con un acero A36, esta estructura medirá 25 m en sección transversal y 49.5 m de longitud, esta nueva dimensión es por la mejora realizada en los costados de la cubierta plegable (tabla 4.20), por lo que la siguiente propuesta es la mejor diseñada para ser construida y mejorar el sistema de plegado de este estudio (Morales, C. C., 2013e, 2015a, 2016b).

**TABLA 4.20.** MODELO EN 3D DE LA PROPUESTA FINAL

	<p><b>Descripción</b></p> <p><b>Proyecto dibujo:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p> <p><b>Proyecto foto:</b> Sistema transformable</p> <p><b>Arquitecto:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p> <p><b>Ingeniería:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p> <p><b>Asesor:</b> Dr. José Sánchez Sánchez</p>
	<p><b>Año:</b> 2015</p> <p><b>Tipo de membrana:</b> Serge Ferrari (Fluotop-T2-1002)</p> <p><b>Dibujo:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p>



Fuente: Morales, C. C. (2015a).

El desarrollo de dicha estructura se realizó unificado en una sola geometría plegable, por consecuencia se construyó un sistema transformable más eficiente, este concepto trata de mejorar tal sistema, cuyo referente directo es el teatro ambulante del Arq. Emilio Pérez Piñero, basado en una estructura plegable. Sin embargo, el prototipo desarrollado en este estudio mejora su eficiencia en el diseño de conexiones del nodo, logrando que la estructura sea más flexible y articulada, esto coadyuva a absorber la presión y succión del viento en ambas caras de la estructura.

Cubre un claro transversal de 25 m por 49 m de longitud, tiene un peralte efectivo de 2 metros, que trabaja como una armadura de alma abierta circular, la cual se elabora con un Acero A36 en su denominación Acero s235. Sus nodos se elaboran de acero forjado de la misma denominación, tiene una membrana Serge Ferrari-Fluitop-T2-1002, con una resistencia de RK(daN/5cm) 420/420, módulo de Elasticidad (t/m) 50/50. Este proyecto se completa con dos grandes cúpulas a sus costados que en este momento se realizaron con el mismo material (tabla 4.21), también sus nodos son flexibles y articulados y pueden ser plegados para su fácil transportación (Morales, C. C., 2013e, 2014c, 2015a, 2016b, 2018).

**TABLA 4.21.** ÚLTIMA PROPUESTA MEJORADA EN CONEXIONES  
DE DETALLE 1 Y 2, Y SUS CONEXIONES DE MEMBRANA 1 A LA 4

DESCRIPCIÓN DEL DETALLE 1

Nodo (1)	
Tipo de nodo estándar	Conexión de aspas y contraventeo
	
	Vista planta

### Descripción del nodo de arranque

El nodo estándar de la cubierta plegable está compuesto por accesorios que unen las aspas centrales de la cubierta y los arrojamientos, estos se fijan a un pasador que sujeta la esfera articulada que le da el movimiento pivotante a la estructura, con ello puede plegarse en ambas direcciones y así estabilizar toda la estructura de la cubierta. El nodo soporta un esfuerzo de 1.95 ton/m<sup>2</sup> en ambas direcciones.

### Características

Sus principales características es que están conformados por un nodo con 8 aberturas enroscables, constituidas con esferas que articulan a los accesorios de conexión de las aspas de la cubierta y permiten el movimiento de despliegue en toda la cubierta plegable.

### Despiece



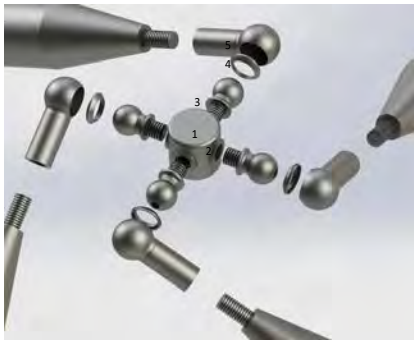
1. Nodo estándar enroscable.
2. Esfera de conexión enroscable de contra viento.
3. Conexión enroscable de sujeción.
4. Accesorio de conexión concavidad esféricas para contraviento.
5. Miembro tubular de 150 mm de diámetro.
6. Esfera de conexión enroscable para aspas plegables.
7. Accesorio de conexión cóncava para aspas plegables.
8. Miembro tubular de 150 mm de diámetro para aspa plegables.



### Conclusión

Luego de haber analizado las propuestas anteriores, se concluye con un diseño de conexión que mejora la función más óptima en la cubierta plegable.

DESCRIPCIÓN DEL DETALLE 2

Nodo (2)	
Tipo de nodo arrojamiento	Conexión arrojamiento
	 <i>Vista planta</i>
Descripción del nodo de arranque	
<p>El nodo de arrojamiento de la cubierta plegable está compuesto por accesorios que unen los miembros de arrojamientos, estos se fijan con una cubierta enroscable que detienen la articulación de los contravientos para plegarse en la estructura.</p>	
Características	
<p>Sus principales características es que están formados por 4 aberturas enroscables que conectan los accesorios esféricos, que a su vez sujetan a los tubos rígidos que realizan la movilidad pivotante del contraviento en la cubierta. El nodo soporta un esfuerzo de 1.76 ton/m².</p>	
Despiece	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Nodo de arrojamiento estándar.</li><li>2. Esfera de conexión de enroscable de contraviento.</li><li>3. Conexión enroscable de sujeción.</li><li>4. Accesorio de conexión concavidad esféricas para arrojamiento.</li><li>5. Miembro tubular de 150 mm de diámetro.</li></ol>	
Conclusión	
<p>En resumen, se mejoró el diseño final de este nodo, este era uno de los más complicados de detallar, pero se logró aterrizar una conexión más coherente para toda la estructura, ya que se unificó con tan solo dos modelos de nodos para todo el sistema transformable.</p>	

CONEXIÓN DE LA MEMBRANA TEXTIL 1

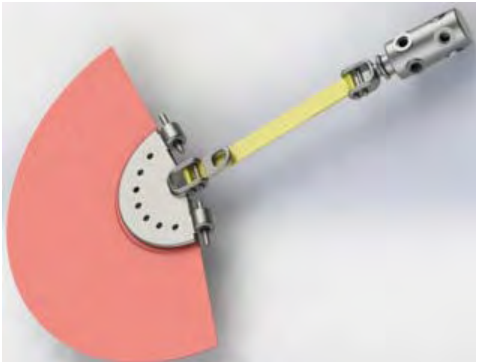
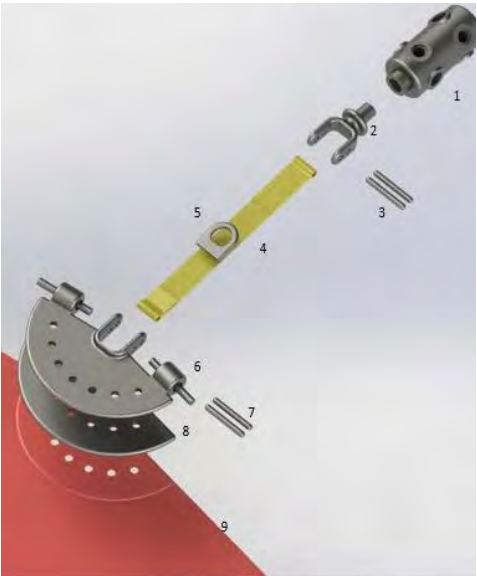
Descripción	Detalle central
<p>El detalle de la membrana central aparece en casi toda la cubierta plegable, ayuda a unir el nodo con una placa metálica de 15 cm de diámetro, este se conecta con una cinta de 2" que resiste 1.3 ton/m<sup>2</sup> en dirección transversal y .75 ton/m<sup>2</sup> en dirección longitudinal. Por ello se seleccionó una cinta que soporta 2 toneladas de esfuerzo admisible, con una resistencia a la ruptura de 3.7 toneladas, esta se sujeta a accesorios de acero A36.</p>	
<p><b>Características</b></p> <p>La composición del detalle de conexión facilita el ensamble central de la cubierta plegable, gracias a que su regulación es por medio de cinta.</p>	
<p><b>Despiece</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Nodo estándar de cubierta plegable.</li><li>2. Accesorio de sujeción de cinta.</li><li>3. Pasadores de contención.</li><li>4. Cinta de amarre de 2 toneladas de resistencia.</li><li>5. Accesorio de agarre de regulación.</li><li>6. Pasadores de contención.</li><li>7. Placa metálica de conexión de membrana.</li><li>8. Placa metálica sujeción de membrana.</li></ol>	
<p><b>Conclusión</b></p> <p>Esta conexión forma parte importante de la estructura, ya que sin ella la membrana no tensaría de manera correcta, en consecuencia, resulta interesante un diseño funcional que permita la unión hacia la parte inferior de la estructura.</p>	

CONEXIÓN DE LA MEMBRANA TEXTIL 2

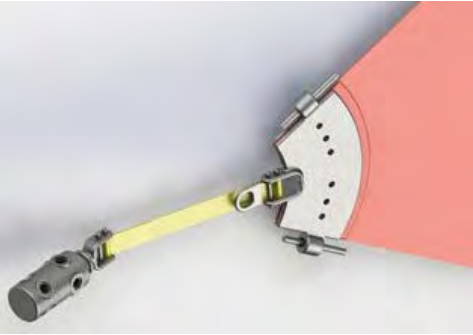
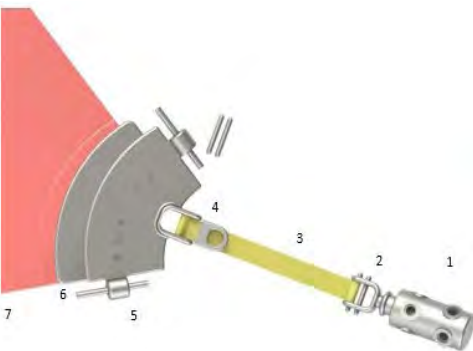
Descripción	Detalle del borde
<p>El detalle de borde de membrana ayuda a fijar la membrana en los costados de la cubierta plegable, esto se fija con dos placas metálicas reguladas con una abertura angular de 162º con una cinta de 2" que resiste un esfuerzo en los bordes, 1.05 ton/m² en dirección transversal y .69 ton/m² en dirección longitudinal. La cinta soporta 2 toneladas en ambas direcciones en esfuerzos admisibles y 3.7 toneladas en última ruptura, este se sujeta con accesorio de acero A36.</p>	
<p><b>Características</b></p> <p>La composición del detalle de conexión de borde facilita el ensamble de la cubierta, gracias a la regulación de la cinta que trata de nivelarse en su eje.</p>	
<p><b>Despiece</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Nodo estándar de cubierta plegable.</li><li>2. Accesorio de sujeción de cinta.</li><li>3. Pasadores de contención.</li><li>4. Cinta de amarre de 2 toneladas de resistencia.</li><li>5. Accesorio de agarre de regulación.</li><li>6. Placa metálica de conexión de membrana de 162º de abertura.</li><li>7. Pasadores de contención.</li><li>8. Placa metálica sujeción de membrana.</li><li>9. Membrana textil de Serge Ferrari-Fluitop- T2-1002T Floup T-1002.</li></ol>	
<p><b>Conclusión</b></p> <p>Esta conexión forma parte importante de la estructura, ya que conecta el borde de la cubierta plegable y estira en sentido transversal la membrana, por ello fija la parte inferior del borde de la membrana de manera correcta para poder soportar los esfuerzos, la cinta reguladora ayuda a moderar la geometría de la membrana al eje del nodo.</p>	



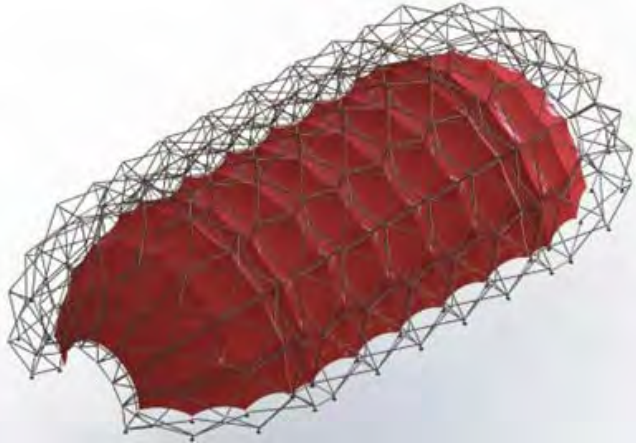
CONEXIÓN DE LA MEMBRANA TEXTIL 3

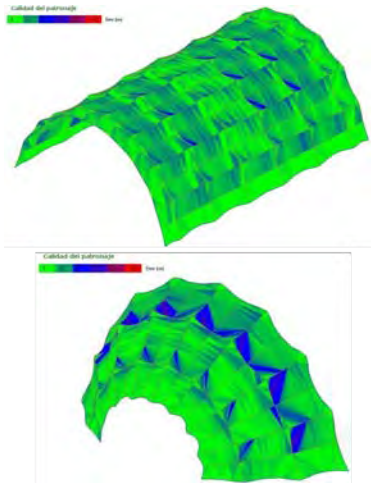
Descripción	Detalle del borde de extremos geodésicos
<p>El detalle del borde del extremo geodésico de la membrana textil fija la velaria a la cubierta plegable, se sujeta en los extremos de los arcos geodésicos de la cubierta con accesorios que regulan la cinta de 2". Este detalle soporta una tensión de 1.2 ton/m<sup>2</sup> en el sentido transversal y .95 ton/m<sup>2</sup> en el sentido longitudinal. Este detalle se compone de una placa metálica con un ángulo de abertura de 173<sup>a</sup>, los compuestos del accesorio y las placas son de acero A36, esta se conecta con una cinta que lo regula y soporta 2 toneladas de esfuerzo admisible en ambas direcciones.</p>	
<p><b>Características</b></p> <p>La composición del detalle de conexión de borde es fácil de armar y colocar a la cubierta plegable, gracias a la simplificación de conexiones y accesorios que tiene para conectar la membrana con la estructura.</p>	
<p><b>Despiece</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Nodo estándar de cubierta plegable.</li><li>2. Accesorio de sujeción de cinta.</li><li>3. Pasadores de contención.</li><li>4. Cinta de amarre de 2 toneladas de resistencia.</li><li>5. Accesorio de agarre de regulación.</li><li>6. Placa metálica de conexión de membrana de 173<sup>a</sup> de abertura.</li><li>7. Pasadores de contención.</li><li>8. Placa metálica sujeción de membrana.</li><li>9. Membrana textil de Serge Ferrari-Fluitop- T2-1002T Floup T-1002.</li></ol>	
<p><b>Conclusión</b></p> <p>Esta conexión contendrá la unión de la velaria en el extremo de los arcos geodésicos, gracias a que contiene un menor número de accesorios de regulación, ayuda a ser montada y transportada al lugar de la obra. Este es un punto importante para esta propuesta final del proyecto de investigación.</p>	

CONEXIÓN DE LA MEMBRANA TEXTIL 4

Descripción	Detalle de la esquina de extremos geodésicos
<p>El detalle de esquina de la cubierta plegable es una de las conexiones más difíciles en los sistemas transformables y las cubiertas ligeras tensadas, por el encuentro de esfuerzo en ambas direcciones en un solo punto concéntrico. Este detalle soporta un esfuerzo de 1.65 ton/m<sup>2</sup> en el sentido transversal y 1.35 ton/m<sup>2</sup> en el sentido longitudinal, por ello el detalle lo compone una placa metálica de acero A36 con una abertura angular de 152°. Los accesorios son fáciles de manufacturar y se conectan con una cinta de 2" que soporta un esfuerzo admisible de 2 toneladas en ambas direcciones.</p>	
<p><b>Características</b></p> <p>La composición del detalle de conexión de esquina es fácil de armar y colocar en la cubierta plegable. Gracias a la simplificación de estas conexiones ayudan a la estructura a poder plegarse en la construcción.</p>	
<p><b>Despiece</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Nodo estándar de cubierta plegable.</li><li>2. Accesorio de sujeción de cinta.</li><li>3. Cinta de amarre de 2 toneladas de resistencia.</li><li>4. Accesorio de agarre de regulación.</li><li>5. Placa metálica de conexión de membrana de 157° de abertura.</li><li>6. Placa metálica sujeción de membrana.</li><li>7. Membrana textil de Serge Ferrari-Fluitop- T2-1002T Floup T-1002.</li></ol>	
<p><b>Conclusión</b></p> <p>Esta conexión puede contener los esfuerzos de ambas direcciones de la cubierta y soportar el esfuerzo de tensión que tiene la forma de la geodésica plegable en los extremos. Gracias a la unificación de la geometría, esta puede tener una mejor excentricidad de los esfuerzos que pueden contener la esquina de la cubierta.</p>	

**TABLA 4.22.** PATRONAJE DE LA PROPUESTA FINAL  
Y SUS MEDICIONES DE COINCIDENCIA EN EL PATRÓN

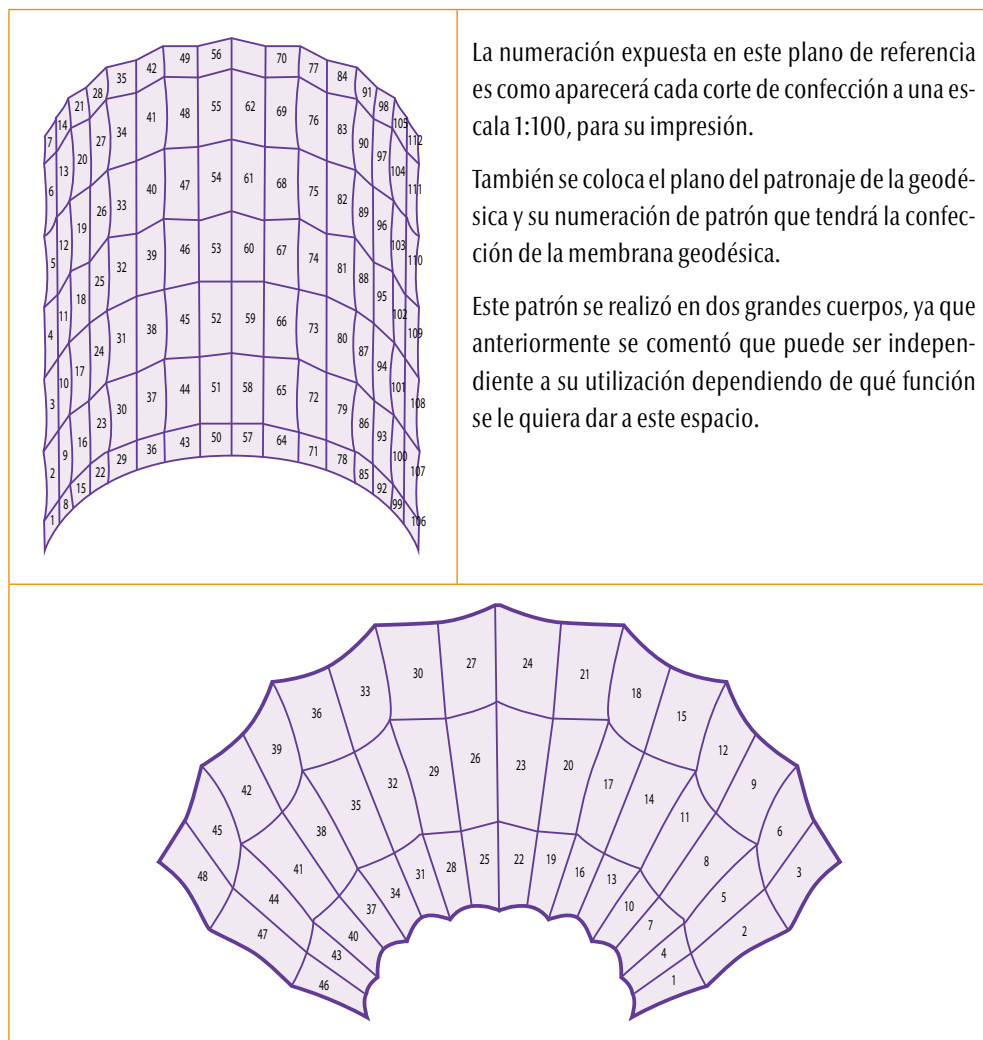
	<b>Descripción</b>
	<p><b>Proyecto dibujo:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p> <p><b>Proyecto foto:</b> Sistema Transformable</p> <p><b>Arquitecto:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p> <p><b>Ingeniería:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p> <p><b>Asesor:</b> Dr. José Sánchez Sánchez</p> <p><b>Año:</b> 2015</p> <p><b>Tipo de membrana:</b> Serge Ferrari (Fluotop-T2-1002)</p> <p><b>Patronaje:</b> Dr. Carlos César Morales Guzmán</p>

Descripción	Análisis de calidad
<p>Se realizó el patronaje del proyecto de cubierta plegable en dos partes, ya que la cubierta puede estar separada del cuerpo de la nave y la geodésica plegable puede ser un cuerpo independiente. El patrón se generó de la siguiente manera: la cubierta plegable central se dividió en 112 partes de membrana textil, Serge Ferrari (Fluotop-T2-1002) de color rojo y la geodésica plegable en 48 partes de membrana textil de mismo material. Se analizó en el programa Win Tess. La relación de confección tuvo pocos errores de patrón, menos de 6 cm de diferencia, por lo cual se toma como bueno el patronaje aquí expuesto.</p>	

Fuente: Morales, C. C. (2015a).

En el siguiente paso se expone la numeración de patronaje que tiene cada corte de la membrana; en la cubierta y en la geodésica plegable tiene media anchura contemplada de 7.5 a 10 cm para cada unión de patrón (tablas 4.22 y 4.23), para que cuando se vulcanicen las uniones tengan buena adherencia. Esto también se tendrá que contemplar en las uniones de sujeción para que no se desgarren en las conexiones metálicas. Dicho esto, se continua con la siguiente numeración de las partes de patrones de la cubierta plegable y posteriormente a la de la geodésica (Morales, C. C., 2015a, 2018).

**TABLA 4.23. PATRONAJE DE LA PROPUESTA FINAL  
Y SUS MEDICIONES DE COINCIDENCIA EN EL PATRÓN**

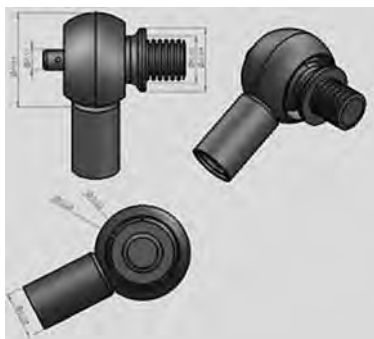


Fuente: Morales, C. C. (2015a).

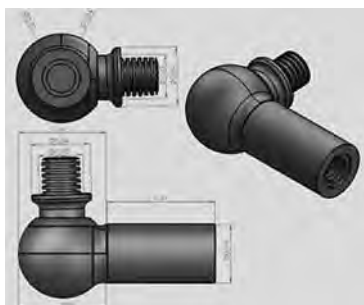




**FIGURA 306.** Esquema y medidas del modelo tentativo para manufacturar el nodo de contraventeo de la cubierta. Fuente: Morales, C. C. (2015a).



**FIGURA 307.** Esquema y medidas del modelo tentativo para manufacturar las conexiones de aspas al nodo estándar. Fuente: Morales, C. C. (2015a).



**FIGURA 308.** Esquema y medidas del modelo tentativo para manufacturar las conexiones de los tubos de contraventeo con el nodo. Fuente: Morales, C. C. (2015a).

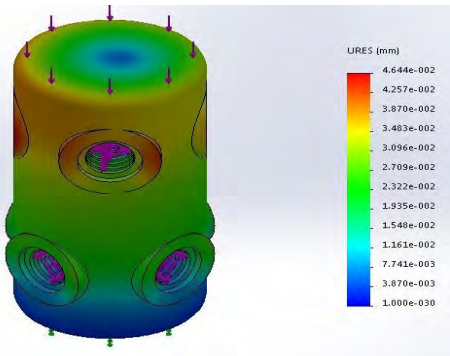
En las siguientes páginas se desarrollan, paso por paso, las comprobaciones de cada accesorio y las medidas finales de cada modelo, por lo cual se describen las características de cada simulación estructural y las cargas más desfavorables que se obtuvieron anteriormente, comprobando su resistencia ante los esfuerzos, los desplazamientos y deformaciones que causan dichas cargas aplicadas (tabla 4.24). Por último, se verifica el porcentaje del material utilizado que realmente actúa en el modelo (Morales, C. C., 2015a, 2018).


**TABLA 4.24.** ANÁLISIS DE ESFUERZO, DESPLAZAMIENTO, DEFORMACIÓN  
Y MATERIAL UTILIZADO EN LA SIMULACIÓN ESTRUCTURAL

NODO 1

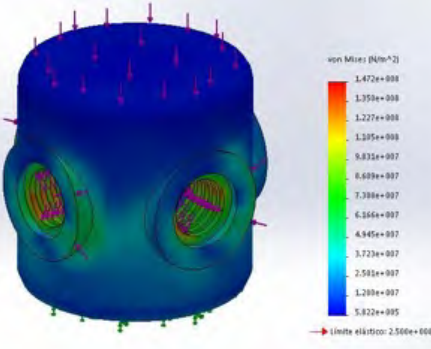
Descripción	Esfuerzos en el nodo
<p>Se realizó el cálculo por elemento finito (FEM) con una malla tipo triangular, se colocó una carga axil: -16.922 toneladas, una cortante en Z: 1.899 toneladas, una cortante en Y: -0.105 toneladas, momento en Z: 2.607 toneladas, momento en Y: 0.758 toneladas.</p> <p>Posteriormente se procede a ejecutar el análisis y se obtiene el primer resultado que son las tensiones. En esta imagen se puede observar que el límite de tensión en el nodo no sobrepasa el límite elástico, esta tiene apenas 22,730,000 N/m<sup>2</sup> y el límite elástico es de 250,000,000 N/m<sup>2</sup>, por esta razón, el diseño del nodo tal como está no tiene ningún problema.</p>	
Descripción	Desplazamiento en el nodo
<p>Continuando con los resultados analizados del nodo, se tienen los desplazamientos internos, éstos son pequeños, ya que los desplazamientos dados por seguridad en la reglamentación de RCD F en México y el LRFD son de 50 mm. Con esto indicado se observa en las figuras que los desplazamientos son de .00756 mm. Aunque en el análisis solo existe un sólido, que es el nodo, las cargas representan los accesorios conectados, por lo cual el resultado es válido y no se tienen desplazamientos tan grandes.</p>	

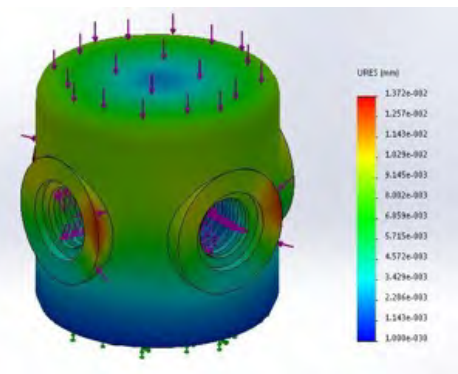
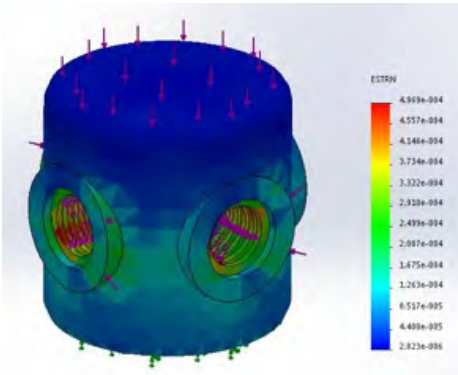
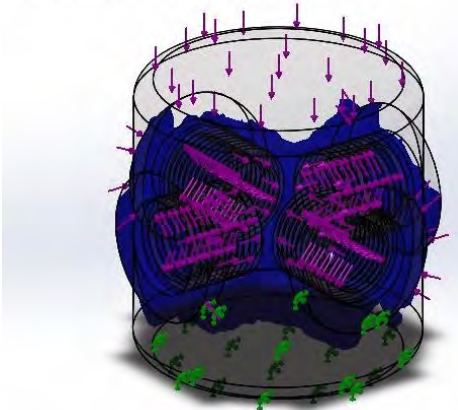


Descripción	Deformaciones en el nodo
Posteriormente, se analizan las deformaciones internas, se determina que son pequeñas, ya que las deformaciones máximas dadas por seguridad en el reglamento del LRFD son de 50 a 65 mm, y la deformación encontrada en el nodo de la cubierta es de .0454 mm, validando que el nodo es seguro a las deformaciones.	

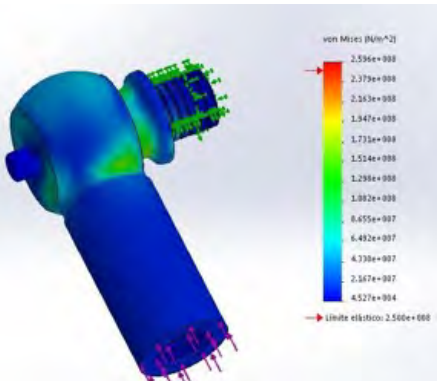
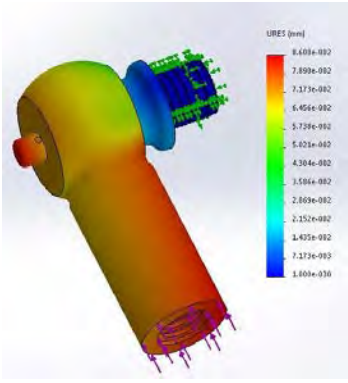
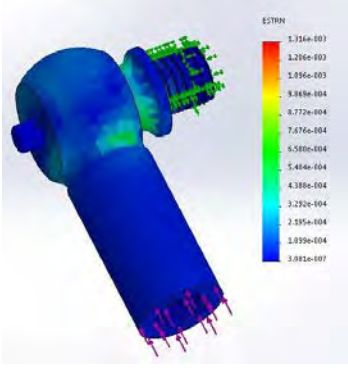
Descripción	Porcentaje de material utilizado
Por lo anterior expuesto, el porcentaje de actuación de mayor esfuerzo que se aplica en el modelo es de 53%/32.53%, cerca de las uniones de conexión con los accesorios de unión. En conclusión, el material es óptimo para resistir los esfuerzos encontrados en el modelo.	<p>Tipo de resultado: Percepción del diseño Percepción del diseño. Volumen (Elementos/Geométrico) = 53.09 %/ 32.53 %.</p> 

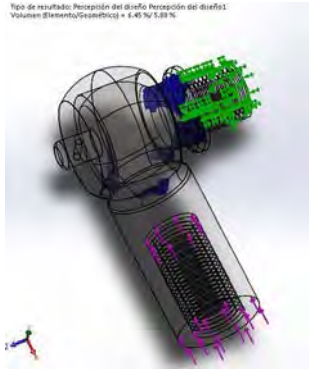
NODO 2

Descripción	Esfuerzos en el nodo
Se realizó el cálculo por elemento finito (FEM) con una malla tipo triangular, se colocó una carga axil: -9.922 toneladas, una cortante en Z: .699 toneladas, una cortante en Y: -0.85 toneladas, momento en Z: 1.207 toneladas, momento en Y: 0.458 toneladas. Para después ejecutar el análisis, donde se obtienen las tensiones. En esta imagen se nota que el límite de tensión en el nodo no sobrepasa el límite elástico, que tiene apenas 14,720,000 N/m² y el límite elástico es de 250,000,000 N/m², por lo que el diseño del nodo tal como está, no tiene ningún problema.	

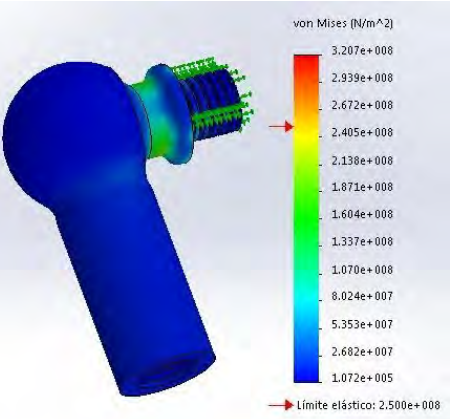
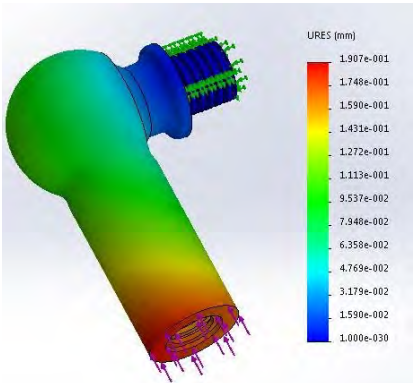
Descripción	Desplazamiento en el nodo
<p>Continuando con los resultados analizados del nodo, se precisa que los desplazamientos internos son pequeños, ya que los desplazamientos dados por seguridad en la reglamentación de RCDF en México y el LRFD son de 50 mm, con esto indicado se hace notar en la figura que los desplazamientos son de .00137 mm, por tanto, siendo el nodo el único elemento sólido, las cargas representan los accesorios conectados, por lo cual el resultado es válido y no se tienen desplazamientos tan grandes.</p>	
Descripción	Deformaciones en el nodo
<p>Una vez determinado que las deformaciones internas son pequeñas, se compara con las deformaciones máximas dadas por seguridad en el reglamento del LRFD, que son de 50 a 65 mm, y la deformación encontrada en el nodo de la cubierta es de .000456 mm. Por tanto, se valida que el nodo es seguro a las deformaciones.</p>	
Descripción	Porcentaje de material utilizado
<p>Por lo anterior expuesto, el porcentaje de actuación en donde se aplica mayor esfuerzo en el modelo es de 53.49%/36.37%, cerca de las uniones de conexión con los accesorios. En conclusión, el material es óptimo para resistir los esfuerzos encontrados en el modelo.</p>	<p>Tipo de resultado: Percepción del diseño Percepción del diseño1 Volumen (Elemento/Geométrico) = 53.49 %/ 36.37 %</p> 

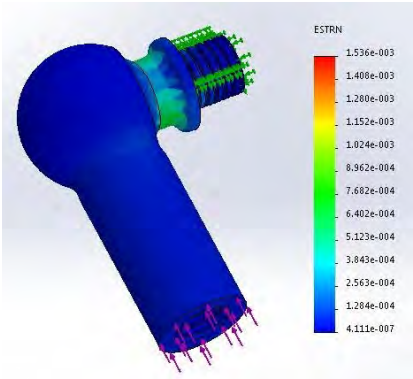
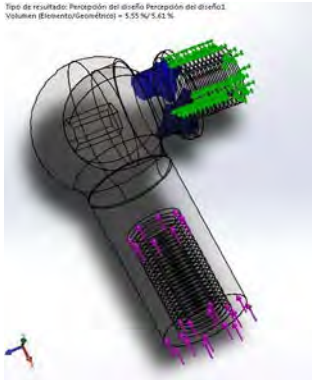
ACCESORIO PRINCIPAL

<p><b>Descripción</b></p> <p>Se realizó el cálculo por elemento finito (FEM) con una malla tipo triangular, se colocó una carga axil: -2.792 toneladas, una cortante en Z: .099 toneladas, una cortante en Y: -0.065 toneladas, momento en Z: 0.097 toneladas, momento en Y: 0.158 toneladas.</p> <p>Después se procede a ejecutar el análisis, donde se obtienen las tensiones. En la imagen se observa que el límite de tensión en el accesorio no sobrepasa el límite elástico, esta tiene apenas 234,120,000 N/m² y el límite elástico es de 250,000,000 N/m², por esta razón, el diseño del nodo tal como está no tiene ningún problema.</p>	<p><b>Esfuerzos en la conexión articulada</b></p> 
<p><b>Descripción</b></p> <p>Continuando con los resultados analizados de los accesorios, se define que los desplazamientos internos son pequeños, ya que los desplazamientos dados por seguridad en la reglamentación de RCDF en México y el LRFD son de 50 mm, con esto indicado se observa en las figuras que los desplazamientos son de .00861 mm, por lo que el accesorio es válido a soportar el desplazamiento ocasionado por las cargas.</p>	<p><b>Desplazamiento en la conexión articulada</b></p> 
<p><b>Descripción</b></p> <p>Al analizar las deformaciones internas, se nota que son pequeñas, ya que las deformaciones máximas dadas por seguridad en el reglamento del LRFD son de 50 a 65 mm, y la deformación encontrada en los accesorios de conexión de la cubierta es de .001326 mm, por lo que el accesorio puede soportar las deformaciones de las cargas.</p>	<p><b>Deformaciones en la conexión articulada</b></p> 

Descripción	Porcentaje de material utilizado
Por lo anterior expuesto, el porcentaje de actuación en donde se aplica mayor esfuerzo en el modelo es de 6.45%/5.40%, cerca de la unión de conexión con el nodo. En conclusión, el material es óptimo para resistir los esfuerzos encontrados en el modelo.	

ACCESORIO SECUNDARIO

Descripción	Esfuerzos en la conexión articulada
<p>Se realizó el cálculo por elemento finito (FEM) con una malla tipo triangular, se colocó una carga axil: -1.102 toneladas, una cortante en Z: .049 toneladas, una cortante en Y: -0.025 toneladas, momento en Z: 0.037 toneladas, momento en Y: 0.058 toneladas.</p> <p>Posteriormente, se procede a ejecutar el análisis y se encuentra el primer resultado que son las tensiones. En esta imagen se observa que el límite de tensión en el accesorio no sobrepasa el límite elástico, esta tiene apenas 248,500,000 N/m<sup>2</sup> y el límite elástico es de 250,000,000 N/m<sup>2</sup>, por esta razón, el diseño del nodo tal como está, no tiene ningún problema.</p>	
Descripción	Desplazamiento en la conexión articulada
Continuando con los resultados analizados de los accesorios, se encuentra que los desplazamientos internos son pequeños, ya que los desplazamientos dados por seguridad en la reglamentación de RCDF en México y el LRFD son de 50 mm, con esto indicado observamos en las figuras que los desplazamientos son de .01907 mm, por lo que el accesorio es válido a soportar el desplazamiento ocasionado por las cargas.	

Descripción	Deformaciones en la conexión articulada
Se analizan las deformaciones internas, éstas son pequeños, ya que las deformaciones máximas dadas por seguridad en el reglamento del LRFD son de 50 a 65 mm, y la deformación encontrada en los accesorios de conexión de la cubierta es de .001526 mm, porque el accesorio puede soportar las cargas y no se deformaría por plastificación del material.	
Descripción	Porcentaje de material utilizado
Por lo anterior expuesto, el porcentaje de actuación en donde se aplica mayor esfuerzo en el modelo es de 5.55%/5.61%, cerca de las uniones de conexión con los nodos. En conclusión, el material es óptimo para resistir los esfuerzos encontrados en el modelo.	

Fuente : Morales, C. C. (2015a).

El resultado de estas comprobaciones da la pauta en el diseño para seguir construyendo modelos de sistema plegable, considerando todos los esfuerzos que se pueden encontrar en el nodo, con la cubierta plegable ya izada; se tiene contemplado que en el desplegado de la estructura se utilizarán 9 nodos centrales de la parte superior de la cubierta plegable, en donde se sujetarán los amarres de la grúa para levantar el sistema estructural y desplegar las aspas de la cubierta, como se mostró en las referencias encontradas.

La ejecución se deberá hacer con un viento calmado para repartir el peso total de la cubierta de manera equitativa. Estos nodos tendrán una carga puntual individual aproximada de 12.50 toneladas, los nodos axialmente soportan más de 19 toneladas, por lo cual 8 nodos son los que soportarán las cargas del izaje para conectar y aguantar el esfuerzo del despliegue, por lo que el resultado de este proceso de

diseño de nodo nos ayuda a seguir proponiendo más sistemas plegables en otros estudios arquitectónicos que necesiten un espacio de temporalidad efímera o permanente, dejando una metodología de diseño para los diseñadores y arquitectos que quieran proponer sistemas estructurales alternativos e innovadores (Morales, C. C., 2015a, 2018).

# Discusión de los resultados

Una vez obtenido un diseño final de este sistema estructural, se hace una discusión reflexiva sobre el tema, ya que hay muy pocos trabajos sobre el estudio de los sistemas transformables en la actualidad, para mencionar algunos investigadores: el Dr. Félix Escrig Pallare y el Dr. José Sánchez Sánchez de la Universidad de Sevilla, el Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Dr. Carlos Hernández de la Universidad de Venezuela, son los quienes en algún momento desarrollaron referencias constructivas contemporáneas importantes de movilidad mecánica de sistemas plegables en las cubiertas. Por esta razón, la presente investigación se justificó en la línea de tiempo y las tecnologías actuales (Morales, C. C., 2013e, 2016b, 2018).

Este estudio ayudó a crear un parteaguas sobre qué tipo de tecnologías y materiales podríamos ocupar, pero con una tecnología más adecuada para resistir los movimientos mecánicos de una estructura plegable, luego se generaron herramientas metodológicas respaldadas por las metodologías de diseño del Dr. Félix Escrig, que ayudaron a realizar un procedimiento geométrico más rápido, el cual nos generó un prototipo experimental 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 anterior, por lo cual ayudó a construir prototipos de sistemas transformables. Con el desarrollo de esta suposición se generó una adecuación geométrica con lo cual se compararon los modelos físicos aproximados para su construcción, esto sirvió para validar la etapa siguiente: el análisis estructural (Morales, C. C., 2013e, 2016b, 2018).

El estudio del análisis estructural del sistema transformable y su construcción en la arquitectura se basa principalmente en la experimentación. Esto se puede apreciar en la fase de la modelación del capítulo 3 y 4 para comprobar la movilidad, la cual se basó en la modelación y verificación por medio de softwares (WinTess en análisis estructural y Solid Work en análisis y desarrollo constructivo industrial), tomando en cuenta las normas (Load and Resistance Factor Desing y Norma de la Construcción del Reglamento del Distrito Federal) y materiales que pudieran mejorar el proceso de la construcción, el cual fue una gran ayuda para realizar el proyecto final de nues-



tra metodología; esto da como resultado un sistema estructural configurable a su entorno. Su principio de diseño versó sobre cómo desarrollar un sistema plegable con conexiones articuladas, el cual lograra enlazar mecanismos móviles y resistentes, que dio la posibilidad de generar aportaciones constructivas para la propuesta final (Morales, C. C., 2013e, 2016b, 2018).

Todo esto deja diferentes líneas de investigación paralelas para abordar y generar más conocimiento práctico-teórico en este campo, un ejemplo de ello es el uso de material como el aluminio estructural, aluminio aeroespacial, plástico estructural y acero reforzado con fibra de vidrio, etc. Por lo cual 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 plegables combinados, guiado por el mapa conceptual reconfigurado del método de diseño del Dr. Horst Berger, siempre y cuando teniendo una base de diseño conceptual basado en referencias, un análisis estructural basado en reglamentos que contemplen las condiciones para verificar su viabilidad estructural en un prototipo que se quiera realizar, y así se podrá obtener un diseño final de un sistema plegable (Morales, C. C., 2016b, 2018).

El estudio nos brinda también el resultado medular de una propuesta metodológica geométrica en el cual se puede experimentar con modelos físicos más rápidos, que puedan ayudarnos a comprender y desarrollar los sistemas transformables. En cuanto a las aplicaciones de diseño de esta investigación, se reflejaron en la realización de la estructura, que se encontraron opciones constructivas debido a la carencia de herramientas especiales y el 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 más sencillez y menos complejas. También se consideró la membrana textil desde un principio, para saber de antemano las tensiones reales que iban a interactuar en el diseño de estas estructuras plegables (Morales, C. C., 2013e, 2016b, 2018).

Por último, verificamos los resultados de los modelos de aproximación del capítulo 4, y nos dejaron una aproximación de aplicación constructiva de este tipo de sistemas plegables, cuáles podrían ser sus ventajas y desventajas de cada prototipo de cubierta transformable, cada una tenía una alternativa constructiva para generar nuevos espacios arquitectónicos, ya que son relativamente fáciles de montar en sitio. Por ello se desarrolló una propuesta final para el mejoramiento de un nudo, primeramente que sus conexiones ya no son tan complejas como la primeras y que su excentricidad con respecto a las otras es menos desfasada, siempre que se diseñen este tipo de estructuras plegables, nos encontraremos con problemas de excentricidades en sus nudos, los cuales se tienen que contemplar para mejorar

ese punto de fallo es que el nodo debe ser lo más sencillo posible para no albergar tantas variantes de conexión y así no alejar más el punto de excentricidad de los miembros estructurales, por lo cual resolvimos el objetivo de este estudio generar una metodología de diseño para crear sistemas plegables (Morales, C. C., 2016b, 2013e, 2019, 2018).

# Conclusión

El estudio de esta investigación se basó desde el principio en la metodología de diseño del Arq. Emilio Pérez Piñero y el Dr. Félix Escrig, quienes son un punto de referencia en la historia, 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.

Sin embargo, la investigación se centró en las hipótesis encontradas que sirvieron para realizar un sistema transformable, esto fue un factor muy importante para primeras aproximaciones conceptuales, desarrollado por el método de diseño del Dr. Félix Escrig, donde expuso el desarrollo geométrico y su viabilidad para analizarlas estructuralmente. En consecuencia, se propuso un desarrollo geométrico en la tabla 2.1, que deriva los rasgos principales del método de Escrig, esto ayudó a generar una geometría más rápida para las estructuras plegables.

Dicho análisis justificado en las tipologías de sistemas plegables encontrados (figura 309), nos proporcionó una variedad de formas que podemos desarrollar y proponer (figuras 310, 311) (Morales, C. C., 2013e, 2016b, 2018).



**FIGURA 309.** Experimentaciones de sistemas plegables en taller de diseño arquitectónico. Fuente: Morales, C. C. (2014a).



**FIGURAS 310, 311.** Modelos prototipados para desarrollar geometrías complejas en los sistemas plegables desarrollados en el Laboratorio de Estructuras. Fuente: Morales, C. C. (2014a).

Otro concepto expuesto es la viabilidad de colocación de la membrana para la configuración final de una estructura plegable, ya que aporta a la estructura estabilidad por el pretensado, pero también una factibilidad constructiva en los detalles para la configuración de nuestra propuesta de estructura transformable, por ello se expusieron sus métodos de diseño, por lo cual se eligió la de simulación por su rápido proceso digital en la computadora.

Estas hipótesis fueron guiadas por un mapa conceptual desarrollado por el Dr. H. Berger, donde se tiene tres grandes rasgos: Diseño conceptual, Análisis estructural y Diseño final. Estas aportaciones teóricas-prácticas se toman como un principio formal para desarrollar un prototipado de las estructuras plegables, generados por parámetros de desarrollo geométrico; esto se compara con las propuestas aproximadas de conexiones, por lo que a futuro se requiere abordar más sobre el tema para posibles aportaciones extras en futuras investigaciones en el tema de modelos físicos experimentales (Morales, C. C., 2016b, 2013e).

Posteriormente, las ideas conceptuales, expuestas en el diseño conceptual de las hipótesis, coadyuvaban a crear modelos físicos y geométricos de las estructuras plegables, estas sólo se implementarán para el desarrollo de un principio de diseño estructural que pueda crear un sistema plegable, dichos modelos generan una premisa teórica constructiva para desarrollar este tipo de sistemas. En cuanto a la aplicación de los conceptos de adecuación geométrica de las estructuras transformables, se ejecutaron varias aproximaciones sucesivas por medio de las adecuaciones estudiadas e investigadas por nuestro desarrollo geométrico (tabla 2.1), el resultando de ello ayudó a determinar la geometría óptima para realizar una cubierta tensada plegable.

Todo esto ofreció un parámetro para desarrollar una propuesta constructiva de dicha estructura plegable, lo cual sirvió para verificar y validar nuestra propuesta de adecuación geométrica y extrapolar la información a los programas informáticos para realizar con más rapidez el análisis estructural de estos sistemas. Con la teorización anterior se entró a la fase de análisis estructural, el cual se guio por el Instituto de Construcción Tubular (ICT), el Load and Resistance Factor Design (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 abierto a un desarrollo de tipo industrial de cubiertas no transitables, aunque la estructura pueda cumplir otras funciones gracias a su transformación plegable (figuras 312 a 321), por lo cual se denomina arquitectónicamente multifuncional (Morales, C. C., 2013e, 2016b, 2018).

Para el cálculo de la estructura se utilizó la simulación por medio de un software llamado WinTess que realiza un análisis de segundo orden, ya que este tipo de estructuras tienden a ser deformables por sus conexiones flexibles, dado que requieren de mecanismos en las uniones articuladas para materializar su movilidad y poder retornar a su estado inicial. Finalmente, con los parámetros de combinaciones necesarias reglamentadas por las anteriores normas, se tiene un planteamiento para proponer y definir aproximaciones de resultados óptimos para el diseño constructivo del prototipo, con el objetivo de demostrar la viabilidad de la propuesta aquí desarrollada (Morales, C. C., 2013e, 2014c, 2016b, 2018).

En cuanto a las aplicaciones tecnológicas en la fase de Diseño final, se realizaron una serie de propuestas aproximadas para el prototipo final, derivado de la construcción parcial de modelos a escala real contruidos con herramientas precarias, pero analizados con el rigor científico que sustenta su resistencia y equilibrio para armarlo y, con ello, se cotejaron aspectos tales como su armado y correcciones de nudos, los alcances de estos modelados ayudaron a adquirir experiencia y conocimiento en la manufactura de los miembros estructurales del modelo; de igual manera, la crítica del sistema estructural en ventajas y desventajas de cada modelo propuesto (Morales, C. C., 2013e, 2014c).

Esta característica crítica ayudó en gran medida a mejorar ciertos criterios de diseño constructivos que se vieron reflejados en la construcción de la estructura final, donde se diseñó un modelo que no tuviera tantas excentricidades por medio de uniones sencillas, primeramente. Para generar los detalles finales se utilizó un software de diseño industrial y mecánico llamado Solid Work, en el que se diseñaron y adaptaron las posibilidades de manufactura; muchas veces por las carencias constructivas y costo del material se replanteaba el diseño de los dispositivos, lo que llevó a una reconfiguración constructiva de conexiones. Así como también, considerar la membrana estructural desde un principio en el diseño, para conocer las tensiones reales que iban a interactuar en la estructura plegable (Morales, C. C., 2013e, 2016b, 2018).

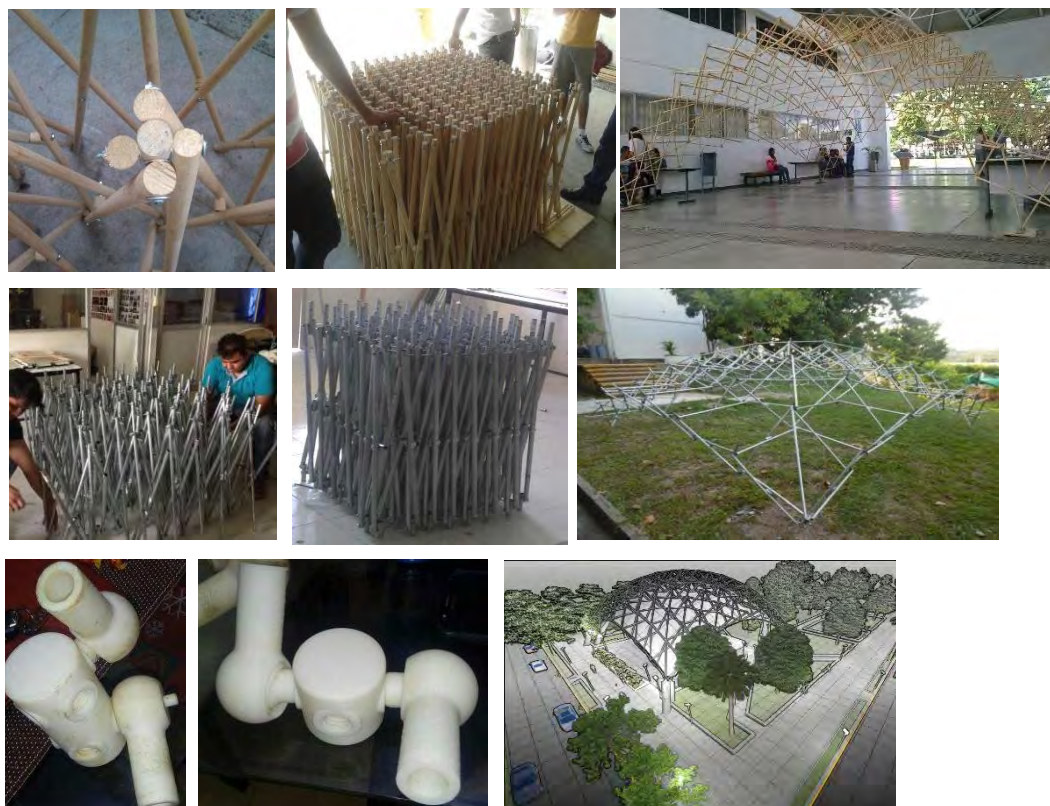


**FIGURAS 312 A LA 321.** Modelos prototipados para desarrollar geometrías complejas en los sistemas plegables desarrollados en el Laboratorio de Estructuras. Fuente: Morales, C. C. (2017).



Sin embargo, el logro de crear un modelo final a escala 1:1 dio la pauta sobre cuáles serían los inconvenientes en estos sistemas y así tratar de subsanar el problema a tiempo para poder fabricar el prototipo final con mucha mayor funcionalidad constructiva. Por esta razón los objetivos se vieron cumplidos gracias a que se fabricó un nodo óptimo, con las menores fallas de excentricidades para manufacturar la sencillez de su armado para su posterior montaje en la construcción, con la idea de obtener mejores resultados en la movilidad mecánica y no tener tanto desfase excéntrico en sus conexiones de armado con los miembros de la estructura.

Aunque no todo está concluido en esta investigación, hay puntos que tendrán que estudiarse más a fondo, y así realizar un estudio más detallado, como es el caso de la adaptación de los sistemas bidireccionales o el desarrollo de la geodésica rebajada plegable, las diferentes tipologías encontradas en el diseño de sistemas plegables y su variedad de adaptaciones geométricas que pudieran llegar a obtener un sistema plegable (figuras 322 a 330).



**FIGURAS 322 A LA 330.** Propuestas para el Ayuntamiento para el rescate de espacios públicos desarrollados por vinculación con el Laboratorio de Estructuras. Fuente: Morales, C. C. (2018a).



El diseño de un sistema transformable se puede dar de varias formas, no necesariamente una sola metodología. Para cuestiones prácticas, en esta investigación sólo se elaboró una de las varias posibles transformaciones en el sistema plegable, casi como también el tema del sistema constructivo no se profundizó con otros materiales más resistentes y ligeros, como puede ser el aluminio o materiales orgánicos como el bambú, y cómo será su ejecución en el montaje en un terreno aislado, dichas circunstancias pueden retomarse para crear diferentes posibilidades de montaje, y también analizar sus propiedades físicas para saber si estará dentro de los rangos de seguridad.

Por último, este estudio puede tener otros beneficios, no es precisamente para uso único, sino para cumplir con muchas funciones, pues la versatilidad de la estructura propicia que los espacios se puedan manipular muy fácilmente y esto se podría aplicar a usos industriales, comerciales o conjuntos de cubiertas, estructuras de un teatro al aire libre (figuras 331 a la 335), hasta crear una megaestructura que pueda albergar varios espacios arquitectónicos, por lo tanto, el tema cumple con la meta establecida desde un principio, que es el de generar una estructura transformable para diferentes tipos de uso (Morales, C. C., 2013e, 2016b, 2018).



**FIGURAS 331 A LA 335.** Propuesta de cubierta emergente para la Cruz Roja y MBK Solutions and Patents, desarrollados por vinculación con el Laboratorio de Estructuras. Registro ante el IMPI: MX/a/2018/02502. Fuente: Morales, C. C. (2019).

# Bibliografía

- Banco, A. (2007). *Arquitectura textil, transformación del espacio*, 1a. ed. Poseidón.
- Becker, J., Kuschnir, E. (1995). *Tipologías estructurales: la desmaterialización de las estructuras de grandes luces*, 2a. ed. Editorial Universidad Pontificia Chile.
- Berger, H. (1996). *Light Structures, Structures of light, the art of tensile Architecture*. 1a. Edition. Basel.
- Broto, C. (2006). *Cubiertas, innovación y diseño*. 1a. edición. Links.
- Candela, F., Piñero, E. P., Calatrava, S., Escrig, F. y Valcarcel, J. P. (1993), *Arquitectura transformable*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla.
- Chilton, J. (2000). *Space Grid Structures*. 1a. ed. Architectural Press.
- Chudley, R. (2001). *Manual de construcción de edificios*. 3a. edición. Gustavo Gili.
- Conrad, R. (1979). *Frei Otto: Estructuras, estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. 1a. edición. Gustavo Gili.
- Engel, H. (2006). *Sistema de estructuras*. 4a. edición. Gustavo Gili.
- Escofet, J., Millán, M. S. y Ralló, M. (2001). *Modeling of woven fabric structures based on Fourier image analysis*. 1a. edición. Applied Optics.
- Escrig, F. (1997). *Star: Structural Architecture*. 1a. edición. Universidad de Sevilla.
- Escrig, F. Valcarel, J. P. y Escrig, F. (2012). *Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil*. Universidad de Sevilla.
- Escrig, F. (1995). *Mobile and Rapidly assembled structure*, vol. I and vol. II. Mechanis Publications.
- Fuller, M. (2000). *Compresión de las estructuras en la arquitectura*. 1a. edición. McGraw-Hill.
- Gantes, C. (2001). *Deployable Structure: Analysis and Design*. Wit press.
- Gómez, V. (2007). *Tensegridad, Estructuras Tensegrícas en Ciencias y Artes*. 1a. Edición. Universidad Catalunya.
- Habermann, S. (2000). *Steel Construction Manual*. 1a. edición. Edition Detail München.
- Jaramillo, J. O. (2004). *Análisis clásicos de las estructuras*. 1a. edición. Universidad Nacional de Colombia.
- Kronenburg, R. (2000). *Portable Architecture*. 1a. edición. Oxford, Architectural.
- Kronenburg, R. (2007). *Flexible: Arquitectura que responde al Cambio*. 1a. edición. Laurenc King.

- McCormac. (2000). *Diseño de estructuras de acero, método LRFD*, 2a. edición. Alfaomega.
- Morales, C. C. (2019). *Diseño y construcción de una cubierta itinerante*. Posdoctorado, Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morales, C. C. (2018). *Diseño de una cubierta emergente para la Cruz Roja*. Posdoctorado, Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Morales, C. C. (2015a). *Arquitectura e ingeniería transformable en las cubiertas plegables*. Estancia posdoctoral. Sevilla, Universidad de Sevilla.
- Morales, C. C. (2014a). *Experiencia educativa: diseño arquitectónico*. Detalles: ejercicios de sistemas plegables. Universidad Veracruzana, Poza Rica, México.
- 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, C. C. (2013b). Informe Técnico: *Sistema Estructurales Retráctiles*. Facultad de Arquitectura, Región Poza Rica-Tuxpan, Universidad Veracruzana.
- Morales, C. C. (2012a). *Diseño de Cubiertas Ligeras Tensadas*. Estancia posdoctoral. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Morales, C. C. (2009). *Diseño de Sistemas Geométricos Estructurales Flexibles para el Espacio Arquitectónico*. [Tesis de Doctorado en Arquitectura]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Morales, C. C. (2007). *Sistemas Flexibles en la Vivienda*. [Tesis de Maestría en Diseño Arquitectónico y Bioclimatismo]. Universidad Cristóbal Colón, Veracruz, México.
- Morales, C. C. y Rivera, 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.
- Motro, R. (2003): *Tensegrity; Structural Systems for the Future*. 1a. edición. Editorial HPS.
- Nonnas, R. (2003). El proyectista de estructuras metálicas. 1a. edición. Thomson-Paraninfo.
- Otto, F. (1990). *Experiments. Form, force and mass*. IL-23. Institute for Lightweight Structures.
- Otto, F. (1974a). *"Grid Shells"* IL-10. Institute for Lightweight Structures.
- Otto, F. (1973). *Estructuras, estudios y trabajos sobre construcción ligera*. Gustavo Gili.
- Otto, F. (1967). *Tensile structures: design, structure, and calculation of buildings of cables, nets, and Pneumatic structures*. MIT Press.
- Otto, F. (1962). *Cubiertas colgantes*. Versión española, Folguera, F. 1a. edición. Editorial Labor.
- Otto, F. y Bodo, R. (1995). *Finding form: towards an architecture of the minimal*. Edition Axel Menges.
- Rodríguez, N. (2007). *Diseño de una estructura transformable por deformación de una malla plana en su aplicación a un refugio de rápido montaje*. [Tesis Doctoral en Arquitectura]. Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93438>, <https://www.tdx.cat>

- Sánchez, F. (1992). *Estructuras ligeras para grandes luces*. 1a. edición. Fundación Emilio Pérez Piñero.
- Schock, H. J. (1997). *Soft Shells, Desing and technology of Tensil Architecture*. 1a. edición. Birkhäuser Verlag.
- Segui, W. (2000). *Diseño de estructuras de acero con LRFD*. 2a. edición. Thomson Editores.
- Sierra, F., Vanegas, L. (2006). *Estructuras ligeras*. 2a. edición. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Sutherland, L. (2004). *Maestros de la estructura*. 1a. edición. Blume.
- Torres, L. y Franco, R. (2006). *Estructuras adaptables*. 1a. edición. Universidad Nacional de Colombia.
- Vandenberg, M. (1998). *Cable nets / Maritz Vandenberg*. Academy Edition. Walter Bird, (1976), *Tents: Pictures of realized membrane structures, remarks from the practice: the work of Peter Stromeyer* IL-16, Institut für leichte Flächentragwerke.
- Villasuso, B. M. (1994). *Diseño y cálculo de las estructuras (Principios básicos diseño estructural)*. 1a. edición. El Ateneo.
- Williams, C. (2000). *The definition of curved geometry for widespan structures*, Widespan Roof Structures. Spo Press. University of Bath.

# Lista de referencias

- Chilton, J. C., Choo, B. S. & Wilkinson, D. (1998). Un análisis paramétrico de la geometría de estructuras de bastidor recíprocas retráctiles. En los procedimientos de la Conferencia LSA98 “Estructuras livianas en ingeniería de arquitectura y Construcción”, Vol. 1, 547-555, Sydney, Australia.
- Clarke, R. C. (1984). La cinemática de una nueva estructura espacial desplegable sistema. Actas de la 3ra. Conferencia Internacional sobre Estructuras Espaciales.
- Escrig, F. (1988). Estructuras espaciales desplegables curvas. *Revista Informes de la Construcción*, 39(393), 53-71. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <https://doi.org/10.3989/ic.1988.v39.i393.1606>
- Escrig, F. (1984). Estructuras espaciales de barras desplegables. *Revista Informes de la Construcción*, 36(365), 35-46. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <https://doi.org/10.3989/ic.1984.v36.i365.1895>
- García-Diego, C. H. Llorens, J. I., Poppinghaus, H. (2008). Venezuela's pavilion in the Hannover Expo 2000. *Revista Informes de la Construcción*, 53(473), 11-26. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <https://doi.org/10.3989/ic.2001.v53.i473.668>
- Llorens, J. I. (2001). El Pabellón de Venezuela en Expo 2000 Hannover en las II Jornadas latinoamericanas de Arquitectura y urbanismo. Institut Català de Cooperació Iberoamericana-ICCI. *Col·lecció Amer&Cat* núm. 3, 130-137, Barcelona, España.
- Llorens, J. I. (2011). Los detalles constructivos de las tenso estructuras. IV Simposio Latinoamérica de Tenso Estructuras, Universidad de la República, Facultad de Arquitectura. Montevideo, Uruguay. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/15512/PONENCIA\\_LLORENS](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/15512/PONENCIA_LLORENS)
- Llorens Duran, J. I. (2015). VI Simposio Latinoamericano de Tenso-estructuras. Realizado conjuntamente con el Congreso de la IASS, Brasilia, 2014. *Revista Informes de la Construcción*, 67(537), Consejo Superior de Investigaciones de Investigaciones. <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4059/4626>
- Morales, C. C. (2008). Ponencia: Diseño de sistema flexibles estructurales en el espacio arquitectónico. Simposio Internacional de la IASS-SLTE 2008, Acapulco-México.
- Morales, C. C. (2010a). Ponencia: Diseño de sistemas geométricos flexibles estructurales en el espacio arquitectónico. Congreso Internacional de Diseño y Tecnología de Producción 2010, Ciudad de México.

- Morales, C. C. (2010b). Ponencia: Diseño de sistemas flexibles en el espacio arquitectónico. VI Seminario Internacional de Pedagogía de la Arquitectura y Urbanismo 2010, La Habana, Cuba.
- Morales, C. C. (2011). Ponencia: Diseño de sistemas estructurales flexibles en el espacio arquitectónico. IV Simposio Latinoamericano de Tenso estructuras 2011, Montevideo, Uruguay.
- Morales, C. C. (2012b). Ponencia: Adecuaciones geométricas orgánicas aplicadas al diseño de cubiertas retractiles. XI Congreso Internacional de Expresión Gráfica Aplicada a la Edificación 2012, Valencia, España.
- Morales, C. C. (2013c). Conferencia magistral: Análisis de cubiertas plegables. I Foro de Ingeniería Estructural y Geotecnia, 2013, Poza Rica, México.
- Morales, C. C. (2013d). Ponencia: Retractable System Design for Light Covers, First Conference Transformables, 2013, Sevilla, España.
- Morales, C. C. (2013e). Prototipo de diseño de una cubierta retráctil tensada. *Revista de Arquitectura*, 15(1), 102-110. Universidad Católica de Colombia. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2013.15.1.11>
- Morales, C. C. (2014b). Proceso de diseño de sistemas transformables en las cubiertas ligeras. *Revista Módulo Arquitectura*, 14(1), 73-96. Universidad de la Costa. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/moduloarquitecturacuc/article/view/640>
- Morales, C. C. (2014c). Desarrollo y construcción de una tenso estructura en la práctica académica. Congreso Internacional de Ciencia y Sustentabilidad. Academia Journal. <https://cics.academiajournals.com>
- Morales, C. C. (2014d). Conferencia magistral: Diseño de cubiertas transformables. I Congreso de Tecnologías para la Arquitectura, 2014, Poza Rica, México, Coordinador.
- Morales, C. C. (2014e) Ponencia: Experimental Construction of a Light Retractable Cover. Simposio Internacional de la IASS-STLE, 2014, Brasilia, Brasil.
- Morales, C. C. (2014f). Ponencia: Construcción de un paraguas transformable tensado. II Congreso Internacional de ingeniería Civil, 2014, La Habana, Cuba.
- Morales, C. C. (2015b). Conferencia Magistral: Diseño de sistemas transformables para sitios emergentes: construcción experimental. III Congreso Internacional de Arquitectura, 2015, Guayaquil, Ecuador.
- Morales, C. C. (2016a). Construcción experimental de un sistema transformable tensado plegable. *Revista de Arquitectura*, 18(1), 98-110. Católica de Colombia. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2016.18.1.9>
- Morales, C. C. (2016b). Desarrollo y construcción experimental de una cubierta transformable. *Revista Módulo Arquitectura*, 16(1), 87-118. Universidad de la Costa. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/moduloarquitecturacuc/article/view/1519>
- Morales, C. C. (2016c). Development and experimental construction of a transformable roof (first phase). *Magazine Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary*, vol. 3. Asian Academic Research Associates.

- Morales, C. C. (2016d). Design and modeling of a folding by simulations geometry. *Magazine Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary*, vol. 3, Asian Academic Research Associates.
- Morales, C. C., Martínez, C., Rivera, H. y Flores, A. (2017). Desarrollo de la forma de una tenso-estructura en el diseño por computadora. *Revista Procesos Urbanos*, 4(1), 136-148. Corporación Universitaria del Caribe. <https://doi.org/10.21892/2422085X.356>
- Morales, C. C. (2018a). Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tenso-estructura. *Revista de Arquitectura*, 20(1), 71-87. Universidad Católica de Colombia. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.1.1544>
- Morales, C. C. (2019). Diseño y construcción de un paraguas plegable para espacios arquitectónicos. *Revista de Arquitectura*, 21(1), 76-89. Universidad Católica de Colombia. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.1623>
- Puertas del Río, L. (1990). *Estructuras espaciales desmontables y desplegables*. *Revista Informes de la Construcción*, 42(409), 43-53. Superior de Investigaciones Científicas. <https://doi.org/10.3989/ic.1990.v42.i409.1442>
- Sánchez-Cuenca, L. (1996). Cúpula extensible. *Revista de Edificación*, 23(1). Universidad de Navarra. <https://revistas.unav.edu//index.php/revista-de-edificacion/article/view/34903>

## Páginas web

- Arquitectura contemporánea: <http://www.treehugger.com>
- Ayuntamiento de Calasparra, sección de la Asociación de Emilio Perez Piñero: <http://www.calasparra.org>
- Bibliografía del Ing. Vladimir Shukjhov: <http://shukhov.org/shukhov.html>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE): <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/385.htm>
- Construcción de viviendas yurtas: <https://www.archdaily.mx/mx/02-326671/arquitectura-vernacula-yurtas-viviendas-nomades-en-mongolia>
- Construcción e historia de la vivienda tuareg: <https://www.almendron.com/artehistoria/arteculturas/tuareg-nomadas-del-desierto/>
- Diseño de una estructura transformable por deformación de una malla plana en su aplicación a un refugio de rápido montaje. [Tesis Doctoral] <https://www.tdx.cat>.
- Descripción y construcciones nómadas de beduinos: <http://aguiluchos.net/2017/may/beduinos.php>
- Descripción de la geodésica plegable en forma de iris: <http://www.ojodigital.com>.
- Despacho de diseño del Arq. Chuck Hoberman: <http://www.hoberman.com/>
- Despacho de tenso estructuras sombra red: <http://www.sombrared.com> ; [http://claudetteyssautier.com/arquitectura\\_construccion\\_maqueta10.html](http://claudetteyssautier.com/arquitectura_construccion_maqueta10.html)
- Ejemplo de construcciones de tenso estructuras en Latinoamérica: <http://www.velarias.net/lonarias.procesosdelasvelarias.lonas.htm>.
- Grupo Estran. Estructuras transformables: <http://www.grupoestran.com>
- Historia de los tipis: <http://www.tipis.es/historia-del-tipi/>



- Historia de Roma y sus construcciones: <http://viajarbaratoportucuenta.blogspot.com/>  
 Instituto Tubular para la Construcción en España: <http://www.ictubular.es/asp/Presen-tacion.asp>
- Llorens, J. Textile Construction & Tensile Structures Joints, Connections, Fittings And Anchors Data Bank ETSAB-UV. Colaborador de detalles de la página 2012-2018. Disponible en <http://www.upc.es/ca1/cat/recerca/tensilestruc/portada.html>
- Manual de vientos y sismo de CFE: [http:// https://es.scribd.com/](http://https://es.scribd.com/)
- Morales, C. C. (2015). Registro de patente ante el IMPI: Cubierta plegable a base de uniones flexibles con nodos cilíndricos articulados. Número de registro: MX/a/2015/005833. <https://siga.impi.gob.mx/newSIGA>
- Morales, C. C. (2015). Registro de patente ante el IMPI: Mejoramiento de uniones a base de nodos articulados de una cubierta geodésica plegable. Número de registro: MX/a/2015/005834. <https://siga.impi.gob.mx/newSIGA>
- Morales, C. C. (2016). Registro de patente ante el IMPI: Hipérbola plegable a base de uniones flexibles con nodos cilíndricos articulados. Número de registro: MX/a/2016/005608. <https://siga.impi.gob.mx/newSIGA>
- Morales, C. C. (2018). Registro de patente ante el IMPI: Cubierta plegable a base de uniones flexibles con nodos. Número de registro: MX/a/2018/02502. <https://siga.impi.gob.mx/newSIGA>
- Normas complementarias del reglamento de Construcción de DF y Manual de Construcción de Obras de CFE: <http://ciczac.org/Documentos%20pdf/ntc/NTCDF-1-Oct6-04.pdf>
- Organización de Emilio Pérez Piñero: <http://www.perezpinero.org/>
- Procesos de armado de las tiendas de los beduinos: <https://www.freeimages.com/premium/bedouin-tent-in-the-desert-147351>
- Pabellón oval Vladimir Shukjhov: [https://www.wikiwand.com/en/All-Russia\\_Exhibition\\_1896](https://www.wikiwand.com/en/All-Russia_Exhibition_1896)
- Pabellón de Venezuela en la Expo Hanover 200: <http://www.legadoexposevilla.org/se-presenta-el-proyecto-del-pabellon-de-venezuela/>
- Reglamento de Construcción del Distrito Federal (RCDF). <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/385.htm>
- Reglamento del EHE 08. <https://www.fomento.gob.es/organos-colegiados/mas-organos-colegiados/comision-permanente-del-hormigon/cph/instrucciones/ehe-08-version-en-castellano>
- Sastre, R. Wintess (Versión 3.1) [Software computacional] Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Cataluña. <http://tecno.upc.edu/wintess/manual/>
- Torre de agua de Vladimir Shukjhov: <https://regnum.ru/news/economy/2061962.html>
- Vivienda tipi tradicional: <http://infantilgraciapc.blogspot.com/2016/01/nuestros-tipis-indios-el-tipi-por.html>
- Vivienda tuareg y beduina: <http://culturatextil.blogspot.com/>
- Vivienda yurta: <http://www.canada-mongolia-connection.com>

# Índice de tablas

<b>Tabla 2.1.</b>	Formas básicas para generar una estructura plegable	55
<b>Tabla 2.2.</b>	Clasificación de las estructuras ligeras móviles	63
<b>Tabla 2.3.</b>	Clasificación de las estructuras ligeras rígidas	64
<b>Tabla 2.4.</b>	Clasificación de las estructuras ligeras plegables y transformables	65
<b>Tabla 2.5.</b>	Clasificación de las estructuras ligeras retráctiles	66
<b>Tabla 2.6.</b>	Tipología de las uniones para estructuras transformables con superficies fracturadas	67
<b>Tabla 2.7.</b>	Tipología de las uniones para estructuras ligeras con superficies activas	68
<b>Tabla 2.8.</b>	Tipología de las uniones para estructuras preflexadas con superficies activas	69
<b>Tabla 2.9.</b>	Tipología de las uniones para estructuras transformables	70
<b>Tabla 2.10.</b>	Clasificación de nudos constructivos para estructura plegable	71
<b>Tabla 4.11.</b>	Combinación de cargas por el Reglamento de Construcción del D. F.	142
<b>Tabla 4.12.</b>	Combinación más afectada para calcularse en el programa WinTess	152
<b>Tabla 4.13.</b>	Análisis y diseño de la estructura	153
<b>Tabla 4.14.</b>	Diseño de la membrana y el cable	155
<b>Tabla 4.15.</b>	Modelo en 3D de la primera propuesta	170
<b>Tabla 4.16.</b>	Detalles constructivos y descripciones de funcionamiento	171
<b>Tabla 4.17.</b>	Segunda propuesta en 3D	179

<b>Tabla 4.18.</b> Descripción de detalles constructivos de armado y despiece de cada componente y las mejoras a la anterior propuesta	180
<b>Tabla. 4.19.</b> Modelo experimental de la investigación: función y material	193
<b>Tabla 4.20.</b> Modelo en 3D de la propuesta final	198
<b>Tabla 4.21.</b> Última propuesta mejorada en conexiones de detalle 1 y 2, y sus conexiones de membrana 1 a la 4	199
<b>Tabla 4.22.</b> Patronaje de la propuesta final y sus mediciones de coincidencia en el patrón	206
<b>Tabla 4.23.</b> Patronaje de la propuesta final y sus mediciones de coincidencia en el patrón	207
<b>Tabla 4.24.</b> Análisis de esfuerzo, desplazamiento, deformación y material utilizado en la simulación estructural	210